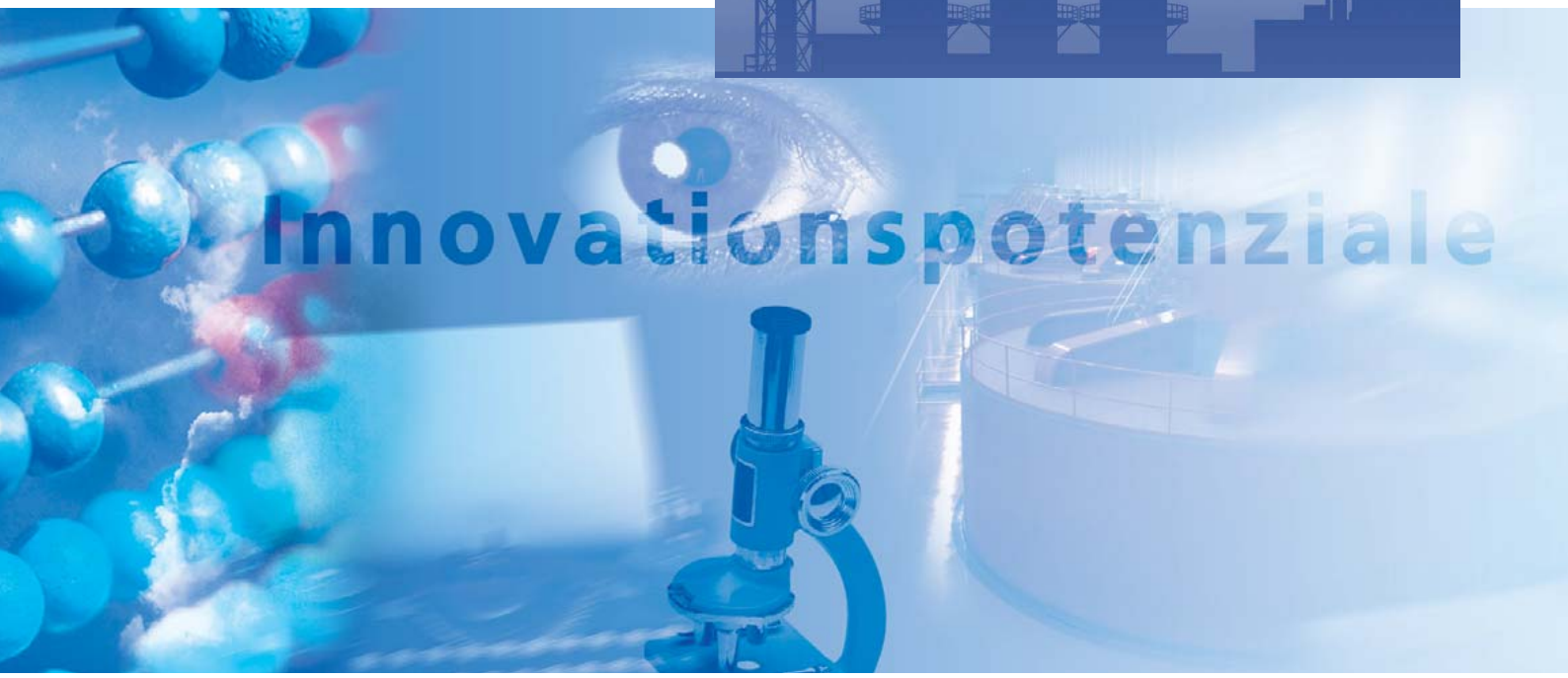
Energieverbrauch und CO_2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente

Herausgeber:
Tobias Fleiter
Barbara Schlomann
Wolfgang Eichhammer





Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI

ISI-Schriftenreihe »Innovationspotenziale«

Herausgeber:
Tobias Fleiter, Barbara Schlomann,
Wolfgang Eichhammer

Energieverbrauch und CO_2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente

FRAUNHOFER VERLAG

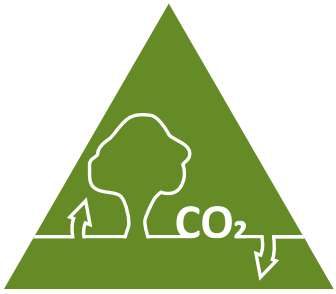
Ansprechpartner:
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Telefon 07 21 68 09 - 0, Telefax 07 21 68 91 52
E-Mail info@isi.fraunhofer.de, URL www.isi.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISBN: 978-3-8396-0515-8

Copyright: iStockphoto.com touring - iStock_14905988 (Grafik Cover vom ISI)
Layout: Bärbel Katz

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Buch wurde
klimafair gedruckt
Nr. 104-13 © Karlsruher Klimaschutzfonds, KEK gGmbH
www.klimafair-karlsruhe.org

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2013
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Das Konsortium

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)

Barbara Schlomann (Projektleitung), Dr. Tobias Fleiter, Simon Hirzel, Marlene Arens, Dr. Clemens Rohde, Dr. Wolfgang Eichhammer, Felix Cebulla, Rainer Elsland, Daniel Fehrenbach, Norman Singer, Andreas Gerspacher

Karlsruhe

IREES GmbH
Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien

Farikha Idrissova, Prof. Dr. Eberhard Jochem, Michael Mai, Dr. Felix Reitze, Felipe Andrés Toro, Jan Bachmann, Katrin Wittich

Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Ali Hassan

TU Berlin, Institut für Chemie

Die vorliegende Publikation basiert auf Ergebnissen, die im Forschungsvorhaben „Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen von industriellen Branchentechnologien durch Prozessoptimierung und Einführung neuer Verfahrenstechniken“ im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitet wurden (Umweltforschungsplan, Förderkennzeichen 3709 46 130). Die Darstellungen und Ergebnisse spiegeln nicht notwendigerweise die Sichtweise des Auftraggebers wider. Die inhaltliche Verantwortung liegt allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Vorwort **1**

Zusammenfassung **3**

TEIL I Einleitung, Methodik und branchenübergreifende Ergebnisse ***15***

1 Hintergrund und Vorgehensweise **17**
B. Schlomann, T. Fleiter, S. Hirzel, W. Eichhammer (Fraunhofer ISI)

1.1 Ausgangslage 17
1.2 Zielsetzung 19
1.3 Abgrenzung des Analyserahmens 19
1.4 Methodisches Vorgehen 23
1.5 Literatur 41

2 Branchenübergreifende Ergebnisse **43**
S. Hirzel, T. Fleiter, B. Schlomann (Fraunhofer ISI)

2.1 Auswahl der in die Untersuchung einbezogenen Branchen 43
2.2 Energiebedarf und THG-Emissionen der energieintensiven Prozesse im Basisjahr 46
2.3 Ergebnisse der Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 51
2.4 Hemmnisse und fördernde Faktoren in der Industrie 74
2.5 Politische Instrumente in der Industrie 85
2.6 Literatur 101
2.7 Anhang 102

TEIL II Branchenanalysen ***109***

3 Grundstoffchemie **111**
A. Hassan (TU Berlin)

3.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse 111
3.2 Analyse der Prozesse 128
3.3 Analyse der Einsparoptionen 175
3.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 243
3.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren 253
3.6 Branchenspezifische energiepolitische Instrumente 256
3.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 259
3.8 Literatur 265
3.9 Anhang 271

4 Eisen- und Stahlindustrie 277
M. Arens, W. Eichhammer (Fraunhofer ISI)
4.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse 277
4.2 Analyse der Prozesse 282
4.3 Analyse der Einsparoptionen 291
4.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 303
4.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren 307
4.6 Branchenspezifische politische Instrumente 309
4.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 312
4.8 Literatur 314

5 Nichteisenmetall-Industrie 317
C. Rohde, F. Cebulla (Fraunhofer ISI)
5.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse 317
5.2 Analyse der Prozesse 320
5.3 Analyse der Einsparoptionen 329
5.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 335
5.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren 340
5.6 Branchenspezifische politische Instrumente 341
5.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 342
5.8 Literatur 343

6 Papiergewerbe 345
T. Fleiter, D. Fehrenbach (Fraunhofer ISI)
6.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse 345
6.2 Analyse der Prozesse 351
6.3 Analyse der Einsparoptionen 365
6.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 388
6.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren 395
6.6 Branchenspezifische politische Instrumente 397
6.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 400
6.8 Literatur 402

7 Verarbeitung von Steinen und Erden 405
F. Reitze, E. Jochem (IREES)
7.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse 405
7.2 Analyse der Prozesse 420
7.3 Analyse der Einsparoptionen 428
7.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 443
7.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren 452
7.6 Branchenspezifische politische Instrumente 456

7.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 461
7.8 Literatur 464

8 Glas und Keramik 469
F. Toro, E. Jochem (IREES)
8.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse 469
8.2 Analyse der Prozesse 476
8.3 Analyse der Einsparoptionen 485
8.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 493
8.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren 501
8.6 Branchenspezifische politische Instrumente 503
8.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 506
8.8 Literatur 508

9 Ernährungsgewerbe 511
F. Idrissova, E. Jochem (IREES)
9.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse 511
9.2 Analyse der Prozesse 523
9.3 Analyse der Einsparoptionen 530
9.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale 534
9.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren 539
9.6 Branchenspezifische politische Instrumente 541
9.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 542
9.8 Literatur 544

Abkürzungsverzeichnis 547

Abbildungsverzeichnis 552

Tabellenverzeichnis 557

Vorwort

Die Steigerung der Energieeffizienz wird von der Bundesregierung als ein Kernelement der Energiewende angesehen. Auch die Internationale Energieagentur und die Vereinten Nationen weisen wiederholt auf die zentrale Rolle der Energieeffizienz im Kampf gegen den Klimawandel hin. Umso überraschender ist es, dass die letzte systematische Aufarbeitung der Energieeinsparpotenziale im Bereich der energieintensiven Industrie in Deutschland bereits über zehn Jahre zurück liegt und auf Forschungsarbeiten aus den 1990er Jahren zurück greift. Zwischenzeitlich sind Energiekonzepte für einzelne Industriebranchen entstanden, die zwar Möglichkeiten zur Energieeinsparung beleuchten, jedoch eher umsetzungsorientiert sind und keine systematische Erhebung der damit verbundenen Einsparpotenziale aus energiewirtschaftlicher Sicht beinhalten.

Das Ziel dieser Studie ist daher, mit einem konsistenten Modellierungsansatz die Möglichkeiten der Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie in Deutschland zu untersuchen. Dabei werden sowohl die Höhe und die Kosten der Energieeinsparpotenziale berechnet als auch umfangreiche qualitative Beschreibungen der untersuchten Einsparoptionen bereitgestellt. Weiterhin werden die wichtigsten Hemmnisse, welche den Einsatz effizienterer Technologien verhindern, identifiziert und mögliche politische Instrumente zur Überwindung dieser Hemmnisse diskutiert. Die Untersuchung wird für die sieben Industriebranchen mit der höchsten Energieintensität durchgeführt.

Das vorliegende Buch ist in zwei Teile gegliedert. Teil 1 enthält eine Beschreibung der gewählten Methodik sowie eine Zusammenfassung und Diskussion der über alle betrachteten Industriezweige aggregierten Ergebnisse. In Teil 2 wird für jede dieser Branchen dargestellt, welche technischen Energieeffizienz-Optionen zur Verfügung stehen und welche Einsparpotenziale damit verbunden sind. Somit stellt jedes dieser Branchenkapitel aus Teil 2 auch eine eigenständige Analyse dar.

Nicht nur der Umfang dieser Veröffentlichung, sondern auch die hohe Zahl von rund 200 identifizierten und in die Modellierung einbezogenen Einsparoptionen macht deutlich, dass auch in den energieintensiven Industriezweigen noch vielfältige Möglichkeiten bestehen, die Energieeffizienz zu verbessern und damit Energieverbrauch sowie Energiekosten zu reduzieren. Es ist außerdem davon auszugehen, dass die tatsächliche Anzahl verfügbarer Einsparoptionen noch deutlich höher liegt. Insbesondere in den Bereichen der Querschnittstechniken wie Beleuchtung oder Elektromotorsysteme (Druckluft, Pumpen, Ventilatoren, Kälte etc.) sind noch hohe Einsparpotenziale vorhanden, die jedoch außerhalb des Untersuchungsrahmens dieser Studie liegen; denn hierzu wurde in jüngerer Vergangenheit schon relativ umfangreich geforscht und publiziert.

Weiterhin wird für die Untersuchung angenommen, dass die produzierten Mengen der untersuchten Produkte und Halbzeuge dem Trend der vergangenen Jahre folgen und weder ein ausgeprägter struktureller Wandel noch eine Dematerialisierung der Produktionsstruktur erfolgen. In dieser Studie wurden ausschließlich die Möglichkeiten einer Steigerung der Energieeffizienz bei den einzelnen Prozessen in der energieintensiven Industrie untersucht, die sowohl durch Einsatz verbesserter Techniken als auch durch ein verbessertes Energiemanagement erreicht werden können.

Um die Analyse auf einen möglichst aktuellen und praxisnahen Kenntnisstand zu setzen, wurden eine Vielzahl an Interviews sowie jeweils ein Workshop mit Branchenexperten und Vertretern von Technologieanbietern und Forschungsinstituten durchgeführt. An dieser Stelle möchten wir allen Interviewpartnern für ihren wertvollen Beitrag zu dieser Studie danken, ohne den es aufgrund der nur spärlich vorhandenen statistischen und sonstigen öffentlich zugänglichen Informationen kaum möglich gewesen wäre, bestehende technische Effizienzpotentiale praxisnah zu beschreiben und belastbare Modellrechnungen auf dem hohen Detailliertheitsgrad durchzuführen, wie er in dieser Untersuchung zugrunde gelegt wurde.

Zusammenfassung

Hintergrund

Ziel der Bundesregierung ist es, die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2020 um 40 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren (von 1246 auf 748 Mt CO_2-eq. oder um knapp 500 Mt CO_2-eq.). Dieses Ziel wurde auch im Ende September 2010 vorgelegten Energiekonzept der Bundesregierung bekräftigt. Bis zum Jahr 2011[1] war ein Rückgang der gesamten Emissionen an Treibhausgasen (THG) um 26,5 % gegenüber 1990 zu verzeichnen (Rückgang von 1 246 auf 917 Mt CO_2-eq.). Um auch die bis 2020 noch erforderlichen Einsparungen zu erreichen (etwa 170 Mt CO_2-eq.), müssen in allen Sektoren die vorhandenen Energie- und THG-Einsparpotenziale möglichst weitgehend erschlossen werden. Dies gilt auch für den Sektor Verarbeitendes Gewerbe, auf den im Jahr 2008 ein Anteil von 28 % am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland entfiel.

Vor diesem Hintergrund ist die Zielsetzung dieser Studie, die Energie- und THG-Einsparpotenziale in den energieintensiven Prozessen der Industrie zu identifizieren und basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen mögliche politische Maßnahmen zur Realisierung dieser Potenziale vorzuschlagen. Damit soll gezeigt werden, wie weit und mit welchen Maßnahmen die Erhöhung der Energieeffizienz bei industriellen Prozessen energieintensiver Grundstoffproduktionen zu Energie- und THG-Einsparungen führen und damit zum Erreichen des 40 % THG-Minderungsziels bis 2020 beitragen kann. Darüber hinaus wird auch das längerfristige Einsparpotenzial bis 2035 berechnet.

Aufgrund der hohen Relevanz der Grundstoff-Industriezweige für den industriellen Energieverbrauch wurden in dieser Studie die folgenden sieben energieintensiven Branchen detailliert untersucht: Grundstoffchemie, Eisen- und Stahlerzeugung, Nichteisen-Metalle und -gießereien, Papiergewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden, Glas und Keramik und das Ernährungsgewerbe. Auf diese Branchen entfiel im Jahr 2007, dem Basisjahr dieser Untersuchung, ein Anteil von rund 70 % des industriellen Endenergieverbrauchs. Es muss allerdings betont werden, dass industrielle Querschnittstechnologien, die über die Grenzen verschiedener Industriebranchen und Verfahren eingesetzt werden (wie z. B. Druckluftsysteme, Beleuchtung, Elektromotoren, Ventilatoren oder Pumpen), demgegenüber in dieser Studie nicht untersucht werden, jedoch auch maßgeblich zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen (direkt

---

1 Schätzung für 2011 (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2012/pd12-017_weniger_treibhausgase_mit_weniger_atomenergie.htm).

und indirekt über den eingesparten Strom). Um den industriellen Endenergieverbrauch und die daraus resultierenden THG-Emissionen vollständig zu erfassen, werden sie jedoch nachrichtlich auf der Ebene der Industrie insgesamt mit ausgewiesen.

Methodik

Der zur Untersuchung der Minderungspotenziale gewählte Ansatz beruht methodisch auf den folgenden vier Säulen:

1. Identifizierung erfolgversprechenden Energieeffizienz-Technologien bzw. Einsparoptionen im Bereich industrieller Prozesse in den sieben Branchen.
2. Ermittlung der techno-ökonomischen Eigenschaften (spezifisches Einsparpotenzial, einmalige und laufende Kosten, Lebensdauer etc.) der Einsparoptionen.
3. Modellierung der aggregierten Wirkung auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen der Industrie bis 2035 mit dem Energienachfragemodell FORECAST-Industry.
4. Analyse von Hemmnissen und fördernden Faktoren für die Diffusion von Energieeffizienz-Technologien und Ableitung von möglichen politischen Instrumenten und Maßnahmen zur Beschleunigung der Potenzialausschöpfung.

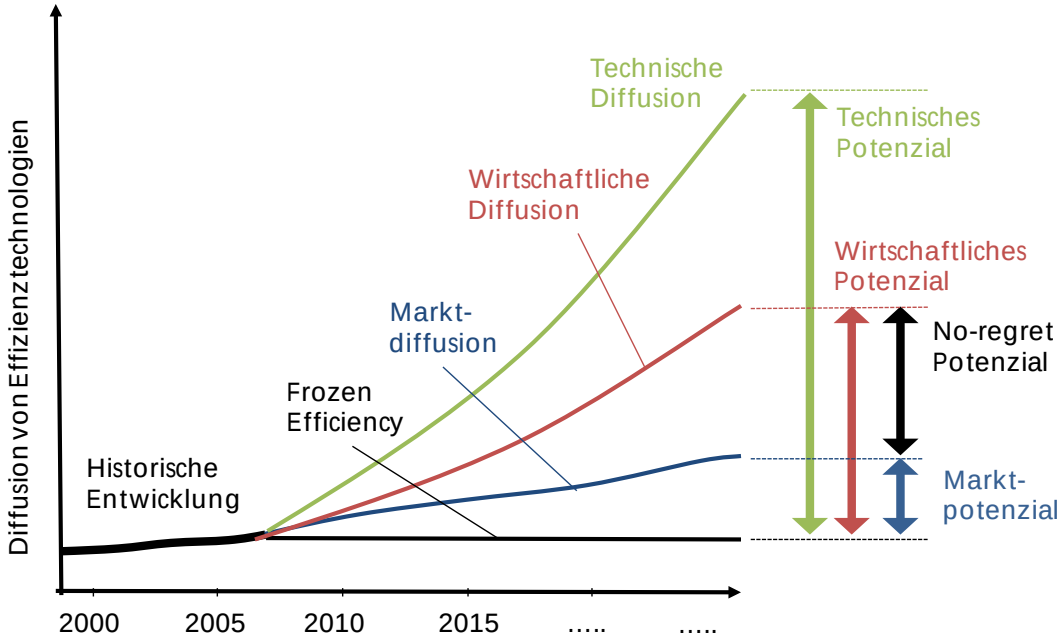
Um die derzeitige und zukünftige Verbreitung von energieeffizienten Prozesstechnologien realistisch abzuschätzen, wurden neben einer umfassenden Literaturauswertung auch Experteninterviews mit Vertretern aller hier untersuchter Industriebranchen sowie ein Workshop mit über 50 Branchenexperten durchgeführt. Die Berechnung der Wirkung der Einsparoptionen und Potenziale auf den Energieverbrauch und die THG-Emissionen erfolgte mit dem vom Fraunhofer ISI entwickelten Bottom-up-Modell „FORECAST-Industry“.

Aufgrund der sehr vielfältigen Prozesse und Verfahren, die in der Industrie eingesetzt werden, ergibt sich auch bezüglich des Energieverbrauchs eine sehr heterogene Technologiestruktur mit einer Vielzahl verschiedener Energieverbraucher, die sich auch hinsichtlich der möglichen Einsparoptionen unterscheiden. Insgesamt werden modellgestützt rund 200 einzelne Einsparoptionen in den sieben analysierten Branchen untersucht. Darüber hinaus können noch weitere Maßnahmen oder Technologien zum Tragen kommen, die in dieser Studie aufgrund der hier gesetzten Systemgrenzen jedoch nicht berücksichtigt wurden (wie die Prozesssubstitution hin zu Sekundärrohstoffen, Querschnittstechnologien, neue noch nicht bekannte Prozessinnovationen oder Technologien zur industriellen Abscheidung und Einlagerung von Treibhausgasen, „Carbon Capture and Storage CCS“).

In der Studie werden vier Szenarien berechnet, die sich bezüglich der Diffusion der Einsparoptionen unterscheiden und aus denen sich drei Potenziale ableiten lassen (vgl. Abbildung 0-1). Basisjahr für die Berechnungen ist das Jahr 2007.

- Im Szenario „***Frozen Efficiency***" wird angenommen, dass kein weiterer Energieeffizienzfortschritt stattfindet und die Diffusion der Einsparoptionen auf dem Niveau des Jahres 2007 stagniert. Dieses Szenario spiegelt selbst kein Einsparpotenzial wieder, sondern bildet die ***Baseline***, auf welche die Potenziale jeweils bezogen werden. Dieses Szenario spiegelt daher keine reale Entwicklung wider, da in der Realität immer Effizienzfortschritte auch autonom bei Nachrüstungen und bei Re-Investitionen erzielt werden; es stellt aber einen nützlichen Bezugspunkt dar.
- Das Szenario „***Marktdiffusion***" setzt voraus, dass die bestehenden Hemmnisse für die Marktdiffusion von Energieeffizienztechnologien sowie die derzeitigen energiepolitischen Rahmenbedingungen weiterhin erhalten bleiben. Es entspricht einer „Business-as-usual"-Entwicklung auf der Ebene der Einsparoptionen. Damit wird in diesem Szenario nur ein Teil der wirtschaftlichen Einsparoptionen implementiert, und viele potenziell wirtschaftliche Maßnahmen werden nicht umgesetzt. Das diesem Szenario zugeordnete ***Marktpotenzial*** wird als Differenz des Energiebedarfs im Szenario Frozen Efficiency zum Szenario Marktdiffusion berechnet.

Abbildung 0-1: Klassifizierung der untersuchten Energieeffizienzpotenziale und Zuordnung zu den Szenarien



- Das Szenario „***Wirtschaftliche Diffusion***" geht von einem „Homo oeconomicus"-Verhalten der Akteure aus und nimmt an, dass alle wirtschaftlichen Einsparoptionen

umgesetzt werden. Das zugehörige ***wirtschaftliche Potenzial*** wird wiederum als Differenz zum Frozen-Efficiency-Szenario berechnet. Für die Wirtschaftlichkeit der Investition ist dabei entscheidend, welche Kosten zu Grunde gelegt werden. Hier wird statt mit Vollkosten mit Differenzkosten gerechnet, d. h. es wird nur die Differenz zu den Kosten der herkömmlichen Technologie betrachtet. Das Differenzkostenprinzip hat auch Auswirkungen auf die Diffusion der Einsparoptionen, welche durch den Ausschluss des vorzeitigen Anlagenaustausches an die natürliche Umwälzung des Anlagenbestandes gebunden ist. Diese kann für einzelne industrielle Anlagen durchaus im Bereich mehrerer Jahrzehnte liegen. Der mögliche Zusatznutzen (Co-Benefits) von Energieeffizienz-Technologien wie Qualitäts- oder Kapazitätsverbesserungen (weniger Ausschuss, bessere Kapazitätsauslastung) wird nicht berücksichtigt. Dieser würde die Wirtschaftlichkeit vieler der untersuchten Prozess-Technologien weiter verbessern.

- Das vierte Szenario wird als „***Technische Diffusion***" bezeichnet und berücksichtigt keine Wirtschaftlichkeitsüberlegungen. Es basiert jedoch auf realistischen Annahmen bezüglich der Verbreitung der jeweiligen Technologien. Optionen mit hoher technologischer Unsicherheit wurden ausgeschlossen. Auch in diesem Szenario wird ein sofortiger (vorzeitiger) Anlagenaustausch ausgeschlossen. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die typische Lebensdauer der Anlagen nicht beeinflusst wird. Das diesem Szenario zugeordnete ***technische Potenzial*** wird als Differenz zum Frozen-Efficiency-Szenario berechnet.

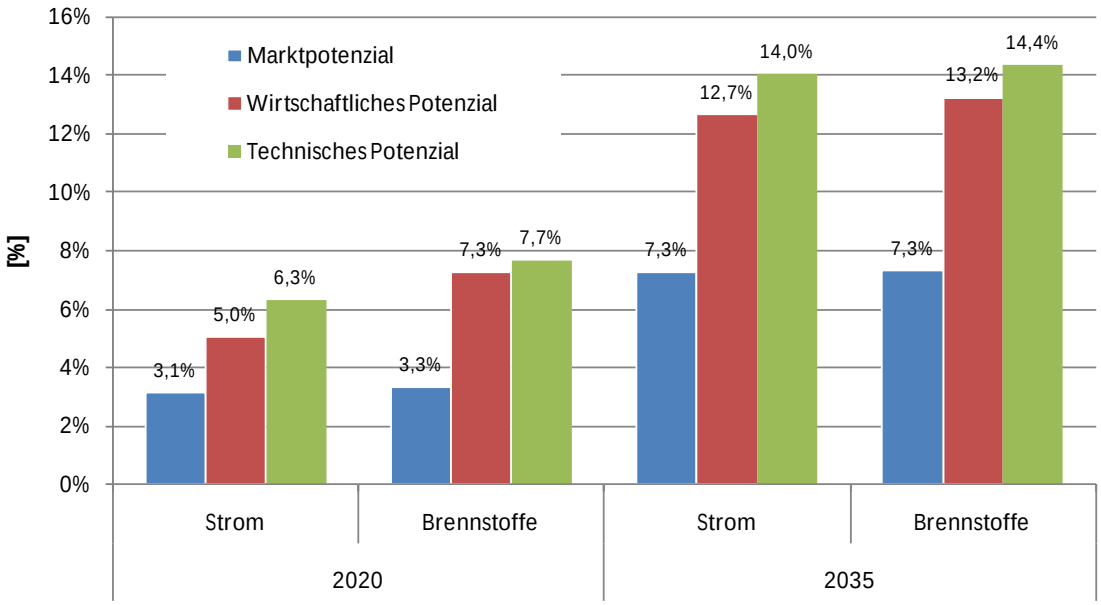
Aus Politiksicht interessant ist das so genannte ***No-Regret-Potenzial***. Dieses stellt die Differenz von wirtschaftlichem Potenzial und Marktpotenzial dar. Es gibt diejenigen Einsparungen an, die ohne Änderung der Rahmenbedingungen aufgrund verschiedenster Hemmnisse nicht realisiert würden, aber trotzdem wirtschaftlich sind. Die Umsetzung des No-Regret-Potenzials bedeutet somit Kosteneinsparungen für die Unternehmen und ist für diese wirtschaftlich attraktiv. Auch für die Klimapolitik, die nach möglichst günstigen Optionen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen sucht, ist es eine wichtige Zielgröße. Viele politische Maßnahmen zielen auf die Überwindung der Hemmnisse und damit die Realisierung des No-Regret-Potenzials ab.

Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich für die Brennstoffeinsparungen als auch für die Stromeinsparungen durch die hier betrachteten Maßnahmen zur Energieeinsparung im Bereich industrieller Prozesse ein technisches Einsparpotenzial von jeweils rund 14 % bis zum Jahr 2035 gegenüber dem Strom- bzw. Brennstoffbedarf im Frozen-Efficiency-Szenario im gleichen Jahr (Abbildung 0-2). Dies entspricht einem absoluten Einsparpotenzial von 49 PJ (~14 TWh) für Strom und 214 PJ (~59 TWh) für Brennstoffe. Dieses Potenzial ist zum größten Teil wirtschaftlich erschließbar, sodass das wirtschaftliche Potenzial bei Strom und Brennstoffen jeweils bei rund 13 % liegt. Nimmt die Verbreitung von effizien-

ten Technologien mit der gleichen Geschwindigkeit zu, wie dies bereits in der Vergangenheit der Fall war, so ergeben sich beim Marktpotenzial Einsparungen im Vergleich zum Frozen-Efficiency-Szenario von 7,3 %. Betrachtet man die aus dieser Entwicklung resultierenden Treibhausgasemissionen, so liegt das technische Einsparpotenzial bei rund 36 Mt CO_2-eq. bis 2035 (Tabelle 0-1). Darin enthalten sind sowohl energiebedingte THG-Emissionen (einschließlich indirekte THG-Emissionen aus Stromeinsparungen) als auch direkte prozessbedingte Emissionen der betrachteten Industrieprozesse.[2] Bis zum Jahr 2020 sind die Potenziale deutlich niedriger. Das technische Einsparpotenzial liegt in diesem Zeitraum bei knapp 8 % für Brennstoffe und bei etwa 6,5 % für Strom, jeweils bezogen auf das Frozen-Efficiency Szenario im Jahr 2020.

Abbildung 0-2: Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe aggregiert über alle Prozesse (jeweils bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario im jeweiligen Jahr)



Die dadurch vermiedenen THG-Emissionen betragen bis 2020 etwa 22 Mt CO_2-eq. (technisches Potenzial) bzw. 20,7 Mt (wirtschaftliches Potenzial) (jeweils einschließlich direkter THG-Emissionen aus Brennstoffen und eingesparten Prozessemissionen, sowie indirekten THG-Emissionen aus Stromeinsparungen). Verglichen mit der noch benötigten Minderung von 170 Mt CO_2-eq. zum Erreichen des 40 %-Reduktionsziels bis

2 Es wird angenommen, dass die mittleren CO_2 Emissionen entsprechend der Szenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung der Stromerzeugung abnehmen: 2007: 644 gCO_2/kWh, 2020: 605 gCO_2/kWh, 2035: 392 gCO_2/kWh.

2020, ist dies ein Anteil von 13 %, der größtenteils durch wirtschaftliche Maßnahmen realisierbar ist. Hinzu kommen weitere Einsparpotenziale in der Industrie aus effizienten Querschnittstechnologien, Brennstoffwechsel, dem Einsatz von Sekundärstoffen etc.

Betrachtet man die Einsparpotenziale getrennt für die in dieser Studie untersuchten sieben energieintensiven Industriebranchen, so zeigen sich deutliche Unterschiede (Tabelle 0-1). Bei den Stromeinsparungen weisen die Grundstoffchemie, die Metallerzeugung und das Papiergewerbe die höchsten absoluten Potenziale auf. Bei den Brennstoffen zeigt sich ein deutlicher Schwerpunkt bei der Metallerzeugung und der Grundstoffchemie. Diese Unterschiede sind zum einen auf die absolute Höhe des Energieverbrauchs des jeweiligen Prozesses und zum anderen auf das bestehende relative Einsparpotenzial zurückzuführen. Bei einigen Branchen sind auch die Unterschiede zwischen Strom- und Brennstoff-Einsparpotenzialen sehr groß, was auf die jeweilige Energieverbrauchsstruktur zurückzuführen ist.

Tabelle 0-1: Strom-, Brennstoff- und THG-Einsparpotenziale nach Sektoren bis zum Jahr 2035 (berechnet als Differenz zum Frozen-Efficiency-Szenario)

	Marktpotenzial			Wirtschaftliches Potenzial			Technische Potenzial		
	Strom [PJ]	Brennstoffe [PJ]	THG-Emissionen [$MtCO_2$-eq.]	Strom [PJ]	Brennstoffe [PJ]	THG-Emissionen [$MtCO_2$-eq.]	Strom [PJ]	Brennstoffe [PJ]	THG-Emissionen [$MtCO_2$-eq.]
Grundstoffchemie	11,5	48,7	12,0	12,8	56,0	15,6	12,8	56,1	15,6
Metallerzeugung	5,8	20,2	2,6	12,5	57,8	7,0	12,6	61,0	7,3
Nicht-Eisen-Metalle	2,7	6,0	0,7	4,7	11,3	1,3	6,5	11,8	1,5
Papiergewerbe	2,9	14,3	1,0	9,2	25,0	2,2	11,6	36,4	3,0
Steine-Erden	0,4	5,4	1,7	1,0	22,8	6,6	1,4	22,8	6,7
Glas und Keramik	0,3	9,0	0,6	0,6	15,7	1,0	0,6	15,7	1,0
Ernährungsgewerbe	1,5	5,2	0,5	3,3	8,5	0,9	3,3	9,7	1,0
Summe	**25**	**109**	**19**	**44**	**197**	**35**	**49**	**214**	**36**

Anmerkung: die angegebenen Einsparungen an THG-Emissionen beinhalten auch Einsparungen an prozessbedingten Emissionen sowie indirekte CO_2-Emissionen aus Stromsparpotenzialen.

Insgesamt zeigt sich, dass über alle Branchen hinweg erhebliche Einsparpotenziale bei den energieintensiven Prozessen vorhanden sind. Diese ergeben sich sowohl aus einer relativ kurzfristig möglichen Optimierung der Prozesse und Möglichkeiten der Abwärmenutzung, als auch aus dem Einsatz neuer Technologien und Verfahren, die eher langfristig wirken. Die jährlichen Effizienzgewinne, die sich aus den berechneten absoluten Potenzialen ergeben, sind deutlich niedriger als die hohen Effizienzgewinne, die bei einigen Prozessen in den letzten 50 Jahren realisiert wurden, jedoch noch immer bedeutend. Eine dynamische Effizienzverbesserung wird meistens in Zeiten starken Produktionswachstums beobachtet, wenn viele neue Anlagen errichtet werden und dadurch die mittlere Effizienz im Anlagenbestand ansteigt. In Zukunft wird in Deutschland jedoch für die meisten energieintensiven Produkte eher mit einer Stagnation der Produktion gerechnet. Entsprechend werden nur wenige neue Produktionskapazitäten

im Zuge von Re-Investitionen aufgebaut. Effizienzverbesserungen beruhen so vorwiegend auf Modernisierungen bestehender Anlagen. Trotzdem sind auch bei den energieintensiven Prozessen noch bedeutende Einsparpotenziale vorhanden, deren Erschließung wirtschaftlich wäre und sinnvoll erscheint, um langfristige THG-Minderungsziele zu möglichst niedrigen Kosten zu erreichen. Zudem wird der Druck aufgrund steigender internationaler Energiepreise noch weiter zunehmen und Prozesse, welche keine Effizienzverbesserungen durchführen, deutlich belasten.

Abbildung 0-3: Technisches Einsparpotenzial nach Technologiegruppen aller modellierten Prozesse und Einsparoptionen

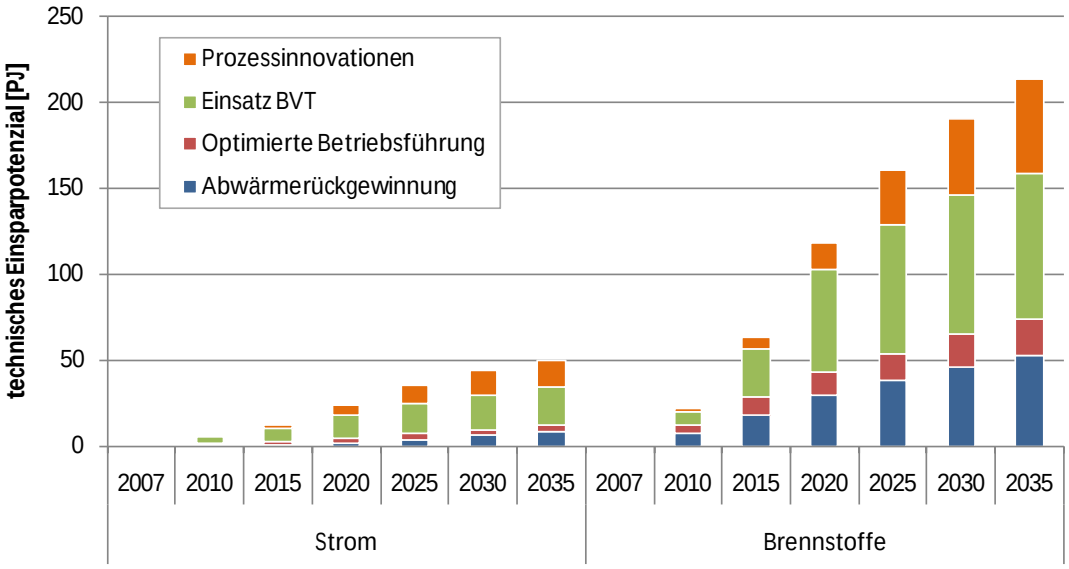


Abbildung 0-3 zeigt das technische Einsparpotenzial nach Technologiegruppen:

- Relativ kurzfristig umsetzbare Potenziale wurden in der ***Optimierung des Anlagenbetriebs*** identifiziert. Obwohl energieintensive Unternehmen tendenziell bereits höhere Anstrengungen leisten, um die Anlagen auch energetisch optimal zu betreiben (diese Aussage gilt nicht gleichermaßen für industrielle Querschnittstechnologien in diesen Branchen), sind hier in einigen Prozessen noch erhebliche Potenziale vorhanden. Diese Gruppe der Einsparpotenziale umfasst Energiemanagementsysteme, optimierte Betriebsführung und verminderte Leerlaufverluste z. B. durch eine bessere Auslastung von Öfen und Anlagen. Das gesamte Einsparpotenzial liegt bei rund 3,5 PJ/a für Strom und 21 PJ/a für Brennstoffe bis zum Jahr 2035.
- Die Nutzung von ***Abwärme*** birgt in den meisten Branchen noch hohe Potenziale, die häufig relativ kurzfristig erschlossen werden können und eine akzeptable Wirtschaftlichkeit aufweisen, insbesondere bei steigenden Energie- und Emissionszertifikatspreisen. Das gesamte Einsparpotenzial in diesem Bereich liegt für Strom bei 8 PJ/a und für Brennstoffe bei 52 PJ/a bis zum Jahr 2035.

- Mittel- bis langfristig können weitere Potenziale wirtschaftlich bei Re-Investitionen erschlossen werden, die aus dem ***Einsatz bester verfügbarer Technologien (BVT)*** resultieren. Das gesamte Potenzial bis 2035 liegt hier bei 22 PJ/a für Strom und 85 PJ/a für Brennstoffe. Hierfür wurde im Modell angenommen, dass kein vorzeitiger Austausch von Anlagen stattfindet und damit die Diffusion der Technologien und Verfahren an die derzeitige Umwälzung des Anlagenbestandes gebunden ist. Hierdurch ergeben sich relativ niedrige Kosten für die Effizienzverbesserungen, da nicht die Vollkosten einer Effizienztechnologie bewertet werden, sondern die Differenzkosten zur konventionellen Technologie. Aufgrund der teilweise sehr langen Lebensdauer der industriellen Anlagen von 30 bis 50 Jahren ergibt sich allerdings auch eine relativ langsame Diffusion dieser Techniken. Viele können jedoch auch bei grundlegenderen Revisionen an bestehenden Anlagen ausgetauscht werden, die häufig in einem Zeitraum von 10 bis 20 Jahren stattfinden. Viele der modellierten Effizienztechnologien weisen schon heute relativ hohe Marktanteile auf, trotzdem ist davon auszugehen, dass es noch weitere 10 bis 20 Jahre dauern wird, bis sie ihre volle Verbreitung erreicht haben werden.
- Langfristig sind auch ***Prozessinnovationen*** über derzeit verfügbare Technologien hinaus von großer Bedeutung für die Verbesserung der Energieeffizienz. Obwohl diese sich noch am Markt behaupten müssen, liegt ihr Einsparpotenzial bis 2035 bei rund 15 PJ/a für Strom und 55 PJ/a für Brennstoffe. Hierunter fallen neue Trocknungsverfahren in der Papierherstellung, die Nutzung und Herstellung neuer Zementsorten, das endabmessungsnahe Gießen im Stahlwalzwerk, die Nutzung von Supraleitung für die Erwärmung von Aluminiumblöcken zur Weiterverarbeitung, dauerhafte Kathoden bei der Primäraluminiumelektrolyse, oder der Einsatz der Sauerstoffverzehrkathode bei der Chlorherstellung.

Darüber hinaus sind für den sehr langen Zeitraum auch vollständige Prozesssubstitutionen denkbar (ein herausragendes Beispiel ist der Celitement-Prozess bei der Zementherstellung, siehe www.celitement.de). Diese wurden jedoch nicht modelliert, da sie ein grundlegend neues Verständnis der derzeit angewendeten Prozesse verlangen oder auch Fragen zur Produktqualität offen lassen. Gleichzeitig blicken einige der industriellen Prozesse auf eine über 100jährige mehr oder weniger kontinuierliche Entwicklungsphase zurück, was nahelegt, dass solche radikalen Prozessumstellungen in der Vergangenheit eher selten erfolgt sind. Allerdings wächst der Druck in Zukunft, solche radikalen Prozessinnovationen verstärkt zu verfolgen.

Unter den rund 200 betrachteten Einsparoptionen in den sieben analysierten Industriesektoren lassen sich die wirkungsvollsten Optionen identifizieren. So entfallen bei den Brennstoffen rund 72 % der Einsparungen auf die 30 bedeutendsten Maßnahmen. Die größten Einsparpotenziale sind in der Papierherstellung vorhanden, durch innovative Trocknungsverfahren als auch eine Optimierung der Wärmenutzung in den Papierfabriken. Drei weitere Optionen mit hohen Potenzialen entfallen auf die Metallerzeugung.

Auch in der Grundstoffchemie gibt es einige Optionen mit hohen Potenzialen, insbesondere durch neue Anlagen für energieintensive Produkte mit Ammoniak oder Ethylen.

Beim Stromverbrauch sind die wichtigsten 30 Einsparoptionen sogar für 88 % der gesamten berechneten Einsparungen verantwortlich. Große Potenziale liegen hier in der Stahlindustrie bei der Abwärmenutzung für die Herstellung von Elektrostahl und die Umstellung auf endabmessungsnahes Gießen. Langfristig könnten durch die Nutzung von Sauerstoffverzehrkathoden bei der Chlorherstellung oder den Einsatz von Dauerhaltbaren Kathoden für die Herstellung von Primäraluminium deutliche Einsparungen erreicht werden, wenn die Markteinführung dieser Technologien gelingt.

Mit Blick auf die Interpretation der berechneten Einsparpotenziale sei hier allerdings nochmals auf die oben genannten Einschränkungen hinsichtlich der betrachteten Prozesse und Technologien hingewiesen. Eine Erweiterung der Systemgrenzen (z. B. Verschiebung zu Sekundärprozessen (z.B. mehr Recycling, mehr Materialeffizienz), Einsparungen bei Querschnittstechnologien) würde dazu führen, dass die vorhandenen Einsparpotenziale noch substantiell steigen.

Hemmnisse und fördernde Faktoren für Energieeffizienz

In der betrieblichen Praxis wird das ausgewiesene wirtschaftliche Potenzial oft nicht ausgeschöpft. Dieses Phänomen wird als Energieeffizienzlücke bezeichnet und auf Hemmnisse zurückgeführt. Diese Effizienzlücke spiegelt sich im No-Regret-Potenzial wider. Neben Hemmnissen spielen auch fördernde Faktoren eine Rolle, die die Umsetzung von Effizienztechnologien erleichtern und beschleunigen können. Um die Relevanz von Hemmnissen und fördernden Faktoren in der energieintensiven Industrie zu thematisieren, wurden strukturierte Gespräche mit Herstellern, Technologielieferanten und -experten durchgeführt. Der Fokus der Gespräche lag dabei auf typischen Einflussfaktoren wie Informationsmangel und Transaktionskosten, Investor-Nutzer-Dilemmata und begrenzter Rationalität, Kapitalverfügbarkeit, Risiken und Unsicherheiten sowie fördernden Faktoren. Ergänzend wurden in der Technologieanalyse weitere relevante Informationen gesammelt.

Als relevante Faktoren können unter anderem folgende Hemmnisse und fördernde Faktoren genannt werden:

- Informations- und Transaktionskosten: Im Allgemeinen können kleine und mittlere Unternehmen (KMU) nicht auf interne Spezialisten zurückgreifen, um eigene Energieeffizienzpotenziale zu identifizieren und zu erschließen. Im Gegensatz dazu verfügen größere Unternehmen oft über spezialisierte Mitarbeiter, die sich mit Fragestellungen der Energieeffizienz auseinandersetzen. Allerdings können komplexe

Entscheidungsprozesse in größeren Unternehmen und verteilte Verantwortlichkeiten die Umsetzung von Maßnahmen verzögern.

- Investor-Nutzer-Dilemmata und begrenzte Rationalität: Als Hemmnisse dieser Kategorie werden oft separate Budgets für Investitionen und Betrieb diskutiert, sowie ein Fokus auf Amortisationszeiten, betriebliche Routinen oder eine Konzentration der Unternehmen auf ihre Kernprozesse. Diese erschweren die Umsetzung ansonsten wirtschaftlicher Maßnahmen.
- Kapitalverfügbarkeit: In größeren Unternehmen wird die Kapitalverfügbarkeit für Effizienzmaßnahmen tendenziell durch einen Wettbewerb unterschiedlicher Projekte bei begrenzten Budgets beeinflusst. KMU stehen demgegenüber oftmals vor dem Problem, ausreichende Kapitallinien zu erlangen, um Effizienzmaßnahmen finanzieren zu können.
- Risiko und Unsicherheiten: Ein wichtiger Einflussfaktor auf den Einsatz von Effizienztechnologien ist das Risiko unbeabsichtigter Änderungen von Produktqualität oder Prozessstabilität, insbesondere wenn betriebskritische Prozesse betroffen sind. Daneben wurden instabile Entwicklungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen als Hemmnisse genannt.
- Fördernde Faktoren: Sowohl das betriebliche Image und die Umsetzung eines Umwelt- oder Energiemanagementsystems sind wichtig für die Durchführung von Effizienzmaßnahmen. Weiterhin ist die Erreichung lateraler Ziele durch Effizienzmaßnahmen, beispielsweise durch eine damit einhergehende Verbesserung der Produktivität, als fördernder Faktor zu nennen.

Implikationen für politische Instrumente

Um derzeit bestehende Hemmnisse zu überwinden, werden bereits unterschiedliche politische Instrumente eingesetzt, die einen direkten Bezug zu industriellen Prozesstechnologien besitzen. Die wichtigsten dieser derzeit in Kraft befindlichen Instrumente sind:

- die Vereinbarung zwischen der deutschen Wirtschaft und der Bundesregierung zur Klimavorsorge vom 9. November 2000,
- das europäische System für den Handel mit Emissionszertifikaten (ETS) nach EU Richtlinie 2003/87/EG,
- sowie die Öko-Steuer mit Steuervergünstigungen wie dem Spitzenausgleich für Industriebetriebe.

Die übrigen derzeit für den Industriesektor existierenden energie- und klimapolitischen Instrumente betreffen überwiegend industrielle Querschnittstechnologien und richten sich vor allem an KMU. Zu nennen sind insbesondere die Initiative Energieeffizienz der Deutschen Energie-Agentur (dena) sowie der Sonderfonds Energieeffizienz und weitere finanzielle Förderprogramme der KfW. Hinzu kommen die seit 2010 sukzessiv in

Kraft tretenden Mindesteffizienzstandards für energierelevante Produkte im Rahmen der Öko-Design-Richtlinie der EU, die teilweise auch die Industrie betreffen, allerdings wiederum eher industrielle Querschnittstechnologien.

Trotz dieser politischen Instrumente und Maßnahmen sind in den betrachten Industriebranchen auch weiterhin wirtschaftliche Energieeinsparpotenziale vorhanden, deren Umsetzung durch bestehende Hemmnisse verhindert wird. Vor diesem Hintergrund lassen sich einige Empfehlungen für weitere Instrumente und Maßnahmen ableiten, die sich speziell an die energieintensive Industrie richten. Diese müssen nicht immer von politischer Seite initiiert werden, sondern können auch von der Wirtschaft selbst initiiert werden, repräsentiert durch ihre Dachverbände wie BDI oder DIHK und die Wirtschaftsverbände der betroffenen Industriezweige. Diese Organisationen haben sowohl die Kompetenz als auch das Vertrauen untereinander, der Staat hat hier häufig nur eine anstiftende, motivierende und unterstützende Rolle.

Folgende Aktivitäten und Maßnahmen der Politik und der betroffenen Wirtschaftsverbände könnten geeignet sein, die in dieser Untersuchung ermittelten Potenziale zu erschließen:

- Energiemanagement-Systeme: Das Energiemanagement genießt in der Betriebsorganisation in Unternehmen bisher nur geringe Aufmerksamkeit. In den hier vor allem betrachteten großen Unternehmen energieintensiver Branchen mit hohen Energiekostenanteilen ist das Energiemanagement zwar schon stärker verbreitet, u. a. weil für große Unternehmen bereits heute die Möglichkeit besteht, durch die Einführung eines Energiemanagement-Systems von der Zahlung der EEG-Umlage ausgenommen zu werden. Aber auch hier könnte die Nutzung solcher Systeme noch verstärkt und damit ein Beitrag zur stärkeren Ausschöpfung der bestehenden wirtschaftlichen Einsparpotenziale geleistet werden. Im Energiekonzept der Bundesregierung ist vorgesehen, ab 2013 den Spitzenausgleich im Rahmen der Energie- und Stromsteuer nur noch zu gewähren, wenn die Betriebe einen Beitrag zu Energieeinsparungen leisten. Der Nachweis der Einsparung kann durch die zertifizierte Protokollierung in Energiemanagementsystemen oder durch andere gleichwertige Maßnahmen erfolgen.
- Standards und Normen: Die unter der EU Ökodesign-Richtlinie bereits erlassenen oder geplanten Mindesteffizienzstandards beziehen sich ausschließlich auf industrielle Querschnittstechnologien. Im Hinblick auf industrielle Prozesse könnte die Ausarbeitung von Standards und Normen auf freiwilliger Basis durch die relevanten Industrieverbände verstärkt eingesetzt werden, um den Vergleich und die Abgrenzung von Maßnahmen zu erleichtern. Bisher existieren solche Ansätze bereits im Bereich einiger Querschnittstechnologien (z. B. Kälteanlagen).
- Finanzielle Anreize: Generell könnte die Einführung von ausgewählten Technologien durch finanzielle Anreize für Effizienz-Investitionen beschleunigt werden (z. B.

Steuervergünstigungen bei Investitionen für Abwärmenutzung von Dritten, Bürgschaften oder die Einführung eines Versicherungsproduktes zur Risikobegrenzung von Contracting-Projekten). Anlässlich der Gewährung derartiger finanzieller Anreize könnte die Darlegung der Rentabilität und Lebenszykluskosten des geplanten Projektes (nicht nur des Risikos) eine Förderanforderung sein. Der Energieeffizienz-Fonds, der in Deutschland laut Energiekonzept 2011 eingerichtet werden soll, könnte den organisatorischen Rahmen für solche Aktivitäten bieten.

- Informationskampagnen und ähnliche Initiativen: Alle bisher genannten Maßnahmen müssen durch geeignete informative Maßnahmen begleitet werden, um ihre Wirksamkeit vollständig zu entfalten. Solche Maßnahmen sollten überwiegend von den Industrieverbänden selbst organisiert werden, da diese die Anforderungen der Unternehmen besser kennen als öffentliche Institutionen.
- Unterstützung von Forschung und Entwicklung: Langfristig liegen die größten Einsparpotenziale bei radikalen Prozessinnovationen und neuen Produkten. Eine Intensivierung der entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen ist der erste notwendige Schritt zu einer Ausschöpfung dieser Potenziale. Er beinhaltet auch eine Förderung der Markteinführung innovativer Verfahren.

Darüber hinaus können auch weitere, an spezielle Industriebranchen gerichtete Programme dazu beitragen, weitere vorhandene Einsparpotenziale stärker als bisher ausschöpfen und damit zu einer Erreichung des nationalen Treibhausgas-Minderungszieles beitragen.

TEIL I Einleitung, Methodik und branchenüber-greifende Ergebnisse

1 Hintergrund und Vorgehensweise

B. Schlomann, T. Fleiter, S. Hirzel, W. Eichhammer (Fraunhofer ISI)

1.1 Ausgangslage

Ziel der Bundesregierung ist es, die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2020 um 40 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren. Dieses Ziel wurde in dem Ende September 2010 vorgelegten Energiekonzept[3] bekräftigt. Zwischen 1990 und 2008 wurde ein Rückgang der gesamten Treibhausgasemissionen (THG)[4] um 22,2 % – von 1.232 auf 959 Mio. Tonnen (Mt) CO_2-eq. – erreicht (UBA 2010). Damit hat Deutschland seine Klimaschutzverpflichtung nach dem Kyoto-Protokoll, die THG-Emissionen im Zeitraum 2008-2012 um 21 % unter das Niveau von 1990 zu senken, erfüllt. Um auch das nationale Ziel bis 2020 zu erreichen, ist jedoch noch eine weitere Reduktion um knapp 18 Prozentpunkte erforderlich. Dazu müssen in allen Sektoren die vorhandenen Energie- und THG-Einsparpotenziale möglichst weitgehend erschlossen werden.

Dies gilt auch für den Sektor Industrie. Im Jahr 2008 lag der Endenergieverbrauch der Industrie (hier definiert in der Abgrenzung der Energiebilanz als Übriger Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe) bei 2.529 PJ (darunter: Strom 837 PJ, Brennstoffe inkl. Fernwärme 1.691 PJ). Dies entspricht einem Anteil von 28 % am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland (AGEB 2010). Daraus errechnen sich energiebedingte CO_2-Emissionen von rund 255 Mt[5]. Hinzu kommen weitere 81 Mt nicht-energiebedingte Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen (UBA 2010). Die Entwicklung des industriellen Strom- und Brennstoffverbrauchs sowie der energiebedingten CO_2-Emissionen seit 1990 zeigt Abbildung 1-1.

Der Energiebedarf der Industrie ist auf eine Vielzahl an unterschiedlichen Techniken und Prozessen zurück zu führen. Hierbei lassen sich zwei Gruppen unterschieden: Querschnittstechniken und Prozesstechniken. Erstere werden branchenübergreifend zur Bereitstellung von Wärme bzw. mechanischer Energie und Licht eingesetzt. Letztere sind prozesspezifisch und weisen vor allem in der energieintensiven Industrie einen

---

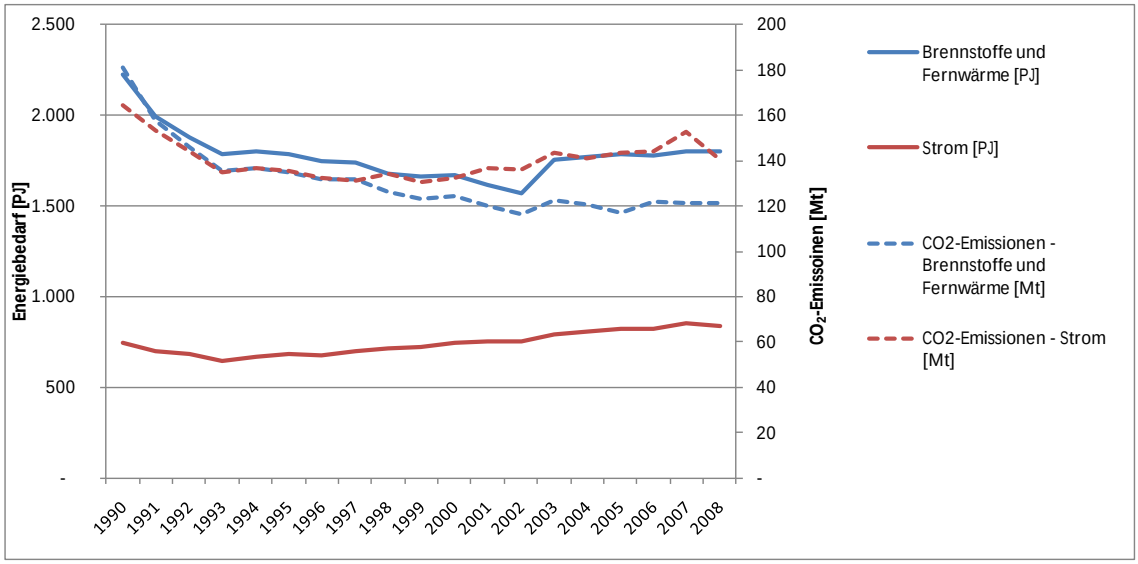
3 Bundesminsterium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin, 28. September 2010.

4 Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O), HFCs, PFCs, SF_6

5 CO_2-Emissionen aus Brennstoffen, Strom und Fernwärme, bewertet mit Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes (UBA 2009). Darunter: direkte Emissionen (hier aus Brennstoffen und Fernwärme) 115 kt; indirekte Emissionen (nur Strom): 140 kt.

sehr hohen Anteil am Energieverbrauch auf. Beispiele für Prozesstechnologien sind der Hochofen in der Stahlindustrie, der Drehrohrofen beim Klinkerbrennen in der Zementindustrie oder der Refiner zur Herstellung von Holzstoff für die Papierproduktion.

Abbildung 1-1: Entwicklung von Endenergieverbrauch und energiebedingten CO_2-Emissionen im Sektor Industrie, 1990-2008



Quelle: AGEB 2010; UBA 2009

Aus diversen nationalen und internationalen Studien geht hervor, dass auch im Industriesektor noch erhebliche und in der Regel kosteneffiziente Energieeinspar- und THG-Minderungspotenziale vorhanden sind, zum einen durch den Einsatz neuer und effizienterer Verfahren und Techniken und zum anderen über die Substitution sowohl von Verfahren als auch von Produkten und Materialien.[6] Diese Studien sind aber teilweise schon einige Jahre alt und befassen sich darüber hinaus schwerpunktmäßig mit industriellen Querschnittstechnologien. Demgegenüber sind derzeit kaum belastbare und aktuelle Daten zu Energieeffizienzpotenzialen bei Prozesstechnologien in energieintensiven Industriebranchen vorhanden. Auch das Wissen um die Verfügbarkeit und Verbreitung von relevanten Effizienztechnologien ist veraltet und als Folge existieren kaum Ansätze für Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz in diesem Bereich. Die letzten umfangreichen Studien zur energieintensiven Industrie wurden Mitte bis Ende der 1990er Jahre im Rahmen des IKARUS-Projekts des BMBF durchgeführt.

6 Wie u. a. Fraunhofer ISI/FZ Jülich 2001; Fraunhofer ISI/FfE 2003; Wuppertal Institut 2006; Prognos 2007; Greenpeace/EUtech 2007; McKinsey 2008, 2009; Öko-Institut/DIW/FZ Jülich/Fraunhofer ISI 2009; Fraunhofer ISI/Enerdata/ISIS/TU Wien/Wuppertal Institut 2009; IEA 2007, 2009; Öko-Institut et al. 2009; Prognos/Öko-Institut 2009; FfE 2009.

Danach lag der Forschungsschwerpunkt überwiegend auf Querschnittstechnologien und den weniger energieintensiven Industriebranchen.

1.2 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund ist es Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens, Energie- und THG-Einsparpotenziale in den energieintensiven Prozessen der Industrie zu ermitteln und basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen politische Maßnahmen zur Realisierung der Potenziale vorzuschlagen. So soll die Studie einen Überblick geben, wie weit und mit welchem Effizienzmaßnahmen die Erhöhung der Energieeffizienz bei industriellen Prozessen zu Energie- und THG-Einsparungen führen und damit zum Erreichen des 40 % THG-Minderungsziels bis 2020 beitragen kann. Neben den energiebedingten direkten CO_2-Emissionen werden dabei sowohl energiebedingte indirekte CO_2-Emissionen (aus Stromverbrauch resultierend) als auch direkte nicht-energiebedingte THG-Emissionen aus Industrieprozessen (z. B. N_2O) berücksichtigt. Außerdem sollen auch die mittel- und längerfristigen Energie- und THG-Reduktionsmöglichkeiten bei energieintensiven Prozessen (Zeithorizont: 2035) dargelegt werden.

1.3 Abgrenzung des Analyserahmens

1.3.1 Abgrenzung der betrachteten Einsparoptionen

Bei der qualitativen Analyse der Einsparoptionen werden sowohl der Einsatz effizienterer Techniken und Verfahren, die Substitution durch alternative Verfahren, den Einsatz erneuerbarer Energien, als auch die Möglichkeiten der Substitution der Produkte oder Materialien, z. B. durch Recycling betrachtet.

Der Schwerpunkt der quantitativen Modellierung von Einsparpotenzialen liegt allerdings auf dem Einsatz (neuer) effizienter Techniken zur Verbesserung der bestehenden Verfahren. Diese umfassen die Nutzung von Abwärme, den Einsatz effizienterer Öfen und generell alle Effizienzsteigerungen, die keine radikale Veränderung des Produktionsverfahrens nach sich ziehen.

Die engen Systemgrenzen der Studie sind bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Eine Erweiterung der Systemgrenzen führt typischerweise zu höheren Einsparpotenzialen. Folgende Möglichkeiten der Effizienzsteigerung werden – mit wenigen Ausnahmen – nicht in die quantitative Modellierung aufgenommen und verbleiben somit außerhalb der Systemgrenzen.

- Die Prozesssubstitution hin zu Sekundärrohstoffen (z. B. Elektrostahl anstatt Sauerstoffstahl oder Altpapierstoff anstatt Zellstoff) wurde mit wenigen Ausnahmen nicht als Einsparpotenzial quantifiziert, sondern ist in gleichem Maße in Form der Produktionsentwicklung in alle betrachteten Szenarien eingeflossen.
- Ähnlich wie die Substitution von Prozessen ist auch der Einsatz von Füllstoffen nicht als Einsparpotenzial quantifiziert (z. B. in der Papierindustrie oder der Zementproduktion).
- Auch Verbesserungen im Bereich der Material- und Ressourceneffizienz sind nicht quantifiziert. Hierzu zählt auch die Substitution von Produkten oder Materialien. Im Rahmen dieser Studie kann nur begrenzt und qualitativ auf die Möglichkeiten der Ressourceneffizienz eingegangen werden, die sehr vielseitig und weitreichend sind.
- Der Einsatz erneuerbarer Energien spielt in der Industrie derzeit noch eine untergeordnete Rolle. Während der Einsatz von Sekundärbrennstoffen wie Müll und Biomasse bei einigen Prozessen wie z. B. beim Klinkerbrennen bereits weit verbreitet ist, gibt es gerade bei schwieriger zu behandelnden Produktionsabfällen noch weitere Potenziale für die energetische Verwertung, die jedoch in dieser Studie mangels Datenverfügbarkeit nur qualitativ diskutiert werden.
- Neue Technologien, die heute noch nicht bekannt sind, bis zum Jahr 2035 aber durchaus noch eine deutliche Wirkung auf den Energiebedarf haben könnten, können nicht berücksichtigt werden. Weiterhin wurden radikale Prozessinnovationen, die eine völlig neue Auffassung des grundlegenden Verständnisses der Prozesse voraussetzen, nur modelliert, wenn sie sich bereits im Demonstrationsstadium befinden (z. B. neue Zementverfahren)
- Bei den betrachteten Einsparoptionen werden insbesondere Maßnahmen betrachtet, bei denen über den Betrachtungshorizont hinweg nach derzeitigem Stand der Kenntnis die Wirtschaftlichkeit prinzipiell in Aussicht steht. Maßnahmen, die auch bei hohen Energiepreisen wirtschaftlich abwegig sind, wurden nicht betrachtet.
- Technologien zur industriellen Abscheidung und Einlagerung von Treibhausgasen (CCS) werden nicht erfasst.
- Mögliche Effizienzsteigerungen bei Querschnittstechnologien (z. B. effiziente Motoren) liegen außerhalb des Betrachtungsrahmens.

1.3.2 Abgrenzung der Prozesstechnologien von Querschnittstechnologien

Die Unterscheidung von Prozesstechnologien und Querschnittstechnologien stellt in dieser Studie einen zentralen methodischen Baustein – aber auch eine große Herausforderung – dar; sie hilft, die Vielfalt der technologischen Anwendungen zu strukturieren.

Auf den ersten Blick scheint die Unterscheidung in diese beiden Technologiefelder recht eindeutig. Prozesstechnologien beschreiben Technologien, die sehr spezifisch für einen bestimmten Sektor, ein Produkt oder ein Produktionsverfahren sind. Beispiele sind Hochöfen, Primäraluminium-Elektrolyseverfahren, Klinker-Drehrohröfen oder auch Papiermaschinen. All diese Technologien werden in dieser Form nicht in anderen Sektoren eingesetzt.

Die Kategorie der Querschnittstechnologien hingegen enthält ausschließlich Techniken, die über die Grenzen verschiedener Branchen und Verfahren eingesetzt werden. Beispiele sind Druckluftsysteme, Beleuchtung, Elektromotoren, Ventilatoren oder Pumpen. Diese Technologien sind in den meisten Fällen standardisierte Massenprodukte, die erst über ihre große Anzahl einen relevanten Energie- bzw. Stromverbrauch aufweisen.

Im Einzelfall kann die Zuordnung jedoch schwieriger sein. So werden Elektromotoren in großer Zahl auch als Antriebe in Papiermaschinen eingesetzt oder auch Pumpen und Ventilatoren in diversen Anlagen der Nahrungsmittelindustrie oder der chemischen Industrie. Ähnliches gilt auch für die meisten anderen Prozesstechnologien. Somit kann man den Energieverbrauch einer Branche nicht trennscharf zwischen beiden Technik-Gruppen aufteilen, vielmehr gibt es Überschneidungen unterschiedlichen Ausmaßes, je nach Branche und Prozessdifferenzierung. Wie sehr bei dem für die Prozesse angegebenen Energieverbrauch auch Querschnittstechniken beinhaltet sind, hängt im Einzelfall auch von den gewählten Systemgrenzen ab. Sind die Systemgrenzen mit den Grenzen eines Betriebes gleichzusetzen, d. h. der Stromverbrauch wird anhand der Stromrechnung des Betriebs angesetzt, so beinhaltet diese auch eindeutig identifizierbare Querschnittstechniken, wie Druckluftversorgung, Beleuchtung oder Gebäudeheizung. Wird hingegen nur ein Prozessschritt, wie die Papiermaschine ausgewählt, so werden nur diejenigen Querschnittstechniken berücksichtigt, die in die Maschine integriert sind. Dies wurde je nach Datenlage für die einzelnen Prozesse definiert.

So werden, obwohl in dieser Studie nur Prozesstechniken betrachtet werden sollen, bei der Bilanzierung des Energieverbrauchs unvermeidbar auch in die Maschinen oder Anlagen eingebaute Querschnittstechniken berücksichtigt. Anders sieht es auf Ebene der Energieeinsparoptionen aus. Hier werden keine Optionen berücksichtigt, die sich nur auf die einzelne Querschnittstechnik beziehen, ohne dabei das sie umgebende System zu berücksichtigen. Beispiele sind der Einsatz effizienterer Motoren, Pumpen oder Ventilatoren. Ergeben sich die Einsparungen jedoch aus einer Optimierung des jeweiligen Prozesses, z. B. durch den Einsatz von drehzahlgesteuerten Motoren in einer Anlage oder Maschine, die eine Minimierung der Leerlaufzeiten bei einem Pro-

zessschritt erlauben, so wird diese Einsparoption auch in dieser Studie berücksichtigt, da sie mehr aus den Eigenarten der Prozessführung hervorgeht.

Die Abgrenzung industrieller Prozesstechniken gegenüber Querschnittstechniken impliziert nicht nur eine andere Technologiewahl, sondern auch eine andere Perspektive. Bei Prozesstechniken ist bekannt, welches Produkt am Ende des Prozesses steht und welche Kette an Zwischenschritten durchlaufen wird. Querschnittstechniken hingegen stellen zumeist eine Hilfsenergie bereit (Wärme, Licht, Kraft etc.), unabhängig vom Produktionsprozess. Typische Querschnittstechniken wie Druckluftsysteme, Elektromotoren, Wärmeerzeuger, Beleuchtung etc. werden in dieser Studie nicht betrachtet. Aus dieser Perspektivenunterscheidung ergibt sich weiterhin, dass bei industriellen Prozesstechniken auch weitere Dimensionen von Einsparpotenzialen betrachtet werden können. Dies sind die Substitutionen von Verfahren und Produkten, welche häufig große Potenziale bergen – insbesondere bei Prozessen die schon nah am theoretischen Optimum betrieben werden.

1.3.3 Weitere Abgrenzungen und Definitionen

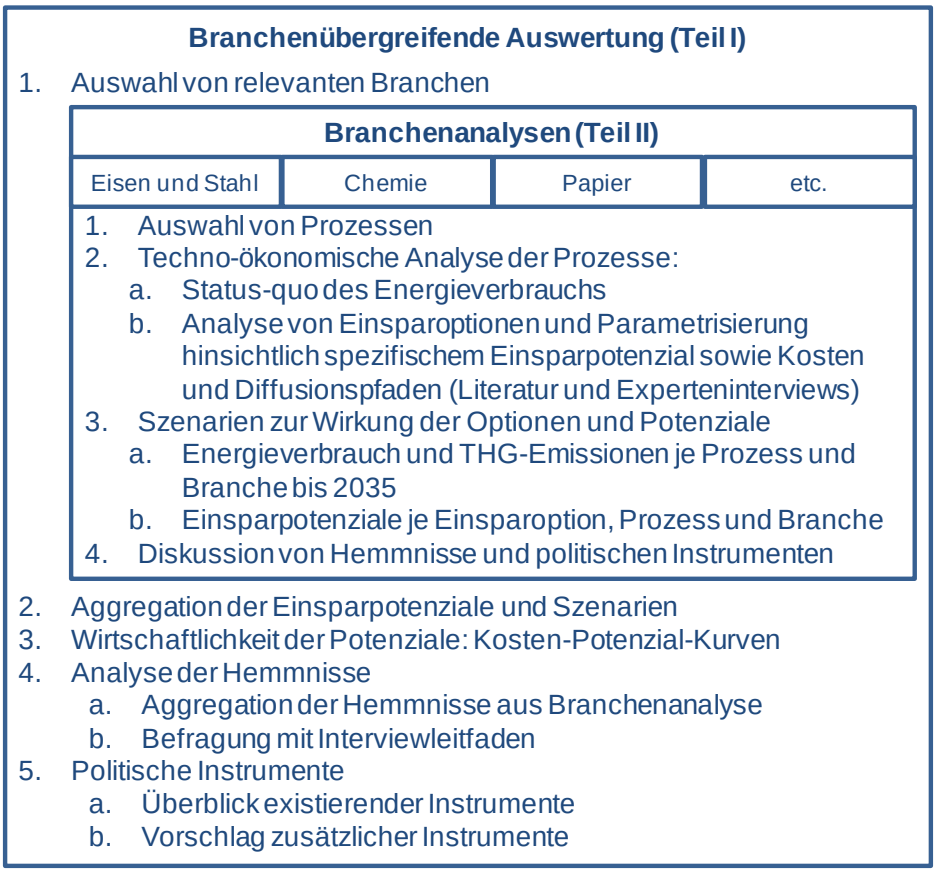
Folgende weitere Abgrenzungen liegen der Studie zugrunde.

- Der Sektor Industrie wird wie in der nationalen Energiebilanz (AGEB 2010) definiert als Verarbeitendes Gewerbe ohne Raffinerien, aber einschließlich der Gewinnung von Steine-Erden und sonstigem Bergbau. Auch die Abgrenzung des Energieverbrauchs einzelner Industriezweige erfolgt auf Basis der Energiebilanz und der dort ausgewiesenen Energieverbräuche. Eine Ausnahme stellt die Metallerzeugung dar, zu der in dieser Studie auch die Koksproduktion gerechnet wird, um die Metallerzeugung möglichst vollständig abbilden zu können. In der Energiebilanz werden die Koksöfen jedoch beim Umwandlungssektor bilanziert.
- Als Basisjahr für diese Untersuchung wird das Jahr 2007 gewählt, da dies die letzte Energiebilanz war, die zum Zeitpunkt der Untersuchung verfügbar war.
- Strom wird in dieser Studie grundsätzlich endenergetisch bewertet. Für das Basisjahr wird ergänzend eine primärenergetische Bewertung von Strom auf Basis des derzeitigen Strommix vorgenommen.
- Neben dem Energieverbrauch werden auch energiebedingte CO_2-Emissionen – differenziert nach direkten Emissionen aus Brennstoffen (wobei diesen hier auch die Emissionen aus der Fernwärme zugerechnet werden) und indirekten Emissionen aus Strom – sowie nicht-energiebedingte Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen ausgewiesen.

1.4 Methodisches Vorgehen

Die Analyse wird in mehreren sequentiellen Arbeitsschritten durchgeführt, aufgeteilt auf zwei große Blöcke: die Branchenanalyse und die branchenübergreifende Auswertung. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 1-2 dargestellt und werden nachfolgend näher beschrieben.

Abbildung 1-2: Überblick der Arbeitsschritte



Als Grundlage für die nachfolgende Analyse werden zunächst die Industriebranchen ausgewählt, die in den Analyserahmen einbezogen werden. Zentrales Kriterium hierfür ist die Energieintensität der Branche (Energiebedarf je erzeugter Wertschöpfung). Für diese Branchen werden dann in einem zweiten Schritt die zu untersuchenden Prozesse ausgewählt. Bei der Auswahl der Prozesse werden folgende Kriterien zugrunde gelegt:

- Relevanz der des Prozesses, gemessen an Energieverbrauch und/oder Treibhausgasemissionen
- Verfügbarkeit von Produktionszahlen und -statistiken
- Verfügbarkeit von Daten zum Energieverbrauch

- Möglichst klare Abgrenzung der einzelnen Prozesse voneinander
- Detailtiefe ausreichend, um auch Effekte durch z. B. Verschiebungen zwischen den Prozessen abzubilden (z. B. Altpapierstoff anstatt Holzstoff für die Papierherstellung: für diesen Fall müssen beide Prozesse abgebildet werden).

Der nächste Schritt, die techno-ökonomische Bewertung der Einsparoptionen, stellt die Voraussetzung für die Modellierung der Einsparpotenziale dar. Beide sind im folgenden Kapitel zusammen mit dem eingesetzten Modell beschrieben.

1.4.1 Modellierung von Szenarien zur Wirkung der Optionen und Potenziale

1.4.1.1 Modellierungsansatz

Zur Berechnung von Szenarien zur Ermittlung von Energieverbräuchen sowie Energie- und THG-Einsparpotenzialen wird das Energienachfragemodell FORECAST-Industry als Teil der FORECAST Energienachfrageplattform eingesetzt. Die FORECAST-Plattform wurde für die Erstellung von Szenarien zur zukünftigen Entwicklung von THG-Emissionen und Energienachfrage entwickelt. Dabei erlaubt FORECAST, unterschiedliche Rahmenbedingungen zur wirtschaftlichen Entwicklung (BIP, Bevölkerung, Energiepreise) sowie techno-ökonomische Eigenschaften von Energiewandlungstechnologien auf der Energienachfrageseite abzubilden. Methodisch basieren die Modelle der FORECAST-Plattform auf einem technologiespezifischen Bottom-up-Ansatz, welcher erlaubt, die zukünftige Entwicklung von Energieverbrauch und THG-Emissionen an die technologische Entwicklung in den Sektoren zu knüpfen. Dieser Ansatz ermöglicht zum einen, technologische Trends und ihre Auswirkungen auf die Dynamik des Energieverbrauchs zu berücksichtigen. Zum anderen erlaubt er Rückschlüsse auf die Realitätsnähe der Energieszenarien, indem jedem Szenario eine spezifische technologische Entwicklung zugrunde liegt.

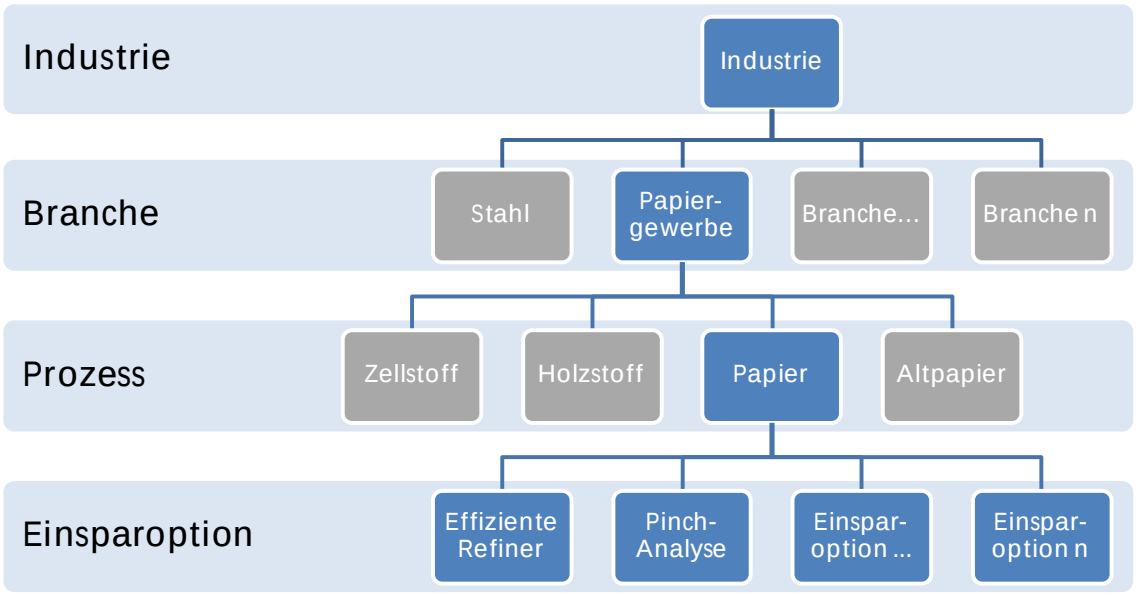
Die FORECAST-Plattform ist entsprechend der Energiebilanz auf der Ebene der Endenergie in die Sektoren Industrie, tertiärer Sektor, Haushalte und Übrige (Primärsektor, Transport und Rest) aufgeteilt. Das Industrie-Modell FORECAST-Industry ist aus einer Entwicklungslinie hervorgegangen, die auf das in den 90er Jahren entwickelte IKARUS-Modell zurück blickt. Die Modellstruktur ist stark von der hohen Heterogenität des Industriesektors geprägt. Somit werden die energieintensiven Prozesse möglichst detailliert abgebildet, und die hohe Anzahl sehr heterogener Prozesse in einer stärker aggregierten Form.

FORECAST-Industry ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt die Industrie anhand der Energiebilanzen auf einzelne Wirtschaftszweige bzw. Branchen (siehe Abbildung 1-3).

Den Branchen sind Prozesse zugeordnet, welche durch einen spezifischen Energieverbrauch und eine Aktivitätsgröße beschrieben werden. Die Definition eines Prozesses ist dabei offen gehalten. Er kann eine gesamte Kette an Verarbeitungsschritten bis zu Herstellung des fertigen Produkts enthalten, er kann aber auch einen einzelnen Verarbeitungsschritt darstellen, der besonders energieintensiv ist. Die Abgrenzung richtet sich hier je nach Prozess nach der Datenverfügbarkeit und der Energieintensität. Auf Ebene der Prozesse wird über die Tonnenproduktion je Prozess und dessen spezifischen Energieverbrauch der absolute Energiebedarf je Prozess berechnet. Die Tonnenproduktion ist direkter an den Energieverbrauch gekoppelt als die Wertschöpfung, da z. B. eine Erhöhung der Wertschöpfung nicht zwangsläufig eine für den Energieverbrauch relevante Produktionssteigerung widerspiegeln muss. Im Gegensatz zur Wertschöpfung ist die physische Produktion direkt mit dem Energieverbrauch gekoppelt. Auf der untersten Ebene sind den einzelnen Prozessen Einsparoptionen zugeordnet. Zu den Einsparoptionen sind die folgenden Charakteristika hinterlegt:

- Einsparpotenzial Strom
- Einsparpotenzial Brennstoffe
- Verbreitung Basisjahr
- Diffusionspfad „Wirtschaftliche Diffusion“
- Diffusionspfad „Technische Diffusion“
- Einmalige Differenzkosten der Investition
- Laufende Differenzkosten der Investition
- Lebensdauer.

Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Modellhierarchie am Beispiel des Papiergewerbes



1.4.1.2 Szenariodefinition

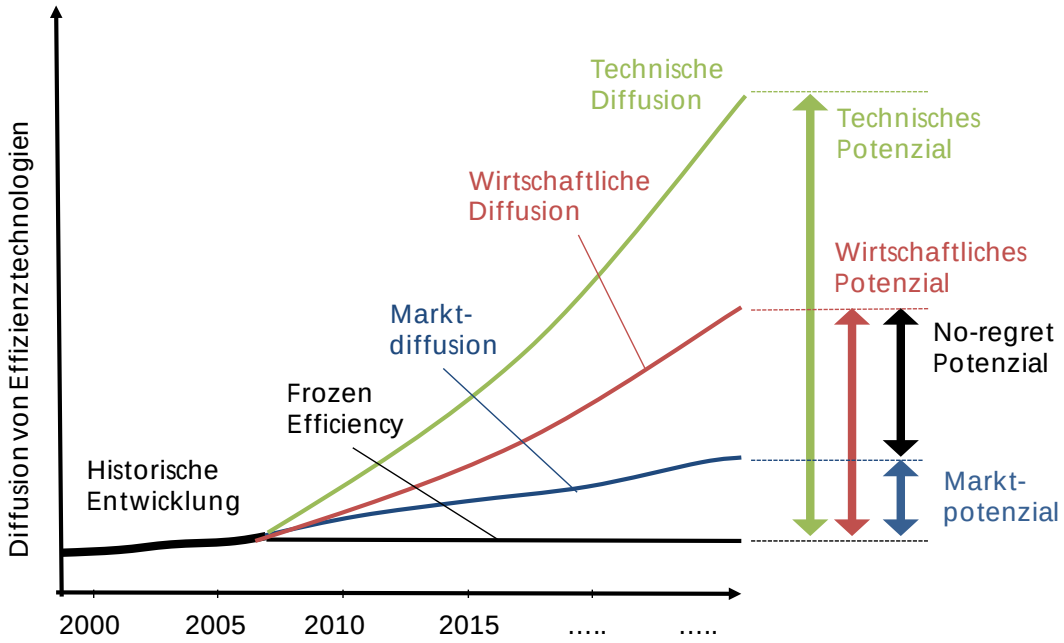
Durch die Diffusion tragen die Einsparoptionen dazu bei, dass sich der spezifische Energiebedarf des Prozesses reduziert und dadurch auch der Energiebedarf des Sektors, dem Prozess zugeordnet ist, bzw. der Industrie als Ganzes. Einsparpotenziale ergeben sich somit auf Ebene der einzelnen Einsparoptionen, als auch höher aggregiert auf Ebene der Prozesse und Branchen, indem alternative Szenarien bezüglich der Diffusion der Einsparoptionen verglichen werden.

In der Studie werden vier Szenarien berechnet, die sich bezüglich der Diffusion der Einsparoptionen unterscheiden und aus denen sich drei Potenziale ableiten lassen (Abbildung 0-1):

- Im Szenario „***Frozen Efficiency***" wird angenommen, dass kein weiterer Energieeffizienzfortschritt stattfindet und die Diffusion der Einsparoptionen auf dem Niveau des Jahres 2007 stagniert. Dieses Szenario spiegelt selbst kein Einsparpotenzial wieder, sondern bildet die ***Baseline***, auf welche die Potenziale jeweils bezogen werden.
- Das Szenario „***Marktdiffusion***" setzt voraus, dass die bestehenden Hemmnisse für die Marktdiffusion von Einsparoptionen weiterhin erhalten bleiben. Es entspricht einer „Business-as-usual"-Entwicklung auf der Ebene der Einsparoptionen. Damit wird in diesem Szenario nur ein Teil der wirtschaftlichen Einsparoptionen umgesetzt. Das diesem Szenario zugeordnete ***Marktpotenzial*** wird als Differenz des Energiebedarfs im Szenario Frozen Efficiency zum Szenario Marktdiffusion berechnet.
- Das Szenario „***Wirtschaftliche Diffusion***" geht von einem „Homo oeconomicus"-Verhalten der Akteure aus und nimmt an, dass alle wirtschaftlichen Einspartechnologien eingesetzt werden. Das zugehörige ***wirtschaftliche Potenzial*** wird wiederum als Differenz zum Frozen-Efficiency-Szenario berechnet. Für die Wirtschaftlichkeit der Investition ist dabei entscheidend, welche Kosten zu Grunde gelegt werden. Hier wird statt mit Vollkosten mit Differenzkosten gerechnet, d. h. es wird nur die Differenz zu den Kosten der herkömmlichen Technologie betrachtet. Das Differenzkostenprinzip hat auch Implikationen auf die Diffusion der Technologien, welche durch das Verbot des vorzeitigen Anlagenaustausches an die natürliche Umwälzung des Anlagenbestandes gebunden ist. Diese kann für einzelne industrielle Anlagen durchaus im Bereich mehrerer Jahrzehnte liegen. Der mögliche Zusatznutzen (Co-Benefits) aus Energieeffizienztechnologien wie Qualitäts- oder Kapazitätsverbesserungen wird nicht berücksichtigt. Dieser würde die Wirtschaftlichkeit vieler Technologien weiter verbessern, was tendenziell zur einer Überschätzung der Kosten von Effizienzmaßnahmen führt (Worrell 2003, Lung 2005).
- Das vierte Szenario wird als „***Technische Diffusion***" bezeichnet und berücksichtigt keine Wirtschaftlichkeitsüberlegungen. Es basiert jedoch auf realistischen Annahmen bezüglich der Verbreitung der jeweiligen Technologien. Ein sofortiger vorzeitiger Anlagenaustausch wird ausgeschlossen und auch hier wird davon ausgegan-

gen, dass die typische Lebensdauer der Anlagen nicht beeinflusst wird. Das diesem Szenario zugeordnete ***technische Potenzial*** wird wiederum als Differenz zum Frozen-Efficiency-Szenario berechnet.

Abbildung 1-4: Klassifizierung der in der Studie untersuchten Einsparpotenziale



Aus Politiksicht interessant ist das so genannte ***No-Regret-Potenzial***. Dieses stellt die Differenz von wirtschaftlichem Potenzial und Marktpotenzial dar. Es gibt diejenigen Einsparungen an, die ohne Änderung der Rahmenbedingungen aufgrund verschiedenster Hemmnisse nicht realisiert würden, aber trotzdem wirtschaftlich sind. Die Umsetzung des No-Regret-Potenzials bedeutet somit Kosteneinsparungen für die Unternehmen. Auch für die Klimapolitik, die nach möglichst günstigen Optionen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen sucht, ist es eine wichtige Zielgröße. Viele politische Maßnahmen zielen auf die Überwindung der Hemmnisse und damit die Realisierung des No-Regret-Potenzials ab.

Um ein möglichst vollständiges Bild der resultierenden Entwicklung in der Industrie zu geben, wird neben den Einsparpotenzialen und Szenarien zu den einzelnen Prozessen auch ein Pfad für die Energie- und THG-Entwicklung der gesamten Industrie berechnet. Dies hilft, die Bedeutung der aus den betrachteten Prozessen stammenden Einsparpotenziale einzuordnen und einzuschätzen. Für die in diesen Szenarien benötigten Daten und Parameter, die nicht in diesem Projekt erhoben werden (z. B. zu Querschnittstechniken), wird auf bereits im Modell vorhandene Daten zurückgegriffen.

Neben der resultierenden Entwicklung von Energieverbrauch und THG-Emissionen ist ein weiteres Ergebnis der Modellierung eine Kosten-Potenzialkurve[7] für die energieintensiven industriellen Prozesse. Mit Hilfe einer Kosten-Potenzialkurve können die Energiespar- und THG-Minderungsoptionen übersichtlich dargestellt und verglichen werden, sowohl bezüglich ihrer quantitativen Wirkung als auch bezüglich der mit ihrer Umsetzung verbundenen Kosten (z. B. McKinsey 2008).

1.4.1.3 Rahmendaten

Im Folgenden sind die für die Modellierung zugrunde gelegten Rahmendaten zur Wirtschaftsentwicklung und zu den Preisen für Energieträger und Emissionszertifikate dargestellt. Soweit von der Datenverfügbarkeit her möglich, wurde der Verlauf der Daten bis 2035 an die Entwicklung des Referenzszenarios in den Energieszenarien von Prognos et al. (2010) für das Energiekonzept der Bundesregierung angelehnt.

Eine wichtige Rahmenbedingung für die übergreifenden Szenarien-Rechnungen stellt die für die Industrie insgesamt und für die einzelnen Wirtschaftszweige angenommene Wirtschaftsentwicklung dar. Für die Industrie insgesamt wurden hier die gleichen Wachstumsannahmen wie in Prognos et al. (2010) unterstellt. Die Entwicklung der einzelnen Industriezweige, die in Prognos et al. nicht ausgewiesen wird, orientiert sich an den Annahmen in einer ähnlichen Studie von Prognos/Öko-Institut (2009) (Tabelle 1-1).

Für die einzelnen modellierten Prozesse wird jedoch nicht die Bruttowertschöpfung als Aktivitätsgröße verwendet, sondern die den Energieverbrauch des Prozesses genauer widerspiegelnde Produktion des jeweiligen Produktes oder Halbzeugs in Tonnen. Die Produktionszahlen fließen exogen in die Potenzialberechnung ein und sind in dem jeweiligen Branchenkapitel (siehe Teil 2) tabellarisch dargestellt. Es wird für jedes Szenario die gleiche Produktionsentwicklung unterstellt.

Die Energiepreise fließen ebenfalls als exogener Parameter in die Berechnungen ein. Im Modell werden 13 Energieträger unterschieden, für die in Tabelle 1-2 die angenommene Entwicklung der Preise angegeben ist. Die Entwicklung entspricht hierbei der Entwicklung in Prognos et al. (2010), jedoch mussten für einzelne Energieträger weitere Annahmen getroffen werden, wenn diese von Prognos et al. nicht ausgewiesen wurden.

---

7 Kosten-Potenzialkurven für THG sind auch unter dem Begriff CO_2-Vermeidungskostenkurven bekannt.

Tabelle 1-1: Für die Modellrechnungen angenommene Wirtschaftsentwicklung in der Industrie (reale Bruttowertschöpfung, in Mrd. €)

Branche	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	2,5	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4
Ernährung und Tabak	32,8	27,1	26,9	27,1	27,3	27,4
Papiergewerbe	10,8	10,8	10,5	10,3	10,3	10,4
Grundstoffchemie	25,9	25,6	25,1	25,1	25,0	25,3
Sonstige chemische Industrie	27,5	26,9	27,7	29,1	29,8	30,5
Gummi- u. Kunststoffwaren	25,0	25,3	25,8	27,1	27,5	28,1
Glas u. Keramik	6,0	6,3	6,3	6,3	6,2	6,2
Verarbeitung v. Steine u. Erden	10,2	8,4	8,4	8,8	8,8	8,8
Metallerzeugung	6,0	5,6	5,6	5,1	4,6	4,5
NE-Metalle, -gießereien	7,6	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Metallbearbeitung	48,2	44,9	46,3	47,0	48,3	49,7
Maschinenbau	71,5	78,1	82,4	85,1	88,3	91,6
Fahrzeugbau	85,4	73,5	76,1	80,4	82,5	85,7
Sonst. erarbeitendes Gewerbe	134,7	153,2	159,9	162,8	169,1	174,9
Industrie gesamt	494,1	495,3	510,7	523,7	537,0	552,4

Quellen: Statistisches Bundesamt, VGR (Stand August 2010); Prognos et al. 2010; Öko-Institut, Prognos 2009; Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 1-2: Für die Modellierung hinterlegte Entwicklung der Energieträgerpreise (€/GJ)

Energieträger	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Strom	19,72	15,71	13,89	15,56	17,22	19,17
Heizöl, leicht	16,33	17,75	18,39	20,16	21,94	23,22
Steinkohle	4,03	4,71	5,02	5,6	6,18	6,8
Koks	6,98	8,16	8,7	9,7	10,71	11,79
Braunkohle	4,03	4,71	5,02	5,6	6,18	6,8
Erdgas	7,69	9,47	10,28	10,97	11,67	12,36
Petrolkoks	6,98	8,16	8,7	9,7	10,71	11,79
Heizöl, schwer	7,16	11,87	14,01	15,9	17,8	18,84
Kokereigas, Stadtgas, LPG, Raffineriegas	7,69	9,47	10,28	10,97	11,67	12,36
Gichtgas	5,39	6,63	7,19	7,68	8,17	8,65
Müll	2,01	2,35	2,51	2,8	3,09	3,4
Biomasse	4,83	5,65	6,02	6,72	7,41	8,16
Fernwärme	13,15	15,28	16,29	18,17	20,06	22,08

Die Preise für Emissionszertifikate im Europäischen Emissionshandel sind neben den Energiepreisen ein weiterer Faktor für die Investitionsrechnung. Für alle Prozesse, die am Emissionshandel teilnehmen werden die folgenden Preise angenommen. Die Preisentwicklung entspricht der Entwicklung aus dem Referenzszenario in Prognos et al. (2010).

Tabelle 1-3: Für die Modellierung hinterlegte Preise für Emissionszertifikate im Europäischen Emissionshandel (EUA)

	2007	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Preis für EU ETS Emissionszertifikate (EUAs) in €/tCO_2-eq	1	15	20	25	30	35

Zur Berechnung der energiebedingten THG-Emissionen sind im Modell für alle 13 Energieträger Emissionsfaktoren hinterlegt (Tabelle 1-4). Die Emissionsfaktoren für Strom orientieren sich an der CO_2-Intensität der Stromerzeugung des Referenzszenarios aus Prognos et al. (2010).

Tabelle 1-4: Für die Modellierung hinterlegte Emissionsfaktoren

Energieträger [t CO_2/GJ]	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Strom	0,179	0,172	0,168	0,151	0,133	0,109
Heizöl, leicht	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074
Steinkohle	0,094	0,094	0,094	0,094	0,094	0,094
Koks	0,108	0,108	0,108	0,108	0,108	0,108
Braunkohle	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112
Erdgas	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
Petrolkoks	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101
Heizöl, schwer	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078
Kokereigas, Stadtgas, LPG, Raffineriegas	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Gichtgas	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139
Müll	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
Biomasse	0	0	0	0	0	0
Fernwärme	0,082	0,08	0,078	0,07	0,062	0,051

1.4.2 Hemmnis-Analyse

1.4.2.1 Grundlagen

Mit Blick auf den Einsatz von Energieeffizienzmaßnahmen ist in der Praxis eine Diskrepanz zwischen der Realisierung als wirtschaftlich eingestufter Maßnahmen und der Umsetzung dieser Maßnahmen festzustellen. Dieses Phänomen wird als „Energieeffizienz-Paradoxon“ oder „Energieeffizienzlücke“ (Jaffe, Stavins 1994) bezeichnet. Die Gründe für das Auftreten der „Effizienzlücke“ sind vielfältig und werden als „Hemmnisse“ oder „Barrieren“ für den Einsatz von Energieeffizienzmaßnahmen bezeichnet.

Im Rahmen dieser Studie werden typische Hemmnisse und fördernde Faktoren analysiert, die im Bereich der energieintensiven Industrie in Deutschland relevant sind. Zu diesem Zwecke wurde zunächst als Grundlage der Analyse eine Sichtung relevanter Publikationen, die sich mit Hemmnissen und fördernden Faktoren für Energieeffizienzmaßnahmen auseinandersetzen, vorgenommen. Aufbauend darauf wurde ein Gesprächsleitfaden konzipiert, der dem strukturierten Austausch mit Fachexperten aus den einzelnen Branchen dient. Ziel dieses Austauschs ist die Diskussion typischer Hemmnisse, die in den unterschiedlichen Branchen angetroffen werden und dort auf den Einsatz energieeffizienter Technologien wirken. Diese Ergebnisse werden in den jeweiligen Unterkapiteln branchenspezifisch erörtert. Daneben wird anhand der durchgeführten Gespräche ein branchenübergreifender Gesamtüberblick gegeben. Dieser wird zusammenfassend in Abschnitt 2.5 dargestellt. Als Grundlage für die weiteren Ausführungen wird an dieser Stelle zunächst ein Überblick über typische Hemmnisse und fördernde Faktoren für die Energieeffizienz gegeben und danach im Detail auf die für die Erhebung verwendete Methodik eingegangen.

Hemmnisse für die Steigerung der Energieeffizienz werden seit mehreren Jahrzehnten umfänglich in der Literatur diskutiert. In den nachfolgenden Betrachtungen wird der Hemmnis-Begriff nach Sorrell et al. zugrunde gelegt: ein Hemmnis ist demzufolge ein Mechanismus, der eine Entscheidung oder ein Verhalten verhindert, dass sowohl energieeffizient als auch ökonomisch effizient ist und somit Investitionen im ökonomisch rentable, energieeffiziente Technologien verhindert (Sorrell, O‘Malley et al. 2004). Hemmnisse behindern damit investive und organisatorische Maßnahmen und Lösungen, die bei heutigen Energiepreisen rentabel sind, d. h. mindestens eine interne Verzinsung von ungefähr 10 % aufweisen. Ergänzend werden in dieser Studie fördernde Faktoren betrachtet. Sie wirken positiv auf den Einsatz von rentablen Effizienztechnologien und senken Rentabilitätsanforderungen durch nicht-monetäre oder nicht direkt mit der Maßnahme verbundene Effekte. In der Vergangenheit fanden sie allerdings kaum Beachtung und sind in der Regel bei den Erstinvestoren neuer Technologien zu finden.

In der Literatur werden Hemmnisse nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifiziert: Beispielsweise differenziert Reddy in seinen Ausführungen Hemmnisse nach Akteuren (Reddy 1991). Painuly et al. greifen auf eine Klassifizierung nach technischen, institutionellen, finanziellen, informationellen, managementbedingten sowie Hemmnisse durch Preispolitiken zurück (Painuly, Reddy 1996). Weber unterscheidet hinsichtlich marktbedingter, institutioneller, organisatorischer und verhaltensbedingter Hemmnisse, bemerkt jedoch, dass in der Praxis jedes Hemmnis Aspekte aus den unterschiedlichen genannten Kategorien beinhaltet. Damit ist es empirisch nicht möglich, die „wahren" Gründe dafür zu bestimmen, warum Maßnahmen nicht umgesetzt werden (Weber 1997). Hemmnisse können in der betrieblichen Praxis je nach Branche erfahrungsgemäß in Form und Ausprägung unterschiedlich relevant sein (siehe dazu beispielhaft (Gruber, Brand 1991)).

Im Rahmen dieser Studie werden Hemmnisse in fünf verschiedene Kategorien untergliedert, die sich in den Grundzügen an der Kategorisierung von Sorrell et al. (Sorrell, O'Malley et al. 2004) orientieren. Darüber hinaus wird eine sechste Kategorie zu fördernden Faktoren ergänzend betrachtet. Damit ergeben sich folgende Kategorien:

- Informationsmängel und Transaktionskosten
- Investor-Nutzer-Dilemma
- Kapital
- Unsicherheiten
- Begrenzte Rationalität
- Fördernde Faktoren.

Informationsmängel und Transaktionskosten

Kenntnisse über Verbräuche, Effizienzmaßnahmen und deren Umsetzung stellen eine wesentliche Voraussetzung für Energieeinsparungen dar. Allerdings sind Unternehmen die Möglichkeiten und der Nutzen aus dem Einsatz energieeffizienter Technologien nicht immer bekannt (Reddy 1991).

Fragen der Informationsverfügbarkeit im Zusammenhang mit der Energieeffizienz können im Wesentlichen in drei Bereiche unterschieden werden: die Verfügbarkeit und Auswertung von Informationen über den derzeitigen Energieverbrauch, Informationen über mögliche Verbesserungen der Abläufe und Prozesse und das Wissen darüber, wie diese Verbesserungen umgesetzt werden.

Aufgrund eines Mangels an Informationen über den Energieverbrauch bestehender Anlagen ist es schwierig bzw. nicht möglich, Aussagen über den derzeitigen Energieverbrauch zu treffen, um Möglichkeiten für Einsparungen oder den Bedarf zur Steigerung der Energieeffizienz überhaupt zu erkennen. Ist hingegen ein Bedarf oder die

prinzipielle Möglichkeit einer Einsparung identifiziert, ist eine Suche nach Informationen über aktuell mögliche Energieeffizienzmaßnahmen notwendig. Darüber hinaus kann eine ausschließlich implizite Ausweisung des Energieverbrauchs über Gemeinkosten dazu führen, dass bei Entscheidungen über Investitionen Aspekte des Energieverbrauchs nur nachrangig betrachtet werden. Mit der Frage der Maßnahmenverfügbarkeit ist auch die Suche nach potenziellen Lieferanten, Beratern oder Installateuren zu thematisieren. Beispielsweise bemerken Rohdin, Thollander (2006) für ihr Untersuchungsbeispiel, dass durch ein Oligopol bei komplexen Produktionsmaschinen keine energieeffizienten Lösungen verfügbar sind. Über die Informationsverfügbarkeit hinaus kann die Frage nach der Umsetzung von Maßnahmen gestellt werden: Dazu müssen Informationen problembezogen verfügbar sein, d. h. ein Entscheidungsträger muss die Informationen für seine Zwecke verwenden können. Insbesondere bei komplexen Systemen kommt als weiterer, erschwerender Faktor hinzu, dass Systemgrenzen oder Teilsysteme nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Gerade bei komplexen, industriellen Systemen ist die Frage nach der technischen Effizienz in hohem Maße von der Systemgrenze abhängig. Fehlende Normen und Standards können sich hier als Hemmnis erweisen. Durch unterschiedliche Abgrenzungen in diesem Zusammenhang können unterschiedlich hohe Effizienzgewinne erreicht und ausgewiesen werden (vgl. hierzu das Beispiel aus (Europäische Kommission (Hrsg.) 2009, Abschnitt 1.5.1)).

Im Zusammenhang mit Informationen werden oft auch Transaktionskosten thematisiert. Transaktionskosten beinhalten unter anderem die Kosten für die oben genannten Umsetzungsprozesse, beispielsweise für die Sammlung, Begutachtung und Anwendung von Informationen über Energieverbräuche und Maßnahmen. Daneben sind Kosten für den Abschluss, die Überwachung und die Durchsetzung von Verträgen zu nennen. Falls diese Transaktionskosten erwartungsgemäß sehr hoch sind, können Entscheidungsträger davor zurückweichen, Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz einzuleiten.

Investor-Nutzer-Dilemma

Das Investor-Nutzer-Dilemma tritt bei der Entkopplung von Aufwand für und Nutzen durch Effizienzmaßnahmen zwischen unterschiedlichen Akteuren auf. Dabei können entweder Teil-Aufwände durch unterschiedliche Akteursgruppen getragen werden oder erreichte Einsparungen nicht den Verursachern zugerechnet werden.

Im Zusammenhang mit Betrachtungen zur Energieeffizienz in der Industrie bedeutet ersteres, dass zwischen Firmen als auch innerhalb von Organisationen die Investitionen und die Aufwendungen für den Betrieb der Anlagen durch unterschiedliche Akteure getragen werden. Somit hat ein Akteur, der über die Anlage entscheidet und damit

deren Energieeffizienz bestimmt, nur geringes Interesse, sich mit Fragen des Energieverbrauchs auseinander zu setzen, den letztlich der Betreiber der Anlage tragen muss. Andererseits werden durch separate Budgets oder organisatorische Gegebenheiten Einsparungen nicht an deren Verursacher weitergegeben. Dadurch entfällt bei ihnen der Anreiz, sich um Einsparungen zu bemühen. In beiden Fällen werden dadurch Energieeffizienzmaßnahmen trotz Rentabilität nicht umgesetzt. In diesem Zusammenhang kommt auch das sogenannte OEM-Dilemma zum Tragen. Bei komplexen Systemen hat ein Endbetreiber oft keine Einsicht in die Systembauteile; daher ist für ihn auch nicht ersichtlich, ob energieeffiziente Komponenten verbaut wurden oder nicht. Durch diesen Umstand kann ein OEM („Original Equipment Manufacturer“) tendenziell eher in der Anschaffung günstige Komponenten wählen und damit seine Kosten minimieren, während der Betreiber die Zusatzkosten tragen muss.

Kapital

Kapitalbeschränkungen bezeichnen den Sachverhalt, dass für die Finanzierung von Energieeffizienzmaßnahmen kein ausreichendes Kapital zur Verfügung steht. Das Thema Kapitalverfügbarkeit ist für KMU besonders relevant (vgl. Gruber, Brand 1991). Je energieeffizienter eine Technologie ist, desto größer werden tendenziell die Investitionen (vgl. Reddy 1991). Demgegenüber kann eine Lebenszyklusbetrachtung zeigen, dass durch den reduzierten Energieeinsatz der Betrieb der energieeffizienten Anlage gegenüber einer Vergleichsanlage günstiger ist.

Kapitalbeschränkungen können aufgrund unterschiedlicher Sachverhalte bestehen: Investoren verfügen beispielsweise über kein ausreichendes Kapital und müssten für Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen ihre Kreditlinie in Anspruch nehmen. Dies ist teilweise nur zu vergleichsweise hohen Kapitalkosten möglich. Darüber hinaus kann eine unternehmensinterne Richtlinie bestehen, Investitionen ausschließlich über Eigenkapital zu finanzieren und gänzlich auf Fremdkapital zu verzichten.

Die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen kann auch bei begrenzt zur Verfügung stehendem Kapital mit geringer Priorität im Vergleich zu anderen Investitionen – beispielsweise im Bereich der Kernkompetenzen der Unternehmung – durchgeführt werden. Damit schmälern sich die Möglichkeiten für den Einsatz von Effizienztechnologien.

Unsicherheiten

Volatile Energiepreise und damit verbundene Preiserwartungen können in beträchtlichem Maße den Einsatz von Energieeffizienzmaßnahmen beeinflussen: bei niedrigen Preiserwartungen verlängert sich der Zeitraum, bis sich die Differenzinvestition der

Effizienztechnologie gegenüber einer Vergleichstechnologien amortisiert. Darüber hinaus kann die Unsicherheit hinsichtlich erzielbarer Einsparungen ein Hemmnis für die Entscheidung von Effizienzmaßnahmen darstellen (Reddy 1991).

Daneben birgt die technische Umsetzbarkeit weitere Risiken und Unsicherheiten: Beim Einsatz effizienter Lösungen könnten unerwünschte Seiteneffekte sowie versteckte Kosten befürchtet werden. Diese Seiteneffekte umfassen Beeinträchtigungen im Prozessablauf oder Veränderungen der Produkteigenschaften. Daneben können versteckte Kosten, beispielsweise durch Ausschuss oder erhöhten Wartungs- oder Schulungsbedarf, erwartet werden, die Einsparungen durch Effizienzmaßnahmen schmälern.

Eine weitere Quelle von hemmenden Faktoren können Gesetzgebung, Vorschriften und Normen sein, die den Einsatz von Effizienzmaßnahmen aus unterschiedlichen Gründen verhindern. Auch können aufwendige Genehmigungsverfahren oder die Unsicherheit bezüglich künftig erwarteter Regelungen Investition verzögern.

Begrenzte Rationalität

Über die genannten Hemmnisse hinaus kann das Phänomen der begrenzten Rationalität als Hemmnis unterschiedliche Ausprägungen annehmen. Es beschreibt die Tatsache, dass ein Akteur bei seinen Handlungen oder Entscheidungen von einer objektiv optimalen Handlungsweise abweicht. Die Gründe können unterem anderem Zeitmangel, fehlendes Image von Effizienztechnologien oder anderweitige individuelle Prioritäten sein. Die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen kann ebenfalls dadurch behindert sein, dass kein Verantwortlicher für Energiefragestellungen diese Maßnahmen vorantreibt; insbesondere bei KMU ist diese Rolle oft nicht gegeben.

Wie oben beschrieben sind Effizienztechnologien tendenziell in der Anschaffung teurer als Vergleichstechnologien, im Betrieb allerdings günstiger. Eine reine Betrachtung der Investitionssumme von Effizienzmaßnahmen führt daher häufig zu sub-optimalen Entscheidungen. Wird eine erweiterte Betrachtung durchgeführt, wird statt des Rückgriffs auf die interne Verzinsung in der Praxis häufig die Amortisationszeit als Entscheidungsgröße gewählt. Da sie allerdings ein Risikomaß darstellt, ist sie als alleinige Entscheidungsgrundlage für Investition nicht geeignet.

Fördernde Faktoren

Die bisherigen Ausführungen haben sich auf die Erfassung von Hemmnissen bezogen. Demgegenüber hat die Betrachtung fördernder Faktoren bislang wenig Beachtung gefunden. Rohdin, Thollander (2006) identifizieren in ihrer Studie auch fördernde Faktoren und sehen hochmotivierte Mitarbeiter mit einer Langzeitstrategie als besonders wichtig für die Umsetzung von Energieeffizienzsteigerungen.

Im Rahmen dieser Studie wird daher ergänzend die Bedeutung fördernder Faktoren für den Einsatz energieeffizienter Technologien untersucht. Dies umfasst die Haltung der Unternehmensleitung zu Energiefragestellungen in Form von Image, Verbesserungsvorschlägen und energiebezogenen Fortbildungen. Gleichzeitig wird die Bedeutung von Umweltmanagementsystemen näher thematisiert.

1.4.2.2 Erhebungsmethodik

Zur Identifizierung und Diskussion relevanter Barrieren und fördernder Faktoren wird der Austausch mit Experten aus den unterschiedlichen Branchen gesucht. Zielgruppe der Gesprächspartner sind Unternehmensvertreter, die sich beispielsweise aus dem Bereich der technischen Entwicklung und Umsetzung mit dem Thema Energieeffizienz befassen. Daneben wurden technische Branchenausrüster und Anlagenbauer, technische Ansprechpartner von relevanten Branchenorganisationen und weitere Branchenkenner mit relevanten Erfahrungen, beispielsweise aus dem Bereich der Forschung, befragt. Abhängig von der jeweiligen Branchenstruktur werden dabei trotz des Schwerpunkts auf energieintensive Großunternehmen abhängig von der jeweiligen Branchenstruktur nach Möglichkeit auch Vertreter von KMU eingebunden.

Die Gespräche erfolgten anhand eines standardisierten Gesprächsleitfadens. Für den Gesprächsleitfaden wurde auf die oben dargestellte Klassifizierung der Hemmnisse zurückgegriffen. Fragen unterschiedlicher Bereiche wurden teilweise zwecks praktischer Handhabbarkeit im Fragebogen thematisch gebündelt. Der Austausch über die Fragen erfolgte dabei vorzugsweise per Telefon oder durch ein persönliches Gespräch. Teilweise musste aus verschiedenen Gründen (Wunsch nach schriftlicher Ausarbeitung, Erreichbarkeit der Ansprechpartner etc.) auch auf einen Austausch per E-Mail zurückgegriffen werden. Insgesamt konnten im Rahmen der Studie Fragebögen von 24 Experten erhoben werden. Tabelle 1-5 zeigt dabei die Aufschlüsselung der Teilnehmer nach Branchen.

Neben diesen formalisierten Ausführungen wurden weitere Gespräche geführt, die sich auch mit Hemmnissen befassen, beispielsweise im Rahmen der Erhebung von Technologiedaten. Verschiedene Teilnehmer konnten dabei aus verschiedenen Gründen (z. B. Kapazitätsengpässe) keine formalisierte Auskunft zu den Hemmnissen geben. Ihre Beiträge spiegeln sich daher nicht in der genannten Zahl wieder, obwohl ihre Angaben Eingang in die jeweiligen Branchenanalysen gefunden haben. Daneben haben sich für einige Branchen nur wenige Ansprechpartner gefunden, die zu entsprechenden Angaben bereit waren. Auch im Rahmen eines Experten-Workshops wurden Hemmnisse und fördernde Faktoren umfassend diskutiert.

Tabelle 1-5: Rückläufe der Fragebögen nach Branchen

Branche	Fragebögen
Grundstoffchemie	3
Metallerzeugung	1
Nicht-Eisen-Metallindustrie	1
Papiergewerbe	4
Verarbeitung Steine-Erden	3
Glas-Keramik	6
Ernährung	6
Insgesamt	**24**

Inhaltlich wurden neben allgemeinen Fragen in einigen Bereichen spezielle Fragen für KMU oder Großunternehmen ergänzend gestellt, da energieintensive Großunternehmen in der Regel über andere Rahmenbedingungen als kleinere Unternehmen verfügen. Für sie sind daher andere Aspekte relevant. Beispielsweise kann davon ausgegangen werden, dass in großen Unternehmen ein informierter Technikerstab angestellt ist, der den Energieverbrauch in der Regel beziffern kann. Demgegenüber ist diese Rolle in KMU oft nicht oder nur in begrenztem Umfang vorhanden. Gleichzeitig wurden im Rahmen der Gespräche auch Hinweise zu möglicherweise interessanten, politischen oder sonstiger Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz gesammelt. Über den Gesprächsleitfaden hinaus können bei Bedarf jeweils zusätzlich relevante Informationen erhoben und für die Auswertung ergänzend vermerkt werden.

Dese Hemmnis-Analyse bildet eine wesentliche Grundlage für die Ableitung von Empfehlungen für politische Instrumente und Maßnahmen zur Ausschöpfung der modelltechnisch ermittelten Einsparpotenziale für industrielle Prozesse in den ausgewählten Branchen.

1.4.3 Politische Instrumente und Ableitung von Empfehlungen

Die Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen kann durch politische Instrumente und Maßnahmen und insbesondere auch durch die Selbstorganisationen der Wirtschaft beeinflusst und gefördert werden. Ausgehend von der durchgeführten Branchenanalyse und der Analyse übergreifender Hemmnisse wird in Kapitel 2.5 analysiert, welche politischen Instrumente derzeit in Deutschland im Bereich industrieller Prozesstechniken zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Minderung von Treibhausgas-Emissionen eingesetzt werden.

Tabelle 1-6: Instrumententypen der Klima- und Energiepolitik mit Ausgestaltungsbeispielen[8]

Regulierungen und Standards		
Beschreibung	„Regulierungen und Standards bieten im Allgemeinen eine gewisse Sicherheit bezüglich Emissionsniveaus. Sie können anderen Instrumenten vorzuziehen sein, wenn Informationsbarrieren oder andere Hemmnisse Produzenten und Verbraucher daran hindern, auf Preissignale zu reagieren. Es kann jedoch sein, dass sie nicht zu Innovationen und einer Weiterentwicklung von Technologien führen." **Beispiele:** Ordnungsrechtliche Vorschriften, Gebote und Verbote, Technische Standards, Performancestandards, Produktkennzeichnung etc.	
Kriterien	Umweltwirksamkeit:	Direkt gesetzte Emissionsgrenzwerte; können Ausnahmen beinhalten. Abhängig von ihrer Einhaltung und ihrer aufschiebenden Wirkung.
	Kosteneffizienz:	Abhängig von ihrer Ausgestaltung; einheitliche Umsetzung führt oft zu höheren Gesamtkosten für die Einhaltung.
	Verteilungsaspekte:	Abhängig von der Chancengleichheit. Kleine/neue Akteure können benachteiligt sein.
	Institutionelle Machbarkeit:	Abhängig von der technischen Umsetzbarkeit; beliebt bei Behörden in Ländern mit schwach funktionierenden Märkten.

Steuern und Abgaben		
Beschreibung	„Steuern und Gebühren können einen Kohlendioxidpreis festlegen, aber kein bestimmtes Emissionsniveau garantieren. In der Literatur werden Steuern als eine effiziente Art der Internalisierung der Kosten von THG-Emissionen ausgewiesen." **Beispiele:** Preis- und mengenpolitische Steuerungsmechanismen, Umweltabgaben/-steuern, Tarifpolitik, Marktreform/-öffnung etc.	
Kriterien	Umweltwirksamkeit:	Abhängig von der Fähigkeit, Steuern so zu setzen, dass eine Verhaltensänderung eintritt.
	Kosteneffizienz:	Höher bei einer breiten Anwendung; höhere Verwaltungskosten bei schwachen Institutionen.
	Verteilungsaspekte:	Regressiv; kann durch Rückführung der Einnahmen verbessert werden.
	Institutionelle Machbarkeit:	Oft politisch unbeliebt; kann bei unterentwickelten Institutionen schwierig durchzusetzen sein.

Handelbare Zertifikate		
Beschreibung	„Durch handelbare Zertifikate wird ein Kohlendioxidpreis festgesetzt werden. Die Menge der zugestandenen Emissionen bestimmt ihre Umweltwirksamkeit, während die Zuteilung der Zertifikate (wirtschaftliche) Verteilungseffekte hat. Schwankungen des Kohlendioxidpreises erschweren eine Einschätzung der Gesamtkosten für die Einhaltung der Emissionsobergrenze." **Beispiele:** Handelbare Emissionszertifikate, handelbare Quoten, Weiße Zertifikate etc.	
Kriterien	Umweltwirksamkeit:	Abhängig von der Gesamtmenge der Zertifikate, Teilnahme und Einhaltung.
	Kosteneffizienz:	Sinkt mit geringerer Teilnahme und bei weniger Sektoren.
	Verteilungsaspekte:	Abhängig von der Initialzuweisung der Zertifikate. Kann für Kleinemittenten Schwierigkeiten bereiten.
	Institutionelle Machbarkeit:	Erfordert gut funktionierende Märke und komplementäre Institutionen.

…

8 Beschreibungstexte zitiert nach IPCC 2007, Einschätzungen zu den Kriterien nach Gupta et al. 2008 (eigene Übersetzung).

Fortsetzung Tabelle 1-6:

Freiwillige Vereinbarungen		
Beschreibung	„Freiwillige Vereinbarungen zwischen Industrie und Regierungen sind politisch attraktiv, erzeugen Aufmerksamkeit bei den Interessengruppen und haben in der Entwicklung vieler nationaler Maßnahmen eine Rolle gespielt. Der Großteil dieser Vereinbarungen hat keine signifikanten Emissionsrückgänge über business as usual hinaus bewirkt. Jedoch haben einige neuere Vereinbarungen in einigen wenigen Ländern die Anwendung der besten verfügbaren Technologie beschleunigt und zu messbaren Emissionsrückgängen geführt." **Beispiele:** Freiwillige und verhandelte Selbstverpflichtungen, Vereinbarungen von Wirtschaftsbereichen, Branchen oder Unternehmen	
Kriterien	Umweltwirksamkeit:	Abhängig von der Programmgestaltung; beinhaltet klare Zielvorgaben, ein Basisszenarios, unabhängige Begleitung bei Ausgestaltung und Überwachung.
	Kosteneffizienz:	Abhängig von der Flexibilität und dem Ausmaß staatlicher Anreize, Belohnung und Strafmaßnahmen.
	Verteilungsaspekte:	Bevorteilt ausgewählte Teilnehmer, möglicherweise auch einige, bei denen kein Bedarf bestünde.
	Institutionelle Machbarkeit:	Politisch oft beliebt; erfordert einen signifikanten Verwaltungsapparat.

Subventionen und sonstige Anreize		
Beschreibung	„Finanzielle Anreize (Subventionen und Steuergutschriften) werden von Regierungen häufig geschaffen, um die Entwicklung und Verbreitung neuer Technologien zu fördern. Während ihre wirtschaftlichen Kosten allgemein höher sind als die für die obigen Maßnahmen, sind diese Anreize oft entscheidend bei der Überwindung von Hemmnissen." **Beispiele:** Subventionen und öffentliche Infrastrukturausgaben, Zuschüsse, verbilligte Kredite, Steuererleichterungen, staatliche Investitionen	
Kriterien	Umweltwirksamkeit:	Abhängig von der Programmgestaltung; weniger sicher als Regulierung/Standards.
	Kosteneffizienz:	Abhängig von Höhe und Programmgestaltung; kann marktverzerrend wirken.
	Verteilungsaspekte:	Bevorzugt die Betroffenen; möglicherweise auch diejenigen, die sie nicht benötigen.
	Institutionelle Machbarkeit:	Beliebt bei den Empfängern; möglicher Widerstand durch eingesessene Interessen. Abbau kann schwierig sein.

Forschung und Entwicklung		
Beschreibung	„Forschung, Entwicklung und Demonstration können technologische Fortschritte ankurbeln, Kosten reduzieren und Fortschritte in Richtung Stabilisierung ermöglichen." **Beispiele:** Förderung der Forschung, Entwicklung und Demonstration, Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung, Projektförderung	
Kriterien	Umweltwirksamkeit:	Abhängig von konsistenter Förderung; bei Entwicklung von Technologien und Politiken für die Verbreitung. Kann zu hohem Nutzen auf lange Sicht führen.
	Kosteneffizienz:	Abhängig von der Programmausgestaltung und der Höhe des Risikos.
	Verteilungsaspekte:	Bevorzugt die anfänglich ausgewählten Teilnehmer; Mittel werden möglicherweise leicht fehlallokiert.
	Institutionelle Machbarkeit:	Erfordert viele Einzelentscheidungen. Abhängig von der Forschungskapazität und der Finanzierung auf lange Sicht.

…

Fortsetzung Tabelle 1-6:

Informationen		
Beschreibung	„Informationsmaßnahmen (z. B. Kampagnen zur Bewusstseinsbildung) können die Umweltqualität positiv beeinflussen, indem sie informierte Entscheidungen fördern und möglicherweise zu Verhaltensänderungen führen. Ihr Einfluss auf die Emissionen ist jedoch noch nicht bestimmt worden." **Beispiele:** Allgemeine Informationen und Beratung, Broschüren, Informationszentralen, Agenturen, Beratungsstellen, Regelung und Förderung der Bildung, Aus-, Fort- und Weiterbildung	
Kriterien	Umweltwirksamkeit:	Hängt ab davon, wie Konsumenten die Informationen nutzen; am Wirksamsten in Kombination mit weiteren Politiken.
	Kosteneffizienz:	Potenziell geringe Kosten, aber abhängig von der Programmgestaltung.
	Verteilungsaspekte:	Möglicherweise weniger effizient für Gruppen (z. B. geringes Einkommen), die keinen Zugang zu Informationen haben.
	Institutionelle Machbarkeit:	Abhängig von der Mitarbeit spezieller Interessengruppen.

Ausgehend davon werden Empfehlungen zur Ausgestaltung weiterer wirkungsvoller und umsetzbarer politischer Instrumente und Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Minderung der Treibhausgas-Emissionen im Bereich der industriellen Prozesse abgeleitet. Dabei werden folgende Unterscheidungen getroffen, um die bestehenden Hemmnisse oder fördernden Faktoren mit zielgruppenorientierten Maßnahmen adressieren zu können:

- Unterscheidung von branchenspezifischen Maßnahmen und solchen, die für die industrielle Prozesstechnologien insgesamt gelten.
- Unterscheidung von Maßnahmen, die sich eher an Großunternehmen richten und solchen, die eher kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ansprechen.

Tabelle 1-6 zeigt zunächst eine Übersicht typischer Instrumente der Klima- und Energiepolitik anhand von Ausführungen des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen im Vierten Sachstandsbericht (IPCC 2007, Gupta et al. 2008). Die Instrumente werden dort hinsichtlich der Kriterien Umweltwirksamkeit, Kosteneffizienz, Verteilungsaspekte einschließlich Verteilungsgerechtigkeit und institutioneller Machbarkeit betrachtet. Anhand dieser Kriterien können Wirkungen von Instrumenten ex ante abgeschätzt oder ex post bewertet werden. Die in Tabelle 1-6 dargestellten Einschätzungen zu den Kriterien beruhen dabei auf typischen Erfahrungen und veröffentlichten Berichten.

Die vorliegende Darstellung dient der Übersicht über unterschiedliche typische Maßnahmen. Die notwendige Rückbeziehung auf als relevant einzustufende Hemmnisse und die inhaltliche Spezifikation der Maßnahmen erfolgt für branchenspezifische Faktoren in den jeweiligen Branchenkapiteln und für übergreifende Faktoren in Kapitel 2.

1.5 Literatur

AGEB (AG Energiebilanzen) (2010): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1990-2008 (Energiebilanz 2007: Stand 28.10.2009; Energiebilanz 2008: Stand 25.8.2010) und Auswertungstabellen 1990-2009 (Stand Juli 2010). Stand Juli 2010. DIW Berlin, EEFA, Köln, http://www.ag-energiebilanzen.de

Europäische Kommission (Hrsg.) (2009): Reference Document on Best Available Techniques for Energy efficiency.

FfE (Forschungsstelle für Energiewirtschaft) (2009): Energiezukunft 2050. Teil 1 – Methodik und Ist-Zustand. Teil 2 – Szenarien. In Zusammenarbeit mit dem ifo Institut. München. http://www.ffe.de/taetigkeitsfelder/energiebedarfsprognosen-struktur-und-marktanalysen/257-energiezukunft-2050

Fraunhofer ISI; Enerdata; ISIS; Technical University Vienna; Wuppertal Institute (2009): Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries. EC Service Contract Number TREN/D1/239-2006/S07.66640. Karlsruhe, Grenoble, Rome, Vienna, Wuppertal, 15 March 2009 http://ec.europa.eu/energy/efficiency/studies/efficiency_en.htm

Fraunhofer ISI; FfE (2003): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Karlsruhe/ München: Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

Fraunhofer ISI; Forschungszentrum Jülich (2001): Systematisierung der Potenziale und Optionen. Endbericht an die Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages. Karlsruhe/Jülich

Greenpeace; EUtech (2007): Klimaschutz: Plan B. Nationales Klimaschutzkonzept bis 2020. Hamburg

Gruber, E.; Brand, M. (1991): Promoting energy conservation in small and medium-sized companies. Energy policy (April 1991): 279-287

IEA (2007): Tracking Industrial Energy Efficiency and CO_2 Emissions. Paris: International Energy Agency (IEA), http://www.iea.org

IEA (2009): Energy Technology Transitions for Industry. Strategies for the Next Industrial Revolution. Paris: International Energy Agency (IEA), http://www.iea.org

IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Verminderung des Klimawandels. Beitrag der Arbeitsgruppe III zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Metz, B.; Davidson, O.R.; Bosch, P.R.; Dave, R.; Meyer, L.A. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007

Jaffe, A. B.; Stavins, R. N. (1994): The energy-efficiency gap: What does it mean? Energy Policy 22 (10): 804-810

Lung, R.B.; McKane, A.; Leach, R.; Marsh, D. (2005): Ancillary Savings and Production Benefits in the Evaluation of Industrial Energy Efficiency Measures. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry (ed.), West Point, New York

McKinsey (2008): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasen in Deutschland. Sektorperspektive Industrie. BDI

McKinsey (2009): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasen in Deutschland. Aktualisierte Energieszenarien und -sensitivitäten. BDI

Öko-Institut; DIW Berlin; FZ Jülich IEF-STE; Fraunhofer ISI; Ziesing, H.-J. (2009): Politikszenarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA). Berlin, Karlsruhe, Jülich, Oktober 2009, online: http://www.uba.de

Ostertag, K. (2003): No-regret potentials in energy conservation – an analysis of their relevance, size and determinants. Heidelberg: Physica-Verlag

Painuly, J. P.; B. S. Reddy (1996): Eletrictiy Conservation Programs: Barriers to Their Implementation. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 18 (3): 257-267

Prognos (2007): Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen. Endbericht 18/06 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin/Basel

Prognos; EWI; GWS (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Prognos AG, EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, GWS – Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung, Basel, Köln, Osnabrück

Prognos; Öko-Institut (2009): Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Im Auftrag des WWF Deutschland. Basel/Berlin, Oktober 2009

Reddy, A. K. N. (1991): Barriers to improvements in energy efficiency. Energy Policy: 953-961

Rohdin, P.; Thollander, P. (2006): Barriers to and driving forces for energy effciency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. Energy 31: 1836-1844

Sorrell, S.; O'Malley E., et al. (2004): The economics of energy efficiency: Barrieres to cost-effective investment. Cheltenham, Elgar

Statistisches Bundesamt (2009a): Fachserie 18, Reihe 1.4, Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Wiesbaden

Statistisches Bundesamt (2009b): Erhebung über die Energieverwendung. Energieverbrauch nach Energieträgern. Berichtszeitraum 2007 sowie Stromerzeugungsanlagen 2007 der Betriebe im Bergbau und Verarbeitenden Bergbau. Brennstoffeinsatz für die Strom- und/oder Wärmeerzeugung nach Energieträgern. Wiesbaden

Gupta, S.; Tirpak, D. A.; Burger, N.; Gupta, J.; Höhne, N.; Boncheva, A. I.; Kanoan, G. M.; Kolstad, C.; Kruger, J. A.; Michaelowa, A.; Murase, S.; Pershing, J.; Saijo, T.; Sari, A. (2008): Policies, Instruments and Co-operative Arrangemetns. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

UBA (Umweltbundesamt) (2009): Nationaler Inventarbericht Deutschland. Dessau

UBA (Umweltbundesamt) (2010): Presseinformation Nr. 3/2010: Deutschland erfüllte 2008 seine Klimaschutzverpflichtung nach dem Kyoto-Protokoll. Dessau

Weber, L. (1997): Viewpoint. Some reflections on barriers to the efficient use of energy. Energy Policy 25 (10): 833-835

Worrell, E.; Laitner, J.A.; Ruth, M.; Finman, H. (2003): Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. In: Energy, 28, pp.1081-1098

Wuppertal Institut (2006): Optionen und Potenziale für Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen. Im Auftrag der E.ON AG Wuppertal

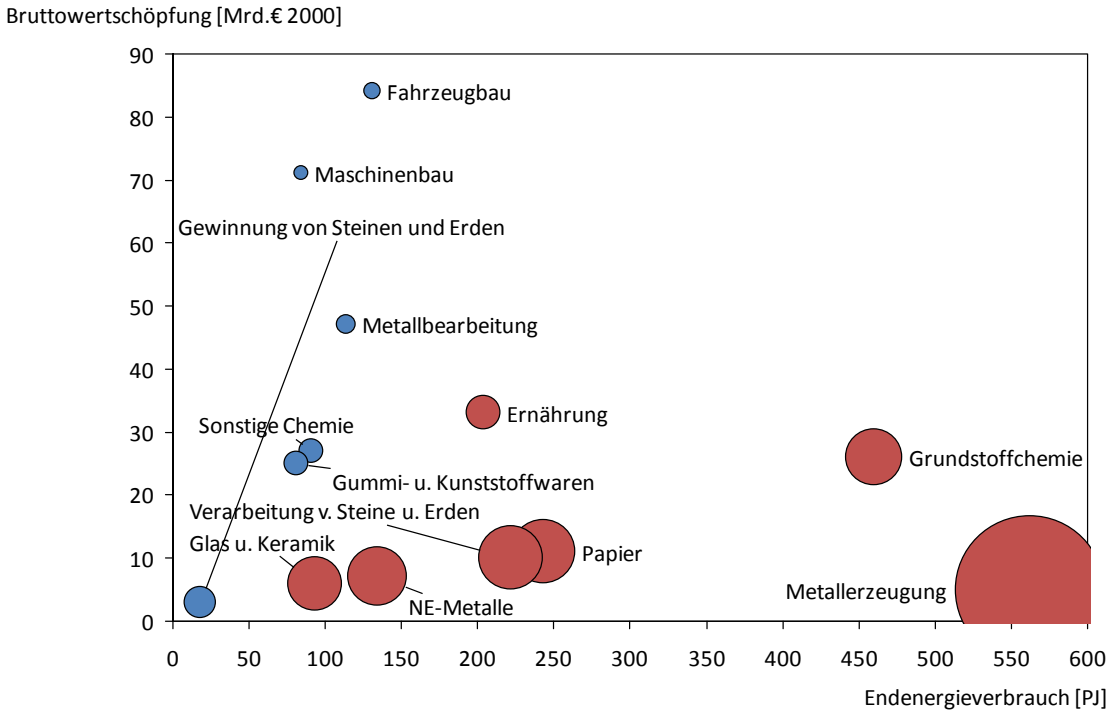
2 Branchenübergreifende Ergebnisse

S. Hirzel, T. Fleiter, B. Schlomann (Fraunhofer ISI)

2.1 Auswahl der in die Untersuchung einbezogenen Branchen

Auch wenn industrielle Prozesstechnologien grundsätzlich in allen Industriebranchen vorhanden sein können, so konzentrieren sie sich doch auf wenige überdurchschnittlich energieintensive Branchen. Energieintensive Unternehmen lassen sich dadurch charakterisieren, dass Energie ein bedeutender Produktionsfaktor ist und der Anteil der Energiekosten an den gesamten Produktionskosten deutlich über dem Mittel der Industrie liegt. Abbildung 2-1 zeigt für einzelne Industriezweige sowohl die Bruttowertschöpfung als auch den Endenergieverbrauch, wobei die Fläche der Kreise die Energieintensität (Endenergieverbrauch pro Bruttowertschöpfung) angibt. So liegt beispielsweise die Energieintensität in der Metallerzeugung mit gut 100 MJ Energieverbrauch je Euro Bruttowertschöpfung ein Vielfaches über den rund 1,2 MJ/€ im Fahrzeugbau. Alle der hier als energieintensiv gekennzeichneten Industriebranchen (rote Füllung) weisen eine Energieintensität von deutlich über 10 MJ je Euro Bruttowertschöpfung auf.

Abbildung 2-1: Energieverbrauch, Bruttowertschöpfung und Energieintensität (Fläche der Kreise) einzelner Industriebranchen (2007)



Quellen: AGEB 2010; Statistisches Bundesamt 2009a

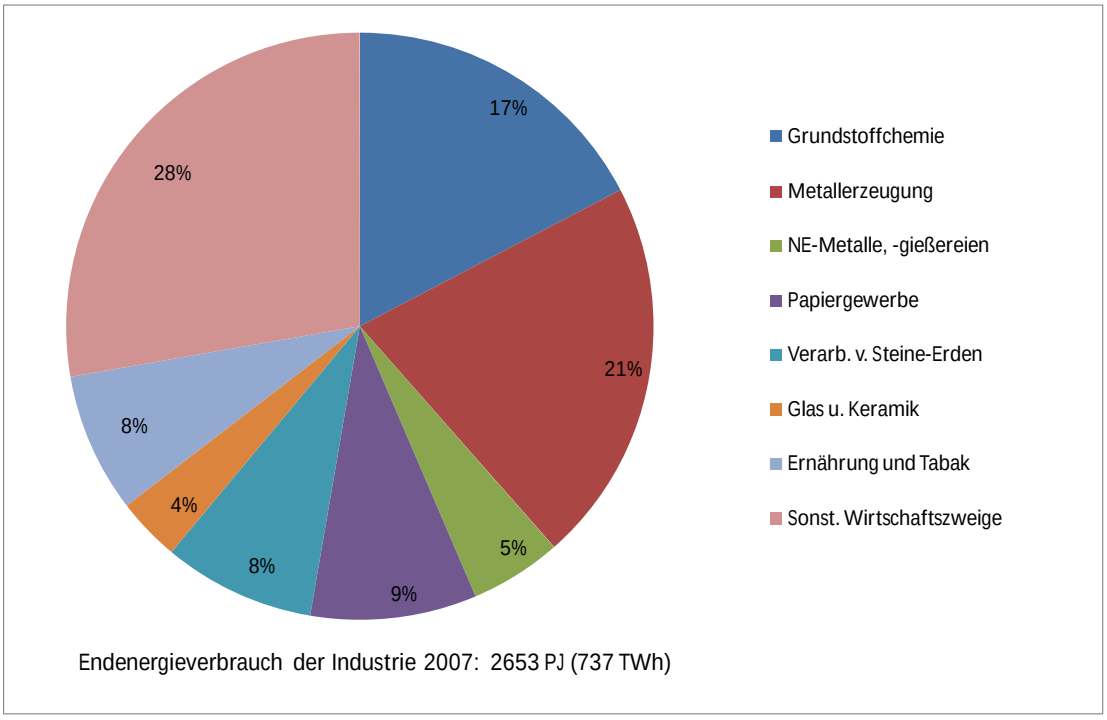
Mit diesen sechs weit überdurchschnittlich energieintensiven Branchen lässt sich der weitaus größte Teil der industriellen Prozesstechnologien erfassen. Außerdem soll noch das Ernährungsgewerbe berücksichtigt werden, das zwar nur eine leicht überdurchschnittliche Energieintensität aufweist, wo jedoch auf einige branchenspezifischen Prozesse (z. B. Herstellung von Bier, Milch oder Fleisch) ein relativ großer Anteil des Energieverbrauchs der Branche entfällt.

Damit werden, aufgrund ihrer hohen Relevanz für den industriellen Energieverbrauch insgesamt und insbesondere die Prozesstechnologien, in dieser Studie die folgenden sieben energieintensiven Branchen detailliert untersucht:

(1) Grundstoffchemie
(2) Metallerzeugung
(3) NE-Metalle, -gießereien
(4) Papiergewerbe
(5) Verarbeitung von Steine-Erden
(6) Glas und Keramik
(7) Ernährung und Tabak.

Auf diese Branchen entfiel im Jahr 2007, dem Basisjahr dieser Untersuchung, ein Anteil von 72 % des Endenergieverbrauchs (Abbildung 2-2).

Abbildung 2-2: Anteile der hier untersuchten Industriebranchen am gesamten Endenergieverbrauch der Industrie



Quelle: AGEB 2010

Tabelle 2-1: Allgemeine Charakteristik der in dieser Studie betrachteten Industriebranchen

Jahr: 2007			Bruttopro-duktionswert (BPW, nominal)	Bruttowert-schöpfung (real)	Beschäf-tigte	Anzahl d. Unter-nehmen	Energieverbrauch			Energiekosten		Energieintensität (Energieverbrauch pro Einheit reale Bruttowertschöpfung - BWS)			Energiebed. CO2-Emissionen	CO2-Intensität	Beschäftige pro Unter-nehmen
							Brennstoffe (inkl. Fernwärme)	Strom	Endenergie gesamt		Anteil am BPW	Brennstoffe (inkl. FW)	Strom	Endenergie gesamt	aus Brenstoffen, FW u. Strom	pro Einheit reale BWS	
Branche	**Nr. WZ-2003**	**Nr. WZ-2008**	Mrd. Euro	Mrd. $Euro_{2000}$	1000	1	PJ	PJ	PJ	Mrd. Euro	%	MJ/Euro	MJ/Euro	MJ/Euro	Mt	g/Euro	1
Grundstoffchemie	24.1	20.1	83,3	25,9	156	351	298	162	460	4,5	5,4	11,5	6,3	17,8	46,4	1792	444
Metallerzeugung	27.1	24.1	41,5	6,0	76	68	484	78	562	3,7	8,8	80,6	13,0	93,6	58,6	9774	1112
NE-Metalle, -gießereien	27.4, 27.5	24.4, 24.5	53,2	7,6	132	568	59	74	134	1,8	3,4	7,8	9,8	17,6	17,5	2298	232
Papiergewerbe	21	17	37,7	10,8	138	816	162	80	243	2,4	6,2	15,1	7,5	22,6	22,7	2110	169
Verarb. v. Steine-Erden	26.4 bis 26.8	23 o. 23.1, 23.2,23.4,23.31	23,2	10,2	107	997	190	31	222	1,6	6,7	18,7	3,1	21,7	17,2	1689	107
Glas u. Keramik	26.1 bis 26.3	23.1, 23.2, 23.4, 23.31	15,9	6,0	89	512	73	19	93	1,1	6,7	12,2	3,2	15,4	7,8	1296	174
Ernährung und Tabak	15, 16	10, 11, 12	170,0	32,8	629	5.064	143	61	204	3,5	2,0	4,4	1,9	6,2	19,8	605	124
Sonst. Wirtschaftszweige	restl. Nr.	restl. Nr.	1250,4	394,8	4841	28.876	393	343	736	14,0	1,1	1,0	0,9	1,9	84,1	213	168
Industrie gesamt	D o. 23 mit 10.3, 12 bis 14		1675,2	494,1	6168	37.252	1803	850	2653	32,4	1,9	3,6	1,7	5,4	274,1	555	166
	Quelle	Quelle	[1]	[2] [3]	[1]	[1]	[5]	[5]	[5]		[1]				[5] [6]		

Detaillierte Quellenangaben

[1] Statistisches Bundesamt: Fachserie 4, Reihe 4.3, Kostenstrukturstatistik, 2007. 18.5.2009

[2] Statistisches Bundesamt: Fachserie 18, Reihe 1.4. Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen (inkl. Tab. 3.2.2 mit verketteten Volumenangaben in Euro; nur auf Anforderung erhältlich). Stand August 2010

[3] Statistisches Bundesamt: Fachserie 4, Reihe 2.1., Indizes der Produktion und der Arbeitsproduktivität im Produzierenden Gewerbe. 9.1.2009 (letzte Ausgabe in WZ-2003-Systematik)

[5] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2007. Stand: 28.10.2009

[6] Brennstoffe: CO2-Emissionsfaktoren einzelner Brennstoffe aus Umweltbundesamt, Nationaler Inventarbericht Deutschland, Dessau 2009

Strom, Fernwärme: CO2-Emissionsfaktor Strommix 2007: 601 g/kWh, Fernwärme: 316 g/kWh (mit Umweltbundesamt abgestimmte Emissionsfaktoren)

Tabelle 2-1 charakterisiert die hier untersuchten Branchen weiter in Hinblick auf ihren Energieverbrauch und CO_2-Emissionen, wirtschaftliche Größen sowie die Energie- und CO_2-Intensität für das Basisjahr 2007.

Für die Analyse der genannten Branchen werden in den Branchenanalysen (siehe Teil II) einzelne Produkte bzw. Prozesse unterschieden. Als Aktivitätsgröße wird auf dieser detaillierten Ebene im Wesentlichen die Produktion in Tonnen verwendet. Diese ist für das Basisjahr entweder vom Statistischen Bundesamt (Fachserie 4, Reihe 3.1) bzw. aus Verbandsstatistiken verfügbar. Statistische Daten zum Energiebedarf einzelner Produkte bzw. Prozesse liegen für einige energieintensiven Branchen (Eisen- und Stahlerzeugung, NE-Metalle, Steine-Erden, Glas, Ernährung) aus der Energiestatistik des Statistischen Bundesamtes (2009b) vor. Allerdings gibt es Abweichungen in der Erfassungsmethode zu den Daten der Energiebilanz (AG-Energiebilanz), die hier als Leitgröße verwendet werden.

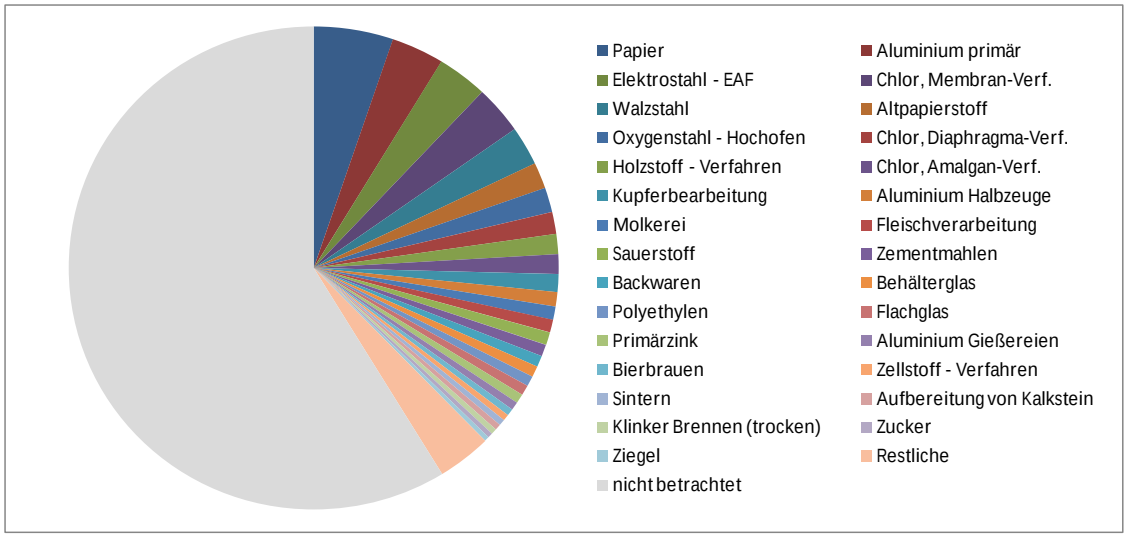
Diese betreffen den Brennstoffeinsatz zur Stromeigenerzeugung und den nichtenergetischen Verbrauch, der in den Daten des Statistischen Bundesamtes zum Energieverbrauch der Industrie enthalten ist, in der Energiebilanz aber nicht dem Endenergieverbrauch des Industriesektors zugerechnet wird, sondern im Umwandlungssektor bilanziert wird. Für weitere energieintensive Branchen (Grundstoffchemie, Papiergewerbe) und weitere wichtige Prozesse in den übrigen hier untersuchten Branchen stellt das Statistische Bundesamt keine ausreichend differenzierten Daten auf Prozessebene zur Verfügung. Diese verbleibenden Datenlücken für das Basisjahr 2007 werden in dieser Studie auf Grundlage von Literaturwerten und Expertenschätzungen gefüllt.

2.2 Energiebedarf und THG-Emissionen der energieintensiven Prozesse im Basisjahr

Die Bottom-up-Berechnung des Energieverbrauchs und der Einsparpotenziale nach Prozessen erlaubt eine detaillierte Aufschlüsselung des Strom- und Brennstoffbedarf sowie der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen).

Abbildung 2-3 zeigt den Stromverbrauch der betrachteten Prozesse als Anteil am gesamten Stromverbrauch der Industrie nach AG-Energiebilanzen. In der Summe entfallen 41 % des Stromverbrauchs auf die modellierten Prozesse. Dies entspricht 351 PJ (bzw. 97,5 TWh). Der restliche Stromverbrauch ist auf eine Vielzahl kleinerer Prozesse und Querschnittstechniken (z. B. Beleuchtung, Klimatisierung oder Druckluft), häufig in der nicht-energieintensiven Industrie, zurück zu führen. Dieser Teil des Strombedarfs ist nicht Gegenstand der Untersuchung.

Abbildung 2-3: Stromverbrauch der betrachteten Prozesse als Anteil am gesamten Stromverbrauch der Industrie im Jahr 2007



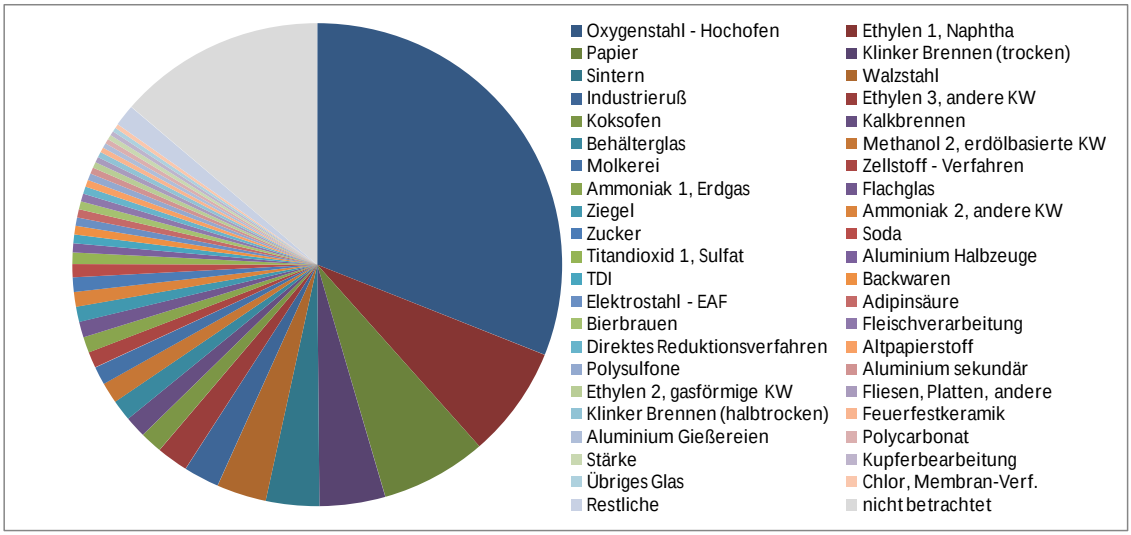
Quelle: AGEB 2010

Beim Brennstoffbedarf ist der Anteil der modellierten Prozesse größer, da die energieintensive Industrie generell eher wärmeintensive Prozesse aufweist während ein Großteil des Stromverbrauchs in den weniger energieintensiven Branchen zu finden ist. Im Vergleich zum Brennstoffbedarf der AG-Energiebilanzen summieren sich die modellierten Prozesse auf 86 % bzw. 1.580 PJ. Dieser Wert ist jedoch nicht direkt mit den statistischen Daten vergleichbar, da bei der Gichtgasnutzung in der Eisen/Stahlindustrie andere Definitionen und Abgrenzungen genutzt wurden, sodass der Anteil der modellierten Prozesse in Wirklichkeit etwas niedriger liegt. Diese Betrachtung zeigt jedoch, dass über diese Prozesse deutlich mehr als die Hälfte des Brennstoffbedarfs der Industrie abgedeckt werden kann. Auch hier gilt wie beim Strombedarf, dass der restliche Brennstoffbedarf auf übrige Industrieprozesse und Anwendungen entfällt, wie Raumwärme oder kleinere Prozesse, welche nicht Teil dieser Untersuchung sind.

In Abbildung 2-5 ist der Strom- und Brennstoffbedarf der einzelnen Prozesse vergleichend für das Jahr 2007 dargestellt. Als Prozesse mit hohem Stromverbrauch lassen sich die Chlorherstellung, die Papierproduktion, die Herstellung von Walzstahl und Elektrostahl sowie die Produktion von Primäraluminium identifizieren. Der Brennstoffbedarf ist mit Abstand am höchstem beim Hochofen in der Eisen/Stahlindustrie. Mit weitem Abstand folgen die Papierherstellung und die Produktion von Ethylen, Klinker, Walzstahl sowie Sinter. Bei diesen Prozessen sind aufgrund des hohen Energiebedarfs auch absolut die höchsten Einsparungen zu finden. Jedoch wurden viele dieser Prozesse bereits in der Vergangenheit energetisch optimiert, sodass die relativen Einsparpotenziale hier häufig eher niedrig ausfallen. Bei Betrachtung der Einsparpotenziale für

die gesamte Industrie ist folglich insbesondere die hohe Relevanz des Hochofenprozesses zu berücksichtigten.

Abbildung 2-4: Brennstoffbedarf der betrachteten Prozesse als Anteil am gesamten Brennstoffbedarf der Industrie im Jahr 2007

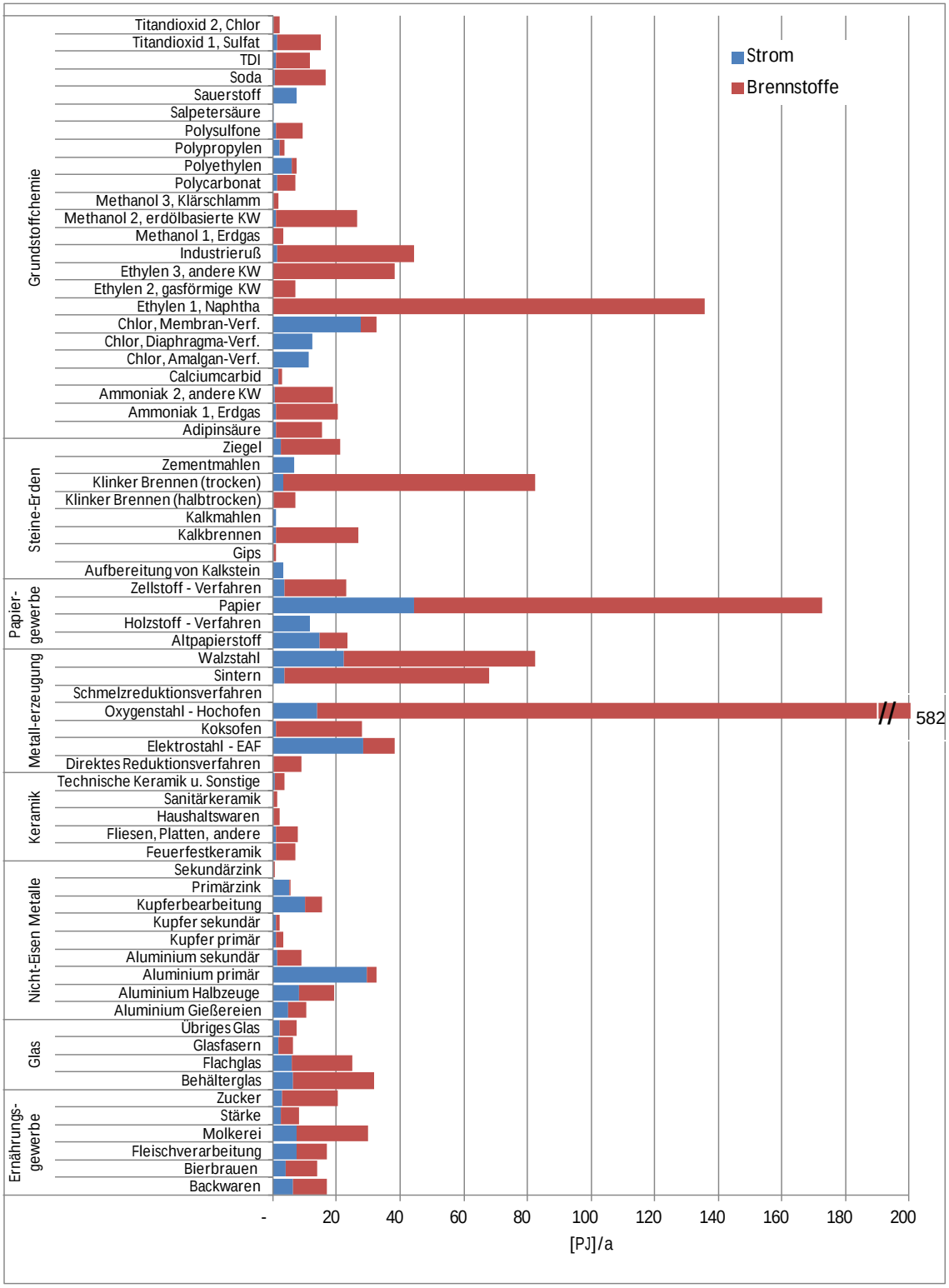


Inklusive Kokereien und Gichtgasverbrauch des Hochofens
Quelle: AGEB 2010

Bei den THG-Emissionen zeichnet sich ein ähnliches Bild (Abbildung 2-6). Die Emissionen können dabei anhand ihres Ursprungs in drei Klassen eingeteilt werden: Direkte energiebedingte Emissionen fallen direkt am Ort der Anlage an und resultieren aus der Verbrennung von Energieträgern. Als zweite Gruppe sind indirekten THG-Emissionen durch die Verwendung von Strom und als dritte Gruppe prozessbedingte Emissionen zu nennen, die nicht aus der Verbrennung von Energieträgern stammen (z. B. Lachgas bei der Salpetersäureherstellung oder Kohlendioxid bei der Klinkerproduktion durch die Entsäuerung des Kalksteins im Calcinator).

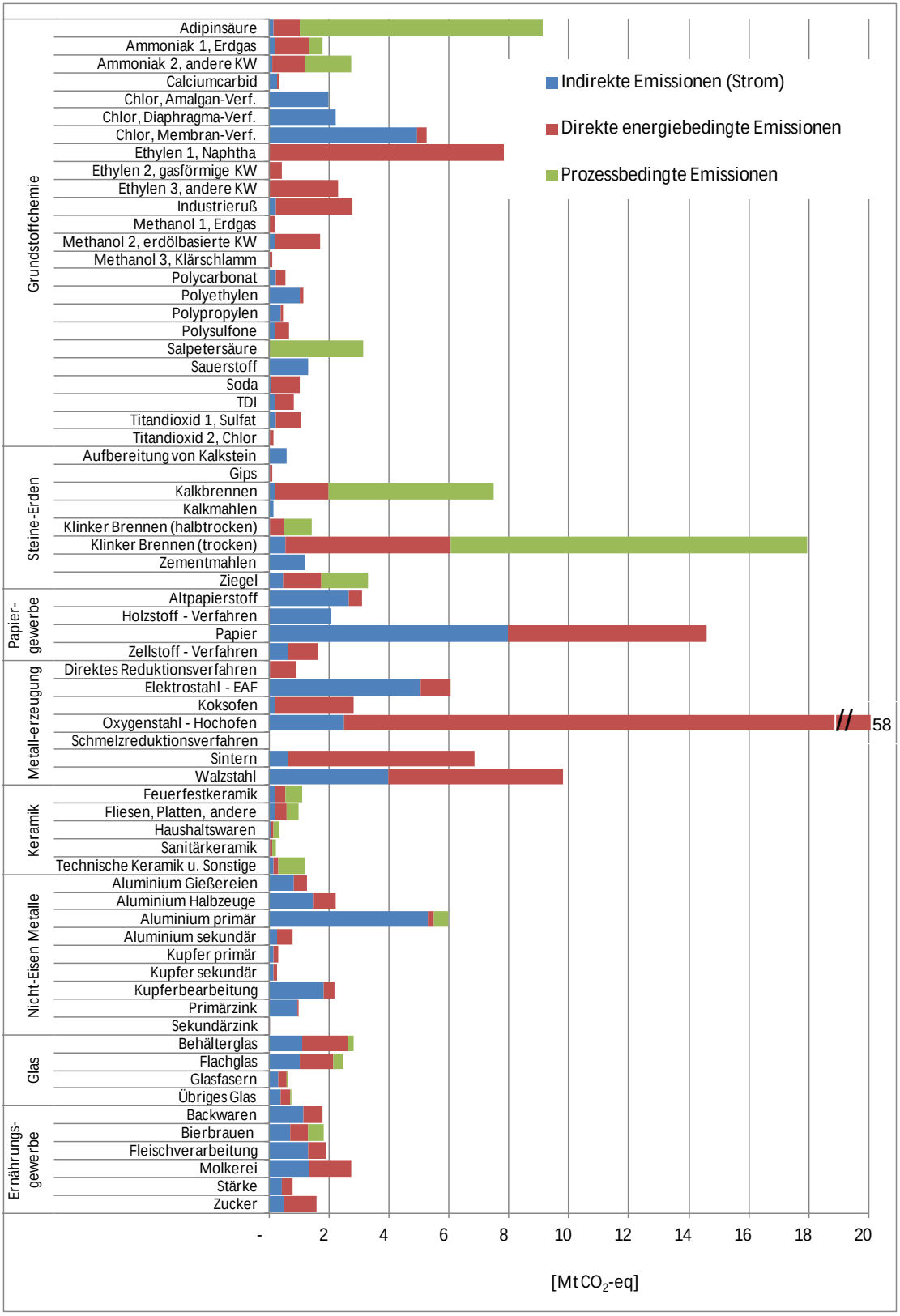
Bei der Interpretation des Diagramms ist zu beachten, dass der Emissionsfaktor von Strom aufgrund der zusätzlichen Energiewandlungsstufe und dem damit verbundenen, erhöhten Primärenergiebedarfs für die Stromerzeugung gegenüber anderen Brennstoffe wie Erdgas und Kohle deutlich höher liegt. Bei der Betrachtung der THG-Emissionen wird das Bild zusätzlich durch die prozessbedingten Emissionen verändert. Diese sind vorwiegend in der chemischen Industrie und der Zementproduktion zu finden. Es handelt sich dabei um Prozesse zur Produktion von Adipin- und Salpetersäure und Ammoniak in der Grundstoffchemie sowie, um Prozesse zum Brennen von Klinker, Kalk und Ziegeln im Sektor Steine-Erden. Alle Angaben sind als CO_2-Äquivalente (CO_2-eq.) dargestellt, d. h., die Lachgasemissionen bei der Salpetersäureproduktion lassen sich direkt in ihrer Klimawirksamkeit mit den CO_2-Emissionen beim Klinkerbrennen vergleichen.

Abbildung 2-5: Strom- und Brennstoffbedarf der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 2-6: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

2.3 Ergebnisse der Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

2.3.1 Einsparpotenziale der untersuchten Prozesse

Im Folgenden werden die berechneten Einsparpotenziale aggregiert über alle betrachteten Prozesse und Sektoren ausgewertet. Dabei werden die Einsparpotenziale generell als Differenz eines Szenarios zur Entwicklung im Frozen-Efficiency-Szenario im gleichen Jahr angegeben.

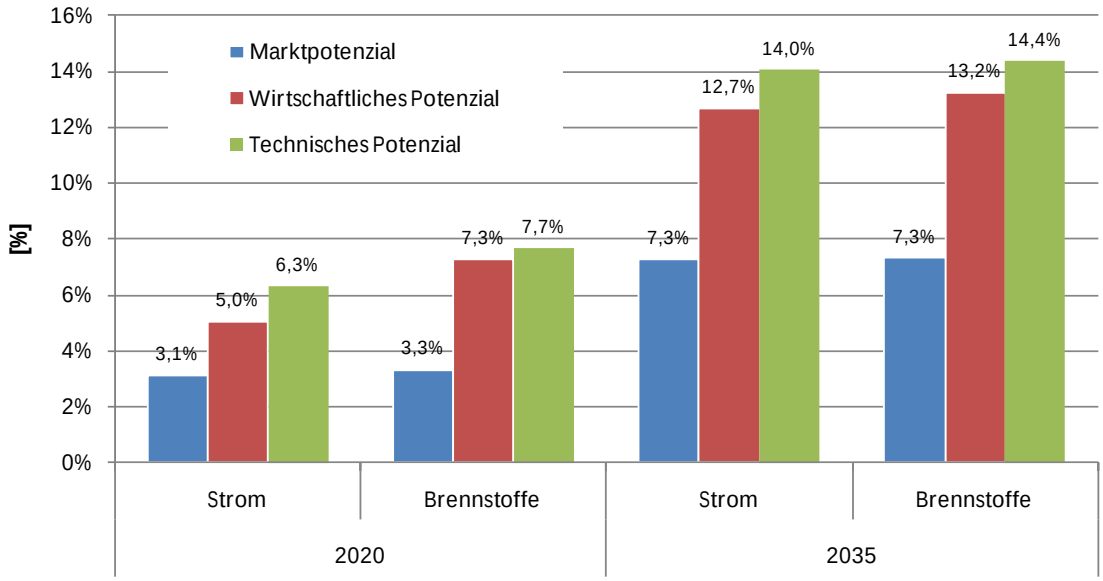
Einsparpotenziale – Überblick

Insgesamt ergibt sich für die Brennstoffeinsparungen als auch für die Stromeinsparungen ein technisches Einsparpotenzial von jeweils rund 14 % bis zum Jahr 2035, bezogen auf den Strom- bzw. Brennstoffbedarf im Frozen-Efficiency-Szenario. Aus Abbildung 2-7 geht weiterhin hervor, dass dieses Potenzial zum größten Teil wirtschaftlich erschließbar ist. Nimmt die Verbreitung von effizienten Technologien mit der gleichen Geschwindigkeit zu wie dies bereits in der Vergangenheit der Fall war, so ergeben sich im entsprechenden Marktpotenzial Einsparungen im Vergleich zum Frozen-Efficiency-Szenario von etwa 7 % (Abbildung 2-7). Bis zum Jahr 2020 sind die Potenziale deutlich niedriger und das technische Einsparpotenzial für Brennstoffe liegt hier bei knapp 8 %, während die es für Strom bei etwa 6,5 % liegt. Dieser deutliche Unterschied ist zum einen auf die langen Lebenszeiten der industriellen Anlagen zurückzuführen und die Annahme der Modellierung, dass es keinen frühzeitigen Austausch von Anlagen gibt[9] und zum anderen auf die Tatsache, dass für einige besonders innovative Einspartechnologien erst von einer Marktreife im Zeitraum um 2020 Marktreife ausgegangen wird.

Abbildung 2-8 setzt die Einsparpotenziale in Bezug zum Strom- und Brennstoffbedarf aller modellierten Prozesse. Die gesamte Höhe der Flächen entspricht jeweils dem Energiebedarf im Frozen-Efficiency-Szenario. Es ist zu erkennen, dass der Strombedarf im Frozen-Efficiency-Szenario etwa konstant bleibt, während der Brennstoffbedarf leicht zurückgeht. Bei Berücksichtigung der Marktpotenziale, zeigt sich auch beim Strombedarf ein Rückgang. Dieser Rückgang fällt entsprechend stärker aus, wenn das gesamte technische Potenzial angerechnet wird. Es ergibt sich schließlich der verbleibende Energieverbrauch des Szenarios Technische Diffusion. Die gesamten Stromeinsparungen belaufen sich damit auf 49 PJ im Jahr 2035. Der Brennstoffbedarf lässt sich im gleichen Zeitraum um 213 PJ reduzieren – bei Einsatz aller für die Modellierung berücksichtigten Einsparoptionen (siehe Branchenbeschreibung).

9 Frühzeitiger Austausch von Anlagen, d. h. der Austausch vor dem Ende der eigentlichen Lebensdauer der Anlagen, würde die Kosten der Effizienzsteigerungen deutlich erhöhen, da in diesem Fall nicht mit Differenzkosten zur Standardtechnologie gerechnet werden kann.

Abbildung 2-7: Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis zum Jahr 2020 und 2035



Die angegebenen prozentualen Einsparungen beziehen sich auf den Strom- bzw. Brennstoffverbrauch aller untersuchten Prozesse im jeweiligen Jahr im Frozen-Efficiency-Szenario.

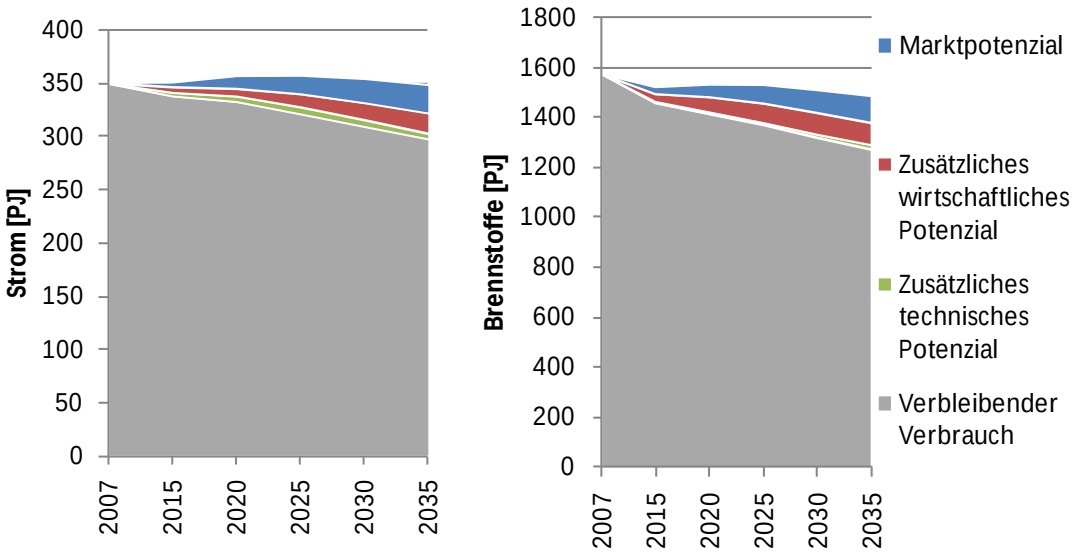
Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Diese Energieeinsparungen sind direkt mit der Vermeidung von Treibhausgasen verbunden. Abbildung 2-9 zeigt die Treibhausgasvermeidung aller modellierten Prozesse, aufgeteilt nach direkten brennstoffbedingte Emissionen, indirekten strombedingten Emissionen und direkte prozessbedingten Emissionen. Prozentual ist die Vermeidung bei den prozessbedingten Emissionen am höchsten, was auf die Verringerung der Lachgasemissionen bei der Salpetersäure- und der Adipinsäureherstellung zurückzuführen ist. Diese Vermeidungsoptionen sind bei den hier für die Berechnung zugrundegelegten Preisen für Emissionszertifikate wirtschaftlich und es ist davon auszugehen, dass die betroffenen Anlagen relativ schnell nachgerüstet werden. Insgesamt ergibt sich bis zum Jahr 2035 ein technisches Einsparpotenzial von 25 % der Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse. Dieses ist zum Großteil wirtschaftlich erschließbar.

Die resultierenden absoluten THG-Einsparungen je Szenario sind in Tabelle 2-2 dargestellt. Folglich weisen sämtliche betrachtete Einspartechnologien ein Potenzial zur Vermeidung von 36 Mt CO_2-eq. Jährlichen Emissionen bis 2035 auf. Hiervon entfällt mit 17,2 Mt der größte Teil auf direkte energiebedingte Emissionen aus der Verbrennung von Energieträgern. Der zweitgrößte Anteil (13,6 Mt) entfällt auf prozessbedingte Emissionen, die nicht in einem Verbrennungsprozess entstehen. Indirekte THG-Einsparungen über die Reduzierung des Stromverbrauchs weisen mit 5,3 Mt die nied-

rigsten Potenziale auf. Bis zum Jahr 2020 betragen die vermiedenen THG-Emissionen etwa 22 Mt CO_2-eq. (technisches Potenzial) bzw. 20,7 Mt (wirtschaftliches Potenzial) (jeweils einschließlich direkter THG-Emissionen aus Brennstoffen und eingesparten Prozessemissionen, sowie indirekten THG-Emissionen aus Stromeinsparungen). Verglichen mit den noch benötigten 170 Mt CO_2-eq., welche zum Erreichen des 40 %-Reduktionsziels bis 2020 nötig sind, ist dies ein Anteil von 13 %, der größtenteils durch wirtschaftliche Maßnahmen realisierbar ist. Hinzu kommen weitere Einsparpotenziale in der Industrie aus effizienten Querschnittstechnologien, Brennstoffwechsel, dem Einsatz von Sekundärstoffen etc.

Abbildung 2-8: Brennstoff- und Stromverbrauch – Einsparpotenziale und verbleibender Verbrauch aggregiert über alle Prozesse

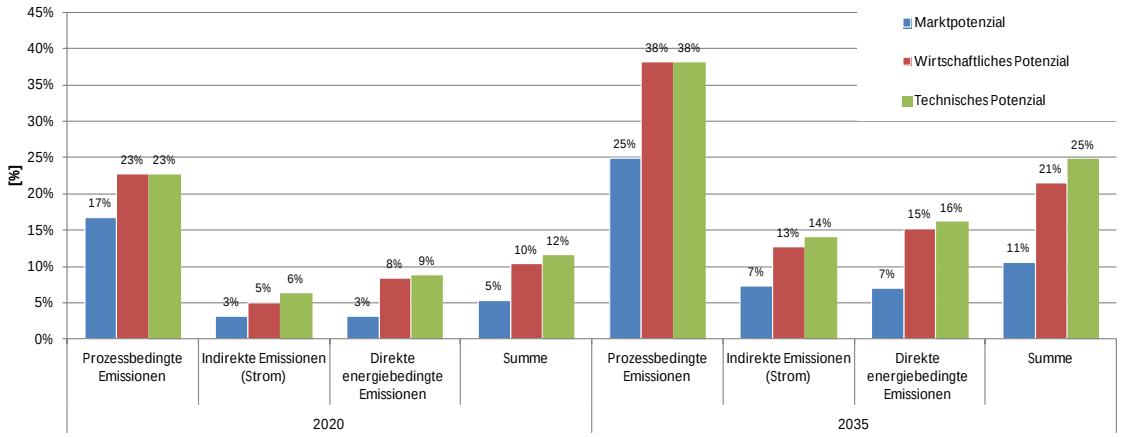


Strom [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	350,6	351,0	356,8	357,1	354,2	348,7
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	-	3,9	11,1	16,3	21,4	25,3
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	-	5,0	6,9	12,1	16,0	18,8
Zusätzliches technnisches Potenzial	-	2,8	4,5	5,8	5,5	4,8
Summe Einsparpotenzial	-	11,6	22,5	34,1	42,9	48,9

Brennstoffe [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	1.578,1	1.523,5	1.533,7	1.532,4	1.511,0	1.486,8
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	-	28,2	51,0	75,2	92,3	108,7
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	-	30,3	60,3	77,7	86,6	88,2
Zusätzliches technnisches Potenzial	-	4,5	6,3	7,1	11,5	16,5
Summe Einsparpotenzial	-	63,1	117,6	160,1	190,4	213,5

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 2-9: Potenziale der Treibhausgasvermeidung für die Jahre 2020 und 2035



Die angegebenen prozentualen Einsparungen beziehen sich auf die jeweiligen THG-Emissionen aller untersuchten Prozesse im jeweiligen Jahr im Frozen-Efficiency-Szenario.

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 2-2: Treibhausgaseinsparungen je Szenario über alle betrachteten Prozesse

	2020			2035		
THG-Einsparungen [Mt]	**Markt-potenzial**	**Wirtschaftliches Potenzial**	**Technisches Potenzial**	**Markt-potenzial**	**Wirtschaftliches Potenzial**	**Technisches Potenzial**
Prozessbedingte Emissionen	5,9	7,9	7,9	8,9	13,6	13,6
Indirekte Emissionen (Strom)	1,9	3,0	3,8	2,8	4,8	5,3
Direkte energiebedingte Emissionen	3,6	9,8	10,2	7,5	16,2	17,2
Summe	11,4	20,7	21,9	19,1	34,6	36,1

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

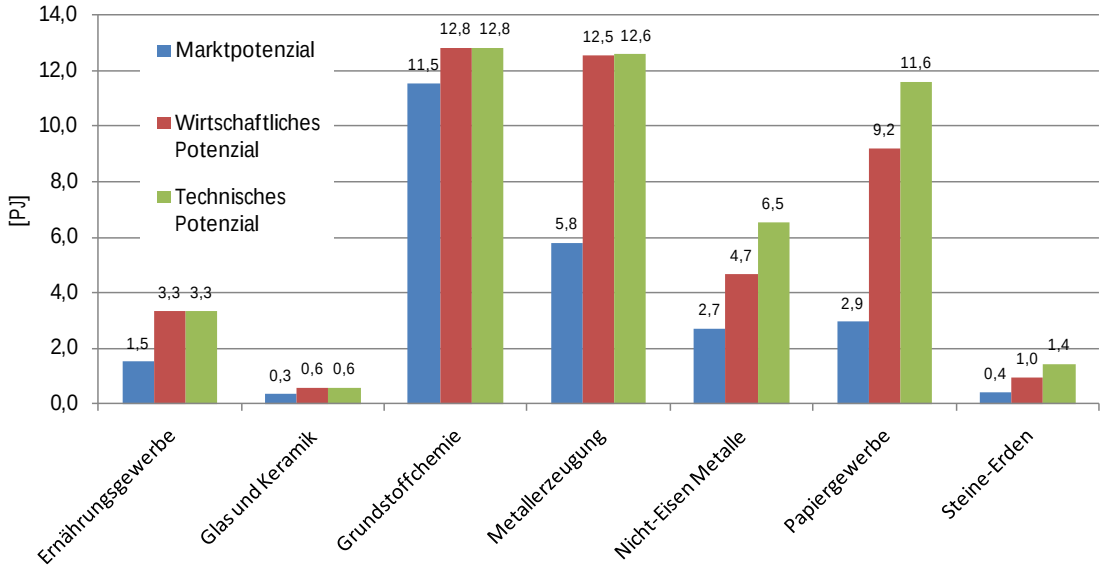
Einsparpotenziale – Vergleich der Industriebranchen

Im Folgenden werden die Einsparpotenziale nach den betrachteten Industriebranchen differenziert dargestellt. Abbildung 2-10 und Abbildung 2-11 zeigen die absoluten Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe im Vergleich zum Frozen-Efficiency-Szenario für das Jahr 2035.

Bei den Stromeinsparungen sind die größten Potenziale in der Grundstoffchemie, der Metallerzeugung und dem Papiergewerbe vorhanden. Diese spiegeln den vergleichsweise hohen Stromverbrauch dieser Branchen wider. Bei der Metallerzeugung ist mehr als die Hälfte der Potenziale auf das endabmessungsnahe Gießen zurückzuführen, welches eine deutliche Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung von Stahl-Halbzeugen zur Folge hat. In der Grundstoffchemie sind die Potenziale auf mehrere Prozesse verteilt. Hohe Einsparungen sind bei der Chlorherstellung, aber auch der Produktion von Sauerstoff, Polyethylen und Polypropylen vorhanden. In der Papierherstellung sind die Potenziale vorwiegend auf effizienteres Mahlen des Holzes sowie Nachmahlen der Faserstoffe zurückzuführen.

Bei den Brennstoffen liegen die höchsten Einsparpotenziale bei der Metallerzeugung und der Grundstoffchemie.

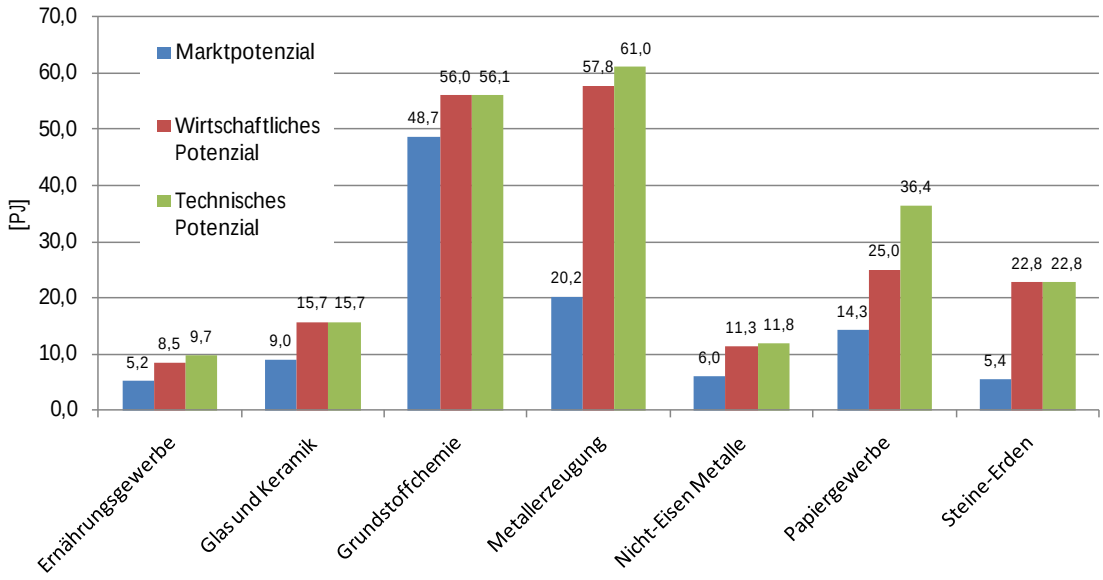
Abbildung 2-10: Strom-Einsparpotenziale nach Industriebranchen im Jahr 2035



Die angegebenen Einsparungen sind als Differenz des jeweiligen Szenarios zum Stromverbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario im Jahr 2035 berechnet.

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 2-11: Brennstoff-Einsparpotenziale nach Industriebranchen im Jahr 2035



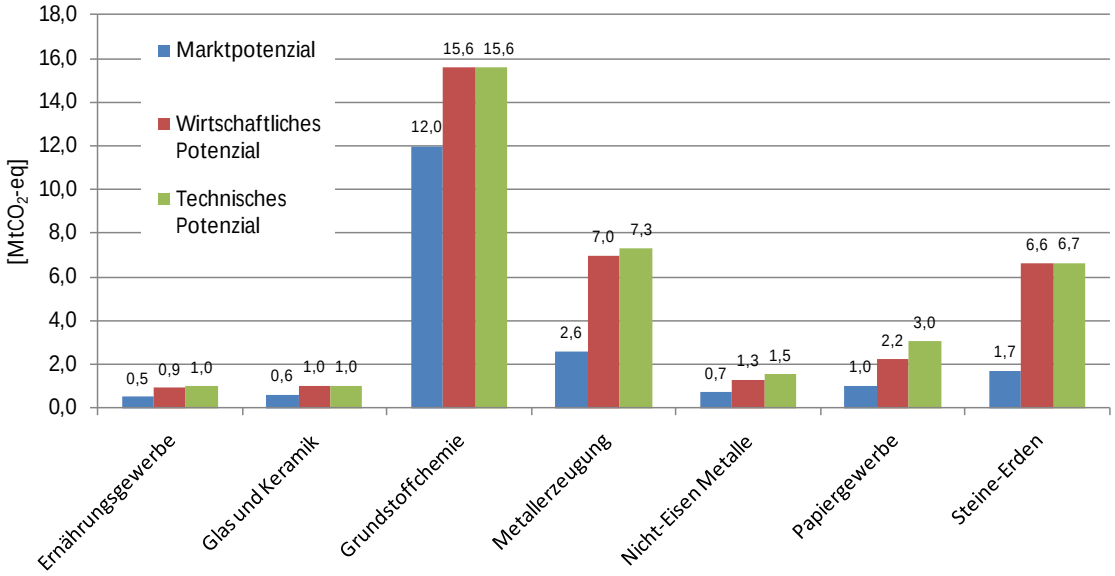
Die angegebenen Einsparungen sind als Differenz des jeweiligen Szenarios zum Brennstoffbedarf im Frozen-Efficiency-Szenario im Jahr 2035 berechnet.

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Bei der Metallerzeugung resultieren die größten Potenziale aus optimierter Abwärmenutzung, sowie dem endabmessungsnahen Gießen und einer Optimierung der Energieflüsse im gesamten Hüttengasverbund inklusive Gichtgasrückführung. In der Grundstoffchemie sind die wichtigsten Einsparoptionen neue effizientere Anlagen für die Ammoniakherstellung sowie eine Optimierung der Ethylenproduktion, die eine Nutzung derzeit abgefackelter Reststoffe sowie eine ausgebaute Wärmerückgewinnung einschließt. Insgesamt ist in der Grundstoffchemie das Marktpotenzial sehr hoch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele der Einsparoptionen aus dem Austausch von ganzen Anlagen resultieren. Für diesen Austausch spielen energetische Überlegungen nur eine untergeordnete Rolle.

Betrachtet man die Treibhausgasvermeidung nach Branchen, so dominiert hier die Grundstoffchemie (Abbildung 2-12). Zu den bereits hohen Einsparungen bei Strom und Brennstoffen kommen weiterhin sehr hohe Einsparungen von prozessbedingten Emissionen, insbesondere von Lachgas bei der Salpetersäure- und Adipinsäureherstellung. Auch in der Steine-Erden-Industrie sind bei der Klinkerherstellung relativ hohe prozessbedingte CO_2-Emissionen verbunden, welche durch neue Verfahren reduziert werden können.

Abbildung 2-12: Treibhausgasvermeidung nach Sektoren im Jahr 2035



Die angegebenen Einsparungen sind als Differenz des jeweiligen Szenarios zu den THG-Emissionen im Frozen-Efficiency-Szenario im Jahr 2035 berechnet.

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Einsparpotenziale – Vergleich der Einsparoptionen

Zur Identifikation der Einsparoptionen mit den höchsten Einsparpotenzialen werden im Folgenden sowohl für Strom als auch für Brennstoffe die 30 wirkungsvollsten Einsparoptionen aufgelistet.

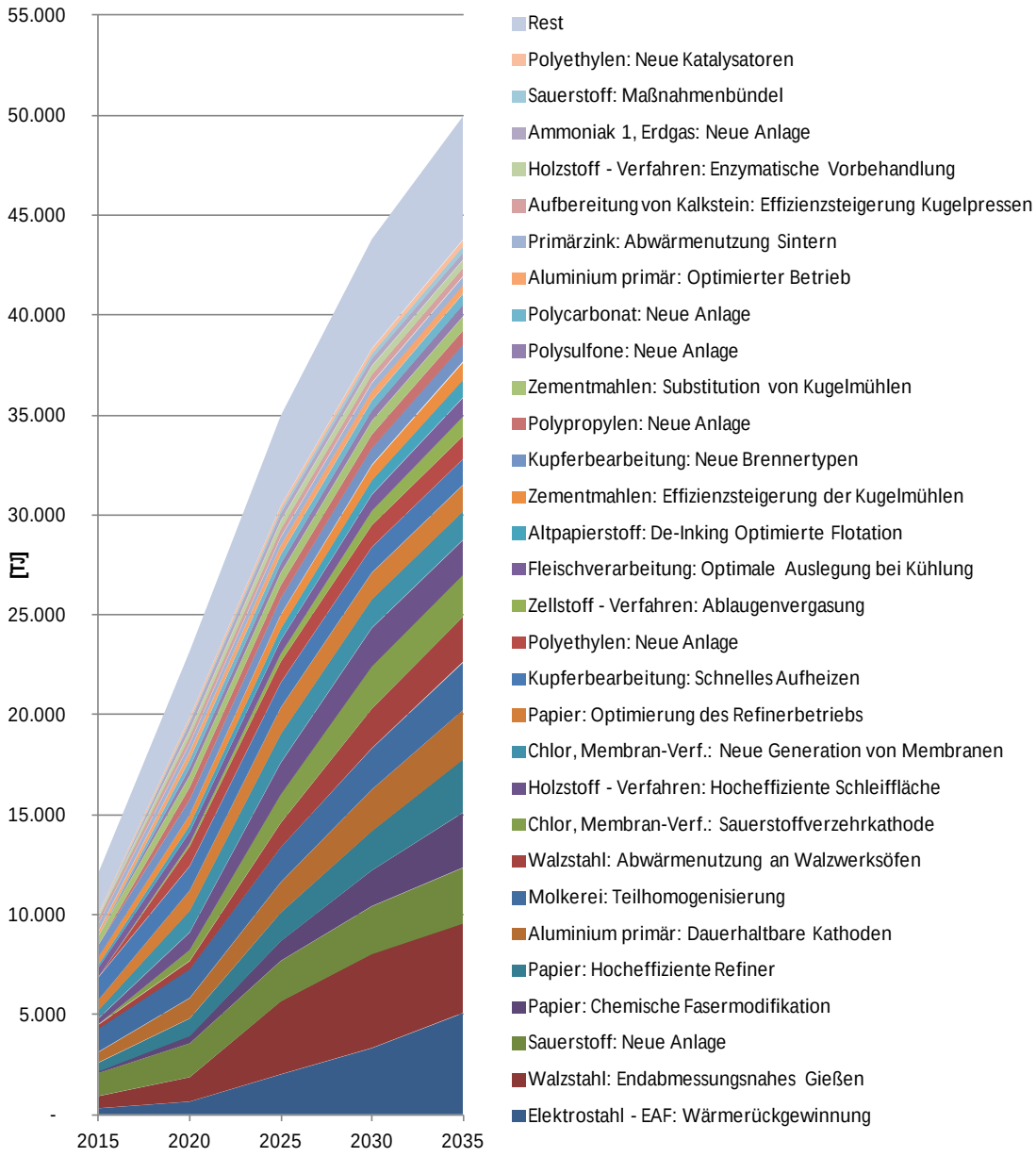
Beim Strombedarf ergibt sich für das Jahr 2035 ein technisches Einsparpotenzial von knapp 50 PJ (13,9 TWh), verteilt auf 110 einzelne Einsparoptionen. Davon entfallen etwa 88 % auf die in Abbildung 2-13 gezeigten 30 wirkungsvollsten Einsparoptionen. Beim Stromverbrauch liegen die größten Einsparpotenziale bei einer Wärmerückgewinnung beim Elektrostahlverfahren, dem endabmessungsnahen Gießen bei der Walzstahlherstellung und auf neue, effizientere Anlagen bei der Herstellung von Sauerstoff.

Für den Brennstoffbedarf erreichen die berücksichtigten 163 Einsparoptionen ein technisches Einsparpotenzial von 213 PJ im Jahr 2035. 72 % hiervon entfallen auf die 30 bedeutendsten Maßnahmen (siehe Abbildung 2-14). Beim Brennstoffbedarf sind die größten Einsparpotenziale in der Papierherstellung vorhanden, durch innovative Trocknungsverfahren als auch eine Optimierung der Wärmenutzung in den Papierfabriken. Drei weitere Optionen mit hohen Potenzialen entfallen auf die Eisen/Stahlindustrie.

Einsparpotenziale – Fazit

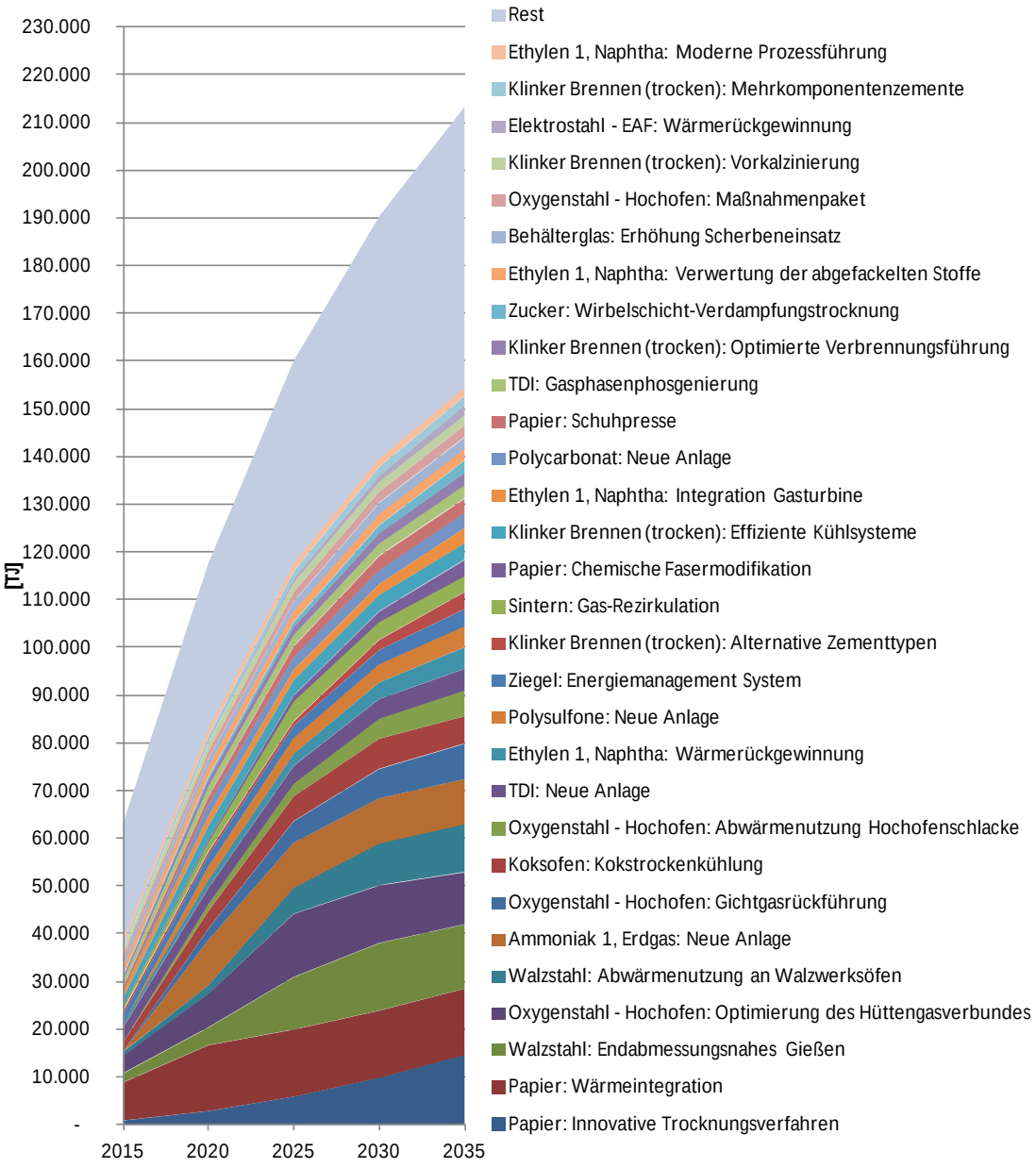
Insgesamt zeigt sich, dass über alle Branchen hinweg erhebliche Einsparpotenziale bei den energieintensiven Prozessen vorhanden sind. Diese ergeben sich sowohl aus einer relativ kurzfristig möglichen Optimierung der Prozesse und Möglichkeiten der Abwärmenutzung, als auch aus dem Einsatz neuer Technologien und Verfahren, die eher langfristig wirken. Diese Potenziale sind jedoch deutlich niedriger als die substantiellen Effizienzgewinne, die bei einigen Prozessen in den letzten 50 Jahren realisiert wurden. Eine dynamische Effizienzverbesserung wird meistens in Zeiten starken Produktionswachstums beobachtet, wenn viele neue Anlagen errichtet werden und dadurch die mittlere Effizienz im Anlagenbestand ansteigt. In Zukunft wird jedoch für die meisten energieintensiven Produkte tendenziell mit einer Stagnation der Produktion gerechnet. Entsprechend ist der Spielraum für neue Anlagen niedrig und Effizienzverbesserungen beruhen vorwiegend auf Modernisierungen bestehender Anlagen. Trotzdem sind auch bei den energieintensiven Prozessen noch bedeutende Einsparpotenziale vorhanden, deren Erschließung sinnvoll erscheint um die von der Bundesregierung angestrebten Effizienzziele zu erreichen. Gerade der hohe Anteil wirtschaftlicher Einsparoptionen sollte auch für die Unternehmen attraktiv zu erschließen sein und würde zu Kostenreduktionen führen.

Abbildung 2-13: Technisches Strom-Einsparpotenzial der 30 wirkungsvollsten Einsparoptionen über alle Sektoren



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 2-14: Technisches Brennstoff-Einsparpotenzial der 30 wirkungsvollsten Einsparoptionen über alle Sektoren



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Die ***Nutzung von Abwärme*** birgt in den meisten Branchen noch hohe Potenziale, die häufig relativ kurzfristig erschlossen werden können und eine akzeptable Wirtschaftlichkeit aufweisen – gerade bei steigenden Preisen für Energie und Emissionszertifikate. Besonders groß sind die Potenziale zur Abwärmenutzung in der Eisen/Stahlindustrie (bei Walzwerk, Hochofen, Koksofen, Sinteranlage), der Grundstoffchemie, der Papierherstellung (Trocknung der Papierbahn) und der Zement- und Ziegelherstellung. Häufig kann die Abwärme auch auf relativ niedrigem Niveau genutzt werden, um Rohstoffe vorzuheizen oder zu trocknen.

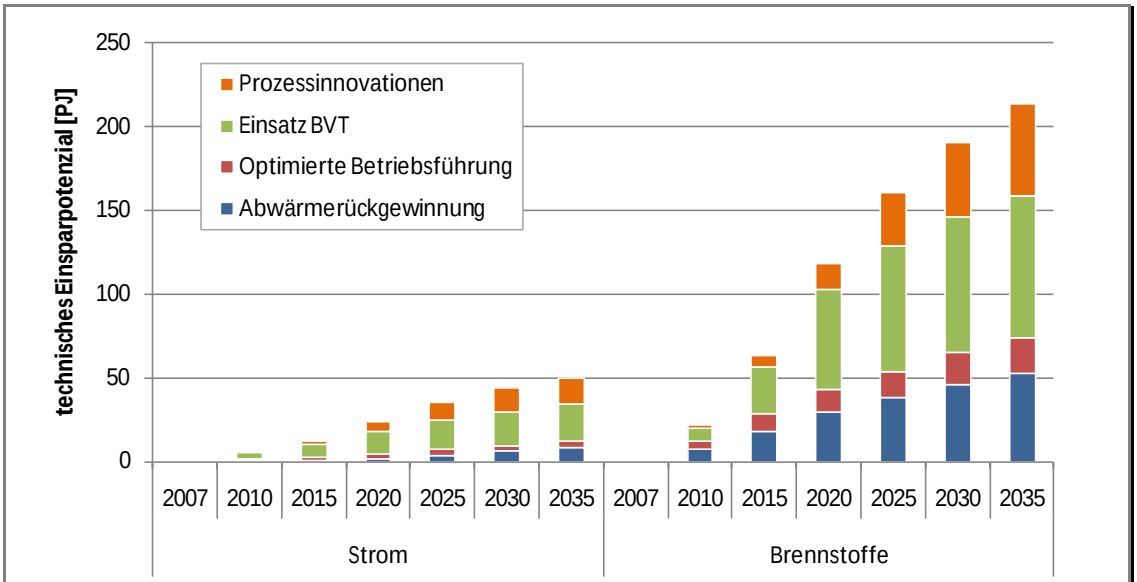
Weitere relativ kurzfristige Potenziale wurden in der ***Optimierung des Anlagenbetriebs*** gefunden. Obwohl energieintensive Unternehmen tendenziell bereits höhere Anstrengungen unternehmen, um die Anlagen auch energetisch optimal zu betreiben, sind hier in einigen Prozessen noch Potenziale vorhanden, die nicht vernachlässigt werden sollten. Diese Gruppe der Einsparpotenziale umfassen Energiemanagementsysteme, optimierte Betriebsführung und verminderte Leerlaufverluste z. B. durch eine bessere Auslastung von Öfen.

Mittel- bis langfristig können weitere Potenziale wirtschaftlich erschlossen werden, die aus dem ***Einsatz bester verfügbarer Technologien (BVT)*** resultieren. Hierfür wurde im Modell angenommen, dass kein vorzeitiger Austausch von Anlagen stattfindet und damit die Diffusion der Technologien und Verfahren an die derzeitige Umwälzung des Anlagenbestandes gebunden ist. Hierdurch ergeben sich zum einen relativ niedrige Kosten für die Effizienzverbesserungen, da nicht die Vollkosten einer Effizienztechnologie bewertet werden, sondern die Differenzkosten zur konventionellen Technologie. Aufgrund der teilweise sehr langen Lebensdauer der industriellen Anlagen von 30 bis 50 Jahren ergibt sich allerdings auch eine relativ langsame Diffusion dieser Techniken. Viele können jedoch auch bei grundlegenderen Revisionen an bestehenden Anlagen ausgetauscht werden, diese finden häufig in einem Zeitraum von 10 bis 20 Jahren statt. Viele der modellierten Effizienztechnologien weisen schon heute eine relativ hohe Verbreitung auf, trotzdem ist davon auszugehen, dass es noch weitere 10 bis 20 Jahre dauern wird, bis sie ihre volle Verbreitung erreicht haben werden.

Besonders ***Prozessinnovationen*** über derzeit verfügbare Technologien hinaus stellen eine große Herausforderung an eine technologiebasiere Modellierung, da die Technologieparameter und die Verbreitung sehr ungewisse Größen sind. Zu den Kosten sind meistens nur Erwartungen der Hersteller vorhanden. Da diese Prozessinnovationen jedoch gerade langfristig sehr bedeutend sind, wurden einige in der Modellierung berücksichtigt. Hierunter fallen neue Trocknungsverfahren in der Papierherstellung, die Nutzung und Herstellung neuer Zementsorten, das endabmessungsnahe Gießen im Stahlwalzwerk, die Nutzung von Supraleitung für die Erwärmung von Aluminiumblö-

cken zur Weiterverarbeitung, dauerhafte Kathoden bei der Primäraluminiumelektrolyse, oder der Einsatz der Sauerstoffverzehrkathode bei der Chlorherstellung.

Abbildung 2-15: Technisches Einsparpotenzial nach Technologiegruppen aller modellierten Prozesse



	2007	2010	2015	2020	2025	2030	2035
Strom [PJ]	-	5,4	12,2	23,2	35,0	43,8	49,9
Abwärmerückgewinnung	-	0,4	1,0	1,7	3,9	6,0	8,1
Optimierte Betriebsführung	-	0,7	1,6	2,6	3,2	3,4	3,7
Einsatz BVT	-	4,1	7,7	14,1	17,3	19,7	22,2
Prozessinnovationen	-	0,3	1,8	4,8	10,5	14,6	16,0
Brennstoffe [PJ]	-	22,0	63,3	117,8	160,2	190,4	213,3
Abwärmerückgewinnung	-	6,8	17,5	29,2	37,7	46,3	52,3
Optimierte Betriebsführung	-	5,6	10,9	14,2	16,2	18,7	21,1
Einsatz BVT	-	7,6	27,9	59,0	75,3	81,2	85,5
Prozessinnovationen	-	1,9	7,0	15,4	30,9	44,2	54,5
Endenergie [PJ]	-	27,4	75,4	141,0	195,1	234,2	263,3

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Darüber hinaus sind für den sehr langen Zeitraum auch ***radikale Prozesssubstitutionen*** denkbar. Diese wurden jedoch nicht modelliert, da sie ein grundlegend neues Verständnis der derzeit angewendeten Prozesse verlangen. Gleichzeitig blicken einige der industriellen Prozesse auf eine über 100jährige mehr oder weniger kontinuierliche Entwicklungsphase zurück, was einen Eindruck von der Häufigkeit solch radikaler Prozessumstellungen gibt. Da aber im Allgemeinen die zusätzlichen Effizienzgewinne bei den Prozessen mit der Zeit geringer werden, erscheint die Grundlagenforschung zu Alternativen bei den sehr energieintensiven Prozessen (und Produkten) sehr wichtig – besonders um langfristige Klimaziele zu erreichen.

Weitere Einsparpotenziale können sich aus Prozesssubstitutionen (z. B. Sekundäranstatt Primäraluminium), dem Einsatz von Sekundärstoffen (sowohl energetisch als auch für die stoffliche Verwendung) und der Substitution von Brennstoffen ergeben.

Folglich zeigt die Analyse der Einsparoptionen, dass weitere Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz vorhanden sind und diese häufig wirtschaftlich realisierbar sind. Aufgrund der bei den meisten Prozessen unterstellten eher stagnierenden Produktion ist zu erwarten, dass diese Effizienzgewinne auch absolut in einer Reduktion des Energieverbrauchs der energieintensiven Industrie münden. Inwieweit die Potenziale erschlossen werden wird von der Entwicklung des Umfeldes und dem Abbau von Hemmnissen abhängen und damit dem Stellenwert der Energieeffizienz in den Unternehmen, sowohl beim Betrieb und der Investitionsentscheidung als auch bei der Forschung und Entwicklung neuer Verfahren.

2.3.2 Kosten der Einsparpotenziale

Wie bereits beschrieben, zeigen die Ergebnisse der Modellierung, dass ein Großteil der Einsparpotenziale wirtschaftlich erschließbar ist. Im Folgenden werden die Kosten sowie die Wirtschaftlichkeit detaillierter ausgewertet. Hierbei werden zwei Perspektiven unterschieden.

1. ***Unternehmensperspektive bzw. Investorperspektive:*** Wirtschaftlichkeit bedeutet in diesem Fall, dass der Barwert über alle Auszahlungen und Einzahlungen positiv ist. Auszahlungen sind die Differenzinvestition und der Wartungsaufwand, während die Energiekosteneinsparungen als Einzahlungen einfließen. Die Investitionsrechnung wurde für die meisten Einsparoptionen über einen Zeitraum von fünf oder zehn Jahren durchgeführt und eine Diskontierung von 12 % hinterlegt. Diese Betrachtung stellt die Grundlage für die im übrigen Teil des Berichts berechneten „Wirtschaftlichen Potenziale". Da für viele Unternehmen jedoch die Amortisationszeit das entscheidende Kriterium für die Durchführung von Investitionen ist, wird diese im Folgenden nochmals diskutiert.

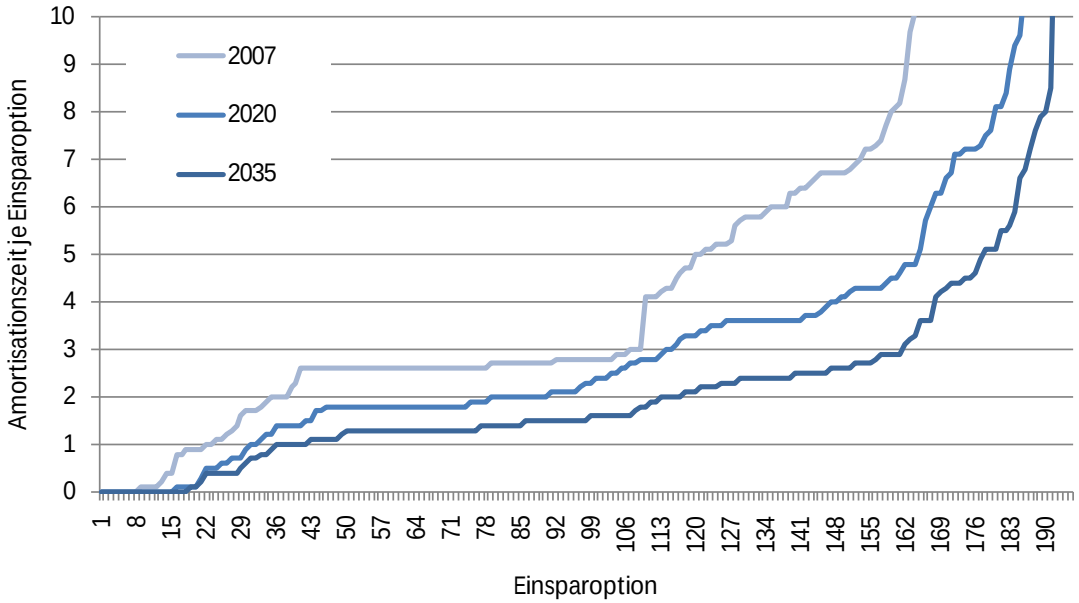
2. ***Gesamtwirtschaftliche Perspektive:*** Den in diesem Kapitel erstellten Kosten-Potenzial-Kurven liegt eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung zugrunde. Hierfür wurde ein niedrigerer Zinssatz von 3 % gewählt und sämtliche Erträge und Kosten bis zum Jahr 2035 werden auf das Jahr 2007 diskontiert. Während die Unternehmensperspektive Investitionen zu einem gewählten Zeitpunkt betrachtet, wird bei dieser gesamtwirtschaftlichen Betrachtung der gesamte Zeitraum bis zum Jahr 2035 berücksichtigt.

Amortisationszeit

Die Wirtschaftlichkeitskriterien, die Unternehmen für die Bewertung von Effizienzinvestitionen ansetzen, unterscheiden sich zumeist deutlich von einer Barwertbetrachtung, die die gesamte Lebensdauer der Investition berücksichtigen würde. Gespräche mit Unternehmen haben gezeigt, dass in vielen Bereichen eine Amortisationszeit von zwei bis drei Jahren gefordert wird, damit eine Investition durchführbar ist. Wenngleich die Amortisationszeit eher ein Maß für das Risiko einer Investition ist, so wird hier auch deutlich, wie hoch die Anforderungen der Unternehmen an den Kapitalrückfluss sind. Viele der Anlagen weisen eine Lebensdauer von deutlich über zehn Jahren, in einigen Fällen auch über zwanzig Jahren auf.

Eine Auswertung der Amortisationszeiten der modellierten Einsparoptionen ist in Abbildung 2-16 dargestellt.

Abbildung 2-16: Verteilung der Amortisationszeit (in Jahren) je Einsparoption



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Die Abbildung zeigt die Amortisationszeit aller 203 untersuchten Einsparoptionen, wobei diese nach Amortisationszeit sortiert wurden. Bei den hinterlegten Energiepreisen würden im Jahr 2007 nur 38 Einsparoptionen ein gefordertes Kriterium von höchstens zwei Jahren Amortisationszeit erfüllen. Für die Jahre 2020 und 2035 verringert sich die Amortisationszeit der Maßnahmen deutlich, sodass im Jahr 2035 bereits 117 Einsparoptionen eine Amortisationszeit von höchsten zwei Jahren aufweisen. Verantwortlich für diese Kostenreduktion sind zum einen die Rahmendaten wie steigende Energie- und Emissionszertifi-

katepreise sowie die Investitionen, welche gerade für sehr innovative Technologien mit höherer Verbreitung noch deutlich sinken werden.

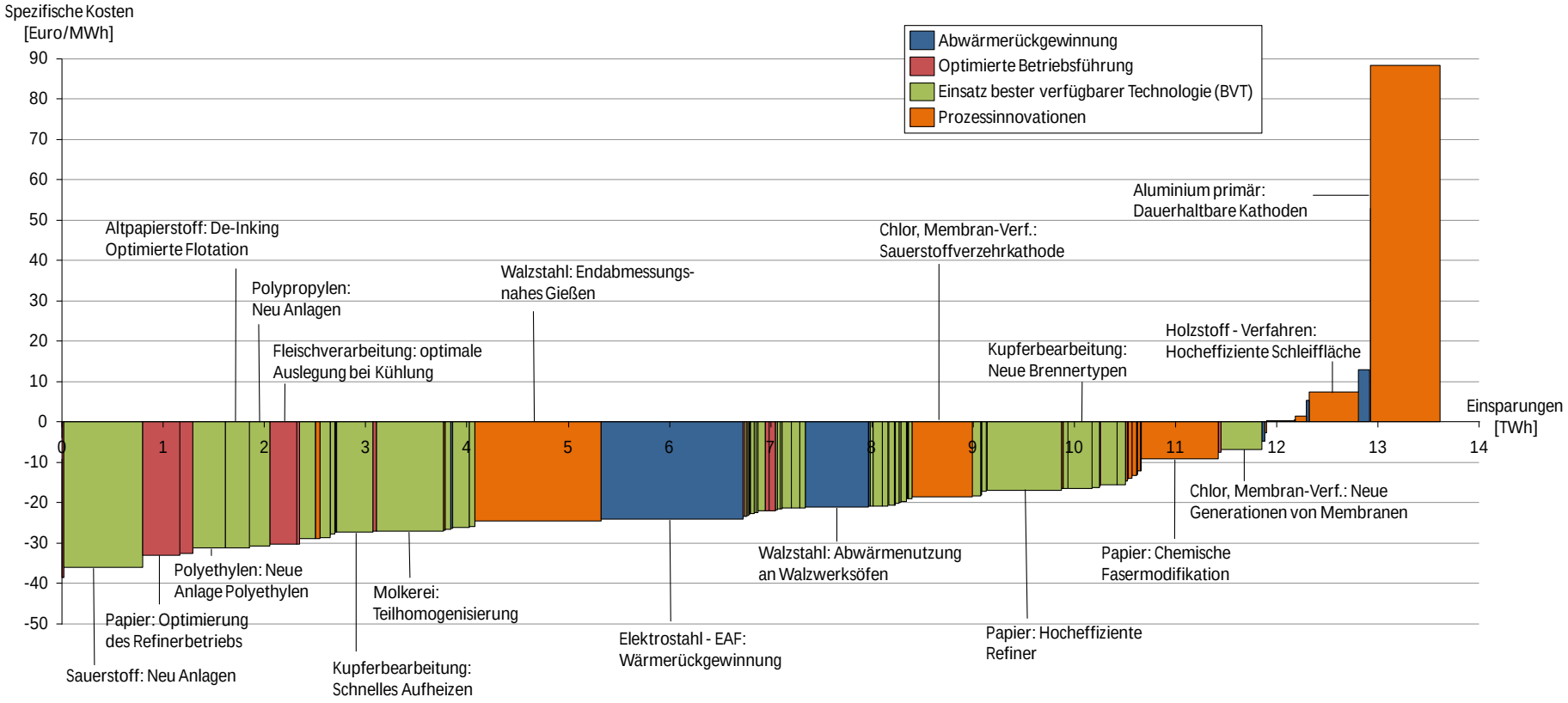
Diese Ergebnisse sind nicht auf einzelne Unternehmen übertragbar und auch für einzelne Einsparoptionen, die hier mit einer mittleren Amortisationsdauer angegeben sind, ist davon auszugehen, dass sie in Abhängigkeit von der Unternehmensstruktur eine hohe Varianz aufweisen. Die generelle Erkenntnis dieser Darstellung, dass bei sehr restriktiven Anforderungen an die Amortisationszeit viele eigentlich wirtschaftliche Maßnahmen ausgeblendet werden, ist jedoch gültig.

Kosten-Potenzial-Kurven

Um die Wirtschaftlichkeit der Energieeinsparungen besser bewerten zu können werden die Einsparpotenziale sowie die Kosten im Folgenden in Form von Kosten-Potenzial-Kurven dargestellt. Eine Kosten-Potenzial-Kurve zeigt die betrachteten Einsparoptionen von links nach rechts anhand der spezifischen Kosten je eingesparter Energie sortiert. Auf der Abszisse werden die kumulierten Energieeinsparungen aufgetragen, d. h., die über alle Maßnahmen summierten jährlichen Einsparungen. Auf der Ordinate werden die spezifischen Kosten der jeweiligen Einsparoptionen bezogen auf die eingesparte Energie aufgetragen. Daraus ergibt sich der für die Kostenkurven typische Treppenverlauf, bei dem jede Stufe eine einzelne Einsparoption darstellt. Folglich können alle Einsparoptionen unterhalb der Abszisse als wirtschaftlich bezeichnet werden. Die spezifischen Kosten der Energieeinsparungen enthalten bereits Energiepreise sowie Preise für Emissionszertifikate (siehe Tabelle 1-2 und Tabelle 1-3) .Weiterhin beinhalten die ausgewiesenen Werte die einmaligen sowie die laufenden Kosten der Investitionen in Einspartechnologien. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden Auszahlungen (Investitionen) und Einzahlungen (eingesparte Energiekosten) als Barwert auf das Jahr 2007 abgezinst.

Hierbei wird nicht wie im übrigen Teil des Berichts ein Zinssatz von 12 % angelegt (welcher die Unternehmensperspektive bei der Investitionsbewertung berücksichtigen soll), sondern ein niedrigerer Zinssatz von 3 %. Dieser spiegelt die gesamtwirtschaftliche Perspektive wieder, die in den Kosten-Potenzialkurven zum Ausdruck kommt. Laut Umweltbundesamt (2007) wird für Zeiträume bis 20 Jahren eine Diskontierung von 3 % empfohlen. Für generationenübergreifende Bewertungen sollte ein anderer Ansatz gewählt werden. Da jedoch der Zeitraum dieser Studie mit 28 Jahren noch nicht als eine generationenübergreifenden Betrachtung angesehen wird, haben wir 3 % für die Diskontierung gewählt.

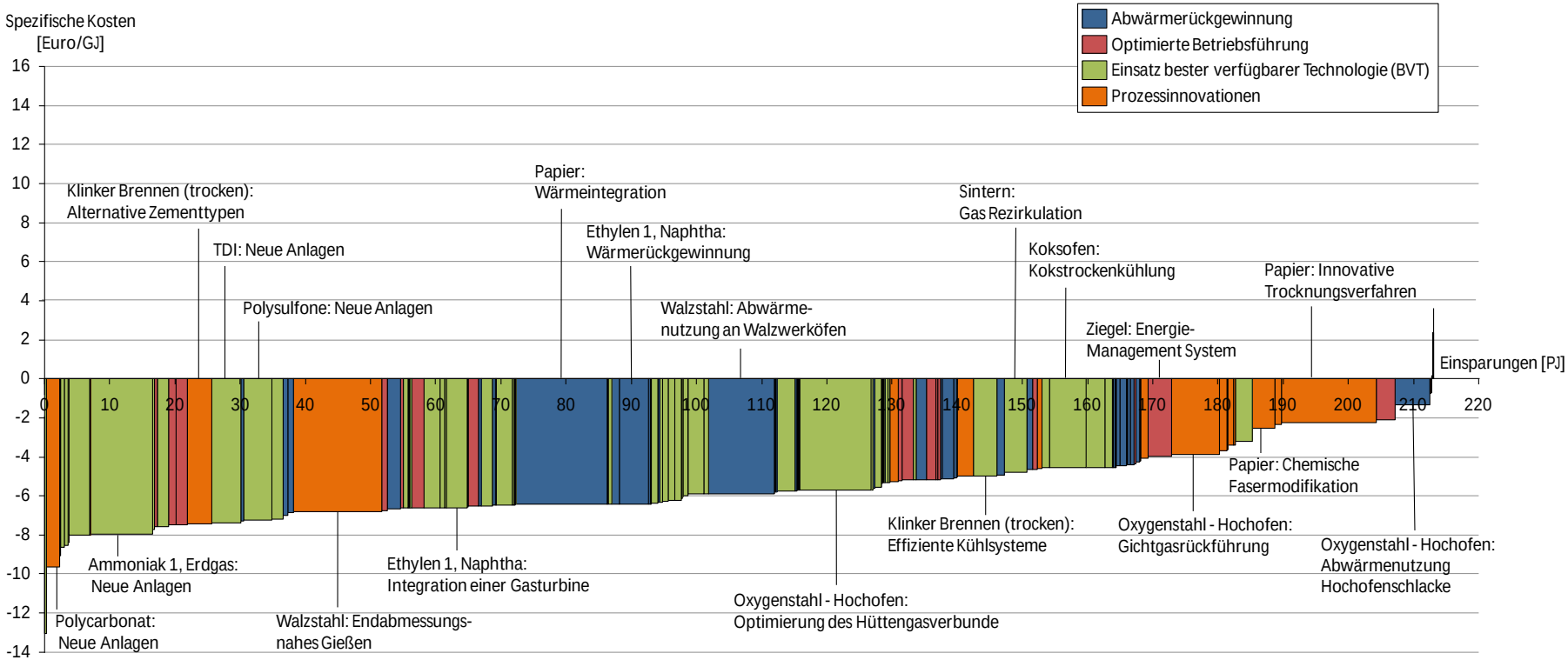
Abbildung 2-17: Kostenkurve der Stromeinsparoptionen bis zum Jahr 2035 (Energie- und EUA Preise enthalten)



Die Stromeinsparungen sind als Einsparpotenzial am Strombedarf im Jahr 2035 angegeben.

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

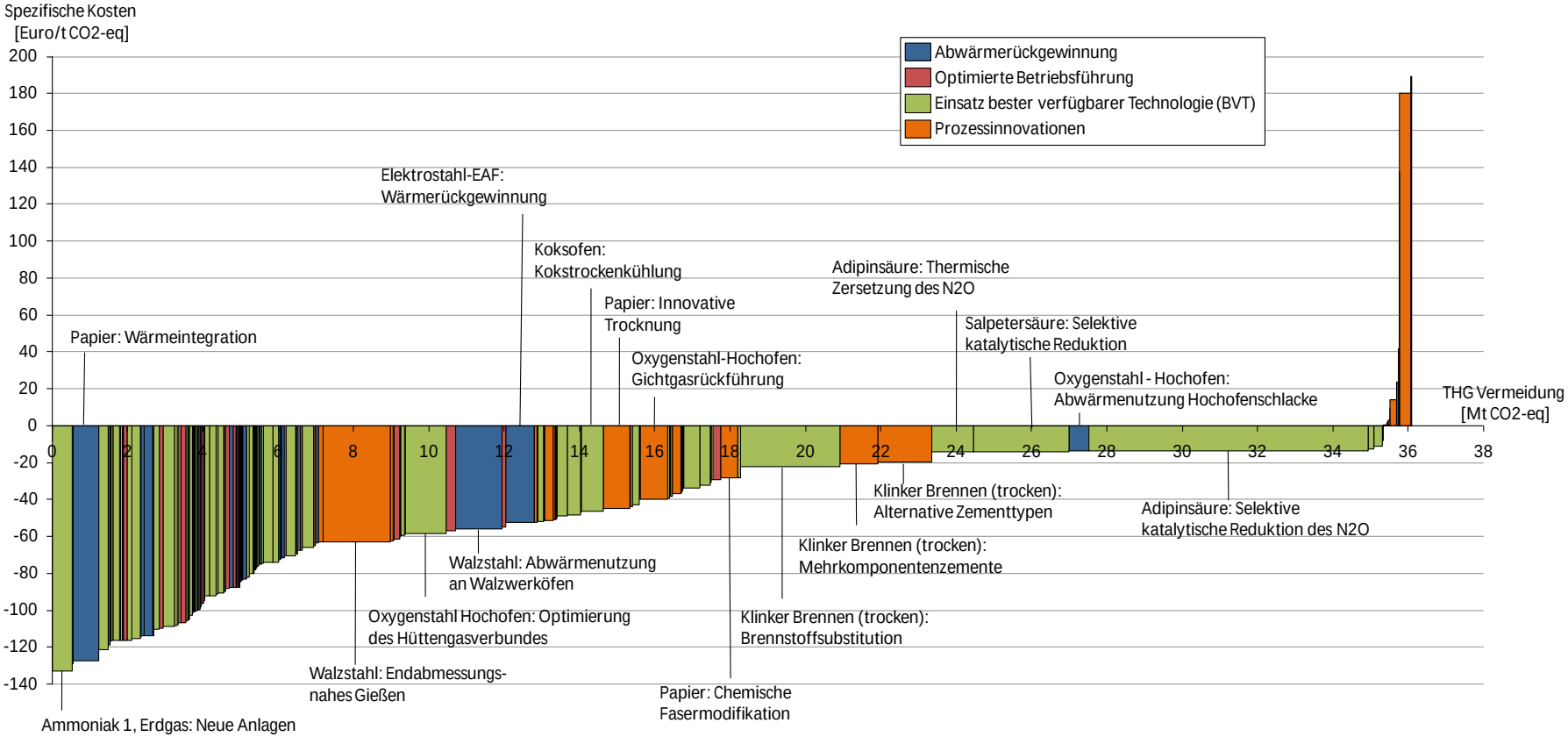
Abbildung 2-18: Kostenkurve der Brennstoff-Einsparoptionen bis zum Jahr 2035 (Energie- und EUA Preise enthalten)



Die Brennstoffeinsparungen sind als Einsparpotenzial am Brennstoffbedarf im Jahr 2035 angegeben.

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 2-19: Kostenkurve der THG-Einsparoptionen bis zum Jahr 2035 (Energie- und EUA Preise enthalten)



Die THG-Vermeidung ist als Einsparpotenzial an den THG-Emisionen im Jahr 2035 angegeben.

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Im Gegensatz zu einer Investitionsentscheidung aus Unternehmensperspektive geht es also nicht darum, die Erträge und Kosten einer einzelnen Investition zu bewerten, sondern vielmehr aller Investitionen, die bis zum Jahr 2035 getätigt wurden. Hierfür ist es notwendig, über die Abzinsung Investitionen, die zu verschiedenen Zeitpunkten getätigt wurden, vergleichbar zu machen.

Im Folgenden sind die resultierenden Kosten-Potenzial-Kurven für Strom- und Brennstoffeinsparungen sowie THG-Vermeidung dargestellt. Die gezeigten Einsparpotenziale entsprechen dem technischen Potenzial für die einzelne Einsparoption. Das wirtschaftliche Potenzial ergibt sich aus dem Schnittpunkt mit der Abszisse. Es zeigt sich für die drei Bereiche, dass nur ein geringer Teil der untersuchten Einsparoptionen nicht wirtschaftlich realisierbar ist. Die meisten Einsparoptionen hingegen sind mit deutlichen Kostenreduktionen verbunden.

Im Folgenden wird die Berechnung der Kosten-Potenzial-Kurven erläutert.

Die auf der Ordinate aufgetragenen spezifischen (mittleren) Kosten (k) ergeben sich aus den jährlichen (Netto-)Kosten (K) und den jährlichen Energieeinsparungen (EE) summiert über den Zeitraum von 2007 bis 2035. Alle Werte werden je Einsparoption berechnet (SO), welche jeweils eine Stufe der Kosten-Potenzial-Kurven entsprechen.

$$k_{2007,SO} = \sum_{t=2007}^{2035} \frac{k_{t,SO}}{\sum_{t=2007}^{2035} EE_{t,SO}}$$

Die jährlichen Kosten K einer Einsparoption wiederum ergeben sich aus der Summe der einmaligen (IK) und laufenden Kosten (LK) der Investition, den eingesparten Energiekosten (EK) und (falls der Prozess am Emissionshandel teilnimmt) den Kosten für Emissionszertifikate (ZK). Diese jährlichen Kosten werden schließlich auf das Jahr 2007 abgezinst.

$$k_{t,SO} = \left(IK_{t,SO} + LK_{t,SO} - EK_{t,SO} - ZK_{t,SO}\right) \cdot \frac{1}{(1+0{,}03)^{t-2007}}$$

Für die Berechnung der einmaligen Kosten der Investition (IK) für ein Jahr t sind folgende Aspekte zu beachten.

1. Bei einer einzelnen Investition treten die einmaligen Kosten nur zu Beginn auf. Verbreitet sich die Einsparoption im Jahr t weiter durch den Anlagenbestand, so fallen in diesem Jahr Kosten durch Investitionen (IK^{neu}) in neue Einspartechnologien an.
2. Hat eine Einspartechnologie aus einer früheren Investition das Ende ihrer Lebensdauer im Jahr t erreicht, so muss für die entsprechende Kohorte mit den spezifischen Kosten im Jahr t neu investiert werden. Je nach Lebensdauer und Betrach-

tungszeitraum können in einem Jahr auch mehrere „alte“ Kohorten ausgetauscht werden.

3. Investitionen zum Ende des Betrachtungszeitraumes, deren Lebensdauer über das Jahr 2035 hinausgeht, werden nur mit dem Anteil α berücksichtigt.

$$IK_{t,SO} = \left(IK_{t,SO}^{neu} + IK_{t,SO}^{ReInvest}\right) \cdot \propto$$

Punkt 1 wird Rechnung getragen, indem im Jahr t nur die jährlichen Einsparungen, die seit dem Jahr t-1 neu hinzukommen mit spezifischen Investitionskosten (spIK) bewertet werden. Da die spezifischen Investitionskosten (spIK) in [€/Tonne Produktion] angegeben sind, müssen sie über das spezifischen Energieeinsparpotenzial (spEP) in [€/$GJ_{Einsparung}$] umgerechnet werden.

$$IK_{t,SO}^{neu} = \left(EE_{t,SO} - EE_{t-1,SO)}\right) \cdot \frac{spIK_{t,SO}}{spEP_{SO}}$$

Für Punkt 2 muss zunächst berechnet werden, wie viele „alte“ Kohorten das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben und im Jahr t ersetzt werden. Die Anzahl der zu ersetzenden Kohorten wird im Folgenden mit β bezeichnet und ergibt sich aus den im Jahr t vergangenen Jahresschritten und der Lebensdauer (LD) der Einspartechnologie.

$$\beta_{t,SO} = \frac{t - 2007}{LD_{SO}}$$

Ist die Anzahl der zu erneuernden Kohorten bekannt, können die Reinvestitionen berechnet werden. Für jede zu erneuernde Kohorte ergeben sich die Investitionskosten aus den Energieeinsparungen, die mit der Kohorte induziert wurden, und den spezifischen Investitionskosten im Jahr t.

$$IK_{t,SO}^{ReInvest} = \sum_{i=1}^{\beta_{t,SO}} \left(EE_{SO,t-LD} - EE_{SO,t-LD-1)}\right) \cdot \frac{spIK_{t,SO}}{spEP_{SO}}$$

Um für Investitionen, deren Lebensdauer über das Jahr 2035 hinaus geht die Investitionskosten nur anteilig zu berechnen wird der Faktor α genutzt.

$$\alpha_{t,SO} = \frac{2035 + 1 - t}{LD_{SO}}$$

Die jährlichen laufenden Kosten der Investition ergeben sich entsprechend aus den gesamten Energieeinsparungen des Jahres t und den spezifischen laufenden Kosten je eingesparter Energie

$$LK_{t,SO} = EE_{t,SO} \cdot \frac{spLK_{t,SO}}{spEP_{SO}}$$

Um die eingesparten Energiekosten zu berechnen müssen die Energieeinsparungen nach Energieträgern unterschieden werden, da diese unterschiedliche Preise (EP) aufweisen. Insgesamt werden im Modell 13 Energieträger (ET) unterschieden (siehe Tabelle 1-2 mit einer Übersicht der Preisannahmen).

$$EK_{t,SO} = \sum_{ET=1}^{13} EE_{t,SO,ET} \cdot EP_{t,ET)}$$

Für die Berechnung der eingesparten Kosten der CO_2-Zertifikate (ZK) im Rahmen des EU-Emissionshandels werden nur die Prozesse berücksichtigt, die am Emissionshandel teilnehmen. Die angenommenen EUA-Preise[10] sind in Tabelle 1-3 zusammen gefasst. Weiterhin dürfen nur Einsparungen (THGE), die aus direkten THG-Emissionen resultieren, berücksichtigt werden, wodurch THG-Vermeidung durch Fernwärme- oder Stromeinsparungen ausgeschlossen wird.

$$ZK_{t,SO} = THGE_{t,SO}^{direkt} \cdot EUAP_t$$

Die Energieeinsparungen (EE) zum Jahr t, die auf der Abszisse der Kosten-Potenzial-Kurve dargestellt sind, ergeben sich aus dem spezifischen Einsparpotenzial (spEP) bezogen auf die Produktion bzw. Kapazität eines Prozesses. Das spezifische Einsparpotenzial berechnet sich als Vergleich des Energieverbrauchs des jeweiligen Prozesses mit bzw. ohne Verwendung der Einsparoption. Absolute Einsparungen ergeben sich erst, indem die Einsparoption durch den Anlagenbestand diffundiert. Dieser ergibt sich aus der Diffusion (Diff) und der absoluten Produktionsmenge des jeweiligen Prozesses (P). Die Energieeinsparungen (EE) zum Zeitpunkt t sind somit bezogen auf eine Frozen-Efficiency-Entwicklung im Jahr t und sind nicht als absolute Differenz zum Basisjahr berechnet. Einsparungen, die durch eine Verbreitung der entsprechenden Einsparoption schon vor dem Basisjahr realisiert wurden, werden ausgeschlossen.

$$EE_{t,SO} = spEP_{SO} \cdot \left(Diff_{t,SO} - Diff_{t=2007,SO)}\right) \cdot P_{t,p}$$

Die Diffusion durch den Anlagenbestand (Diff) sowie die Produktion (P) und das spezifische Einsparpotenzial (spEP) sind exogene Vorgaben. Die Berechnung der THG-Einsparungen ist entsprechend der Energieeinsparungen aufgebaut.

10 EUA (European Union Allowances) ist die Bezeichnung für Emissionszertikate im EU-Emissionshandelssystem.

2.3.3 Einsparpotenziale und Szenarien für die Industrie insgesamt

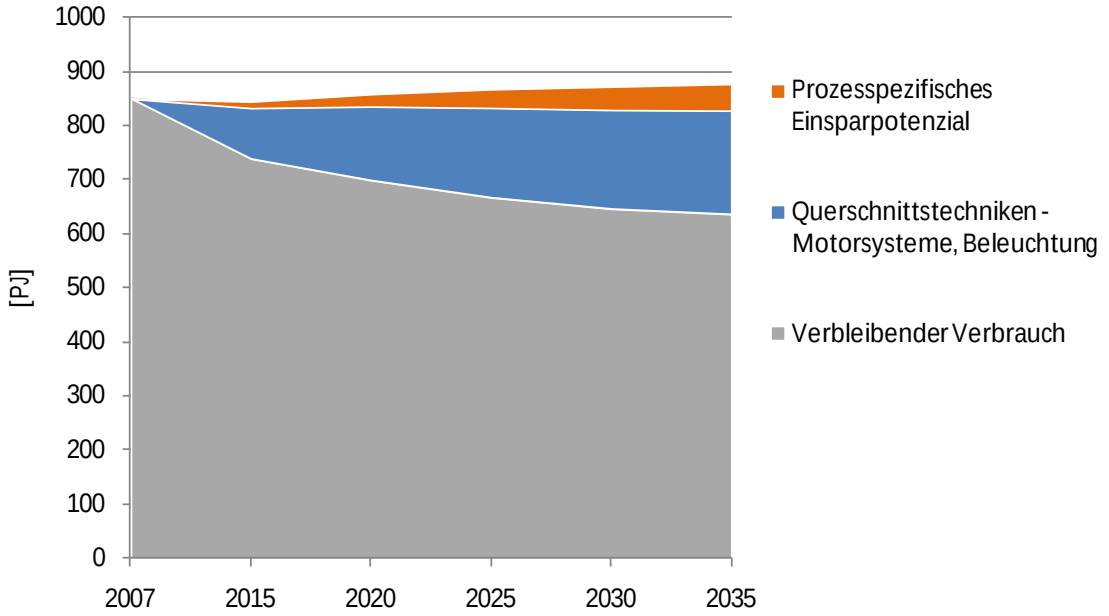
Wurden in den beiden vorigen Kapiteln nur die Potenziale für die untersuchten Prozesse sowie deren Energiebedarf dargestellt, sollen diese Potenziale in diesem Kapitel in den Kontext der gesamten Industrie gesetzt werden. Hierzu werden neben den prozessspezifischen Einsparoptionen auch Querschnittstechniken in die Berechnungen einbezogen. Weiterhin wird der gesamte Energiebedarf der Industrie ausgewiesen und damit auch weitere weniger energieintensive Sektoren wie der Maschinenbau oder der Fahrzeugbau in die Berechnungen aufgenommen.

Die Technologiedaten der betrachteten Querschnittstechniken stammen aus Vorläuferprojekten und wurden im Rahmen dieser Studie nicht überarbeitet. Im Einzelnen werden für Stromanwendungen Beleuchtung und elektrische Antriebsysteme unterschieden. Letztere teilen sich wiederum in Pumpen, Ventilatoren, Druckluftsysteme, Kälteerzeugung und weitere Motorsysteme. Die großen Einsparpotenziale liegen hier weniger beim Austausch einzelner Komponenten als vielmehr bei der umfassenden Systemoptimierung. Auf der Wärmeseite wird nur die Wärmebereitstellung modelliert, nicht aber die Wärmenutzung. Dies bedeutet, dass die Wärme- und Dampferzeugung auf einzelne Technologien aufgeteilt wird, deren Effizienz mit der Zeit zunimmt. Einen Spezialfall stellt die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) dar. Hierzu werden zunächst KWK-Potenziale je Sektor berechnet, basierend auf den nachgefragten Temperaturniveaus. Aus dem Potenzial ergibt sich die maximale Wärmeerzeugung mittels KWK. Für die Potenzialberechnung wird angenommen, dass der KWK-Anteil je Sektor über der Zeit kontinuierlich ansteigt bis er sich diesem Maximum nähert. Durch einen Vergleich mit separater Wärme- und Stromerzeugung werden schließlich die Einsparpotenziale berechnet.

In Abbildung 2-20 ist der Stromverbrauch und die technischen Einsparpotenziale bei Prozess- und Querschnitttechniken dargestellt. Die obere Linie stellt somit den projizierten Frozen-Efficiency-Stromverbrauch der Industrie dar. Die Differenz zum verbleibenden Verbrauch spiegelt das technische Einsparpotenzial über alle betrachteten Einsparoptionen wider. Insgesamt ergibt sich ein technisches Einsparpotenzial von etwa 27,5 % im Jahr 2035, bezogen auf den Frozen-Efficiency-Stromverbrauch. Bei Vergleich der Höhe der Potenziale wird ersichtlich, dass die Einsparungen aus Querschnittstechniken wie Motorsystemen (Pumpen, Ventilatoren etc.) etwa das Vierfache der Einsparungen bei den untersuchten Prozesstechnologien ausmachen. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Querschnittstechniken etwa 70 % des Strombedarfs ausmachen, während die betrachteten Prozesstechnologien bei 40 % liegen (bei vielen Überschneidungen, da eine eindeutige Zuordnung von Motoren zu Querschnitts- und Prozessanwendungen nicht möglich ist). Weiterhin liegen die Einsparpotenziale bei Motorsystemen zu einem großen Teil in Unternehmen, die energe-

tisch bisher weniger optimiert sind als die energieintensive Industrie, da ihr Energiekostenanteil häufig bei 1-3 % der Produktionskosten liegt. Ähnlich wie bei den Prozesstechnologien sind auch die Potenziale bei den Querschnittstechniken vorwiegend wirtschaftlich. Die unterstellten Einsparungen bei Querschnittstechnologien liegen in der Größenordnung von 30 % bezogen auf die einzelne Anwendung wie Pumpen oder Druckluftsysteme und sind damit als durchaus ambitioniert einzuschätzen.

Abbildung 2-20: Stromverbrauch der Industrie und Einsparpotenziale in Prozess- und Querschnittstechniken (Angaben des technischen Potenzials)



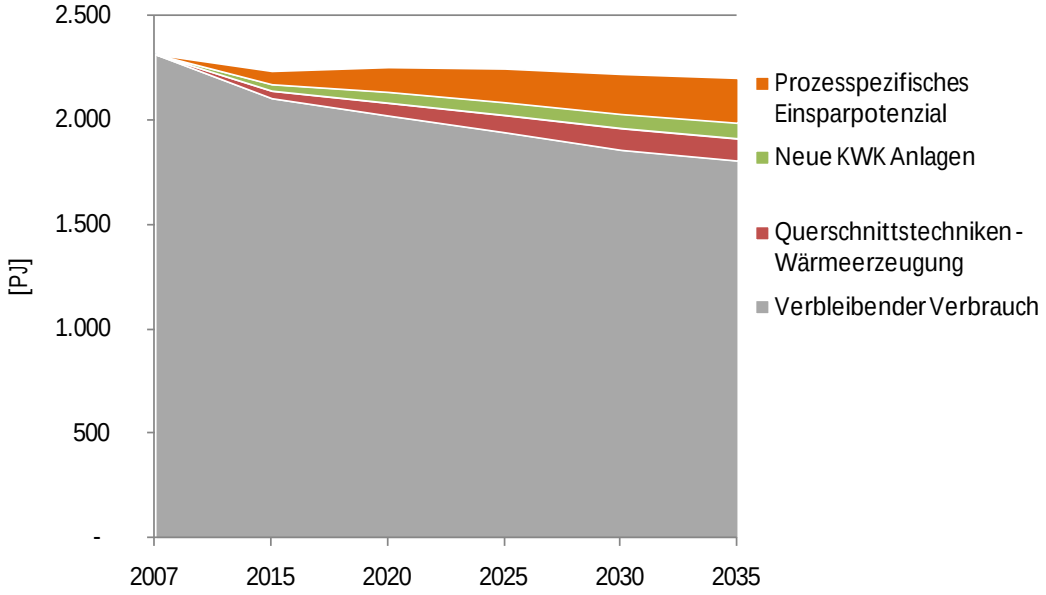
Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

Beim Brennstoffbedarf zeigt sich ein anderes Bild. In der Summe ergeben sich hier Einsparungen von gut 18 %, wovon jedoch etwa 10 Prozentpunkte auf Prozesstechnologien entfallen (Abbildung 2-21). Im Gegensatz zum Stromverbrauch machen die betrachteten Prozesse über 80 % des Brennstoffbedarfs[11] der Industrie aus, was sich entsprechend auf das Einsparpotenzial auswirkt.

In der Summe zeigt sich für den gesamten Endenergiebedarf der Industrie auch im Frozen-Efficiency-Szenario ein leichter Rückgang von 3166 PJ in 2007 auf 3081 PJ in 2035. Je nach Realisierung der Einsparpotenziale kann dieser Wert in 2035 auf etwa 2.400 PJ reduziert werden, was 22 % unter dem Verlauf im Frozen-Efficiency-Szenario liegt.

11 Je nach Bilanzierung der Gichtgasströme in der Metallerzeugung kann der Anteil auch bei etwa 70 % liegen.

Abbildung 2-21: Brennstoffbedarf der Industrie und Einsparpotenziale in Prozess- und Querschnittstechniken (Angaben des technischen Potenzials)



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI

2.3.4 Zur Interpretation der Ergebnisse

Aufgrund der sehr vielfältigen Prozesse und Verfahren, die in der Industrie eingesetzt werden, ergibt sich auch bezüglich des Energieverbrauchs eine sehr heterogene Technologiestruktur mit einer Vielzahl verschiedener Energieverbraucher, die sich aus hinsichtlich der möglichen Einsparoptionen unterscheiden. Weiterhin ist für die Einsparoptionen die Definition des Bilanzraumes bzw. der Systemgrenzen ausschlaggebend. Weiter gefasste Systemgrenzen bieten tendenziell mehr Möglichkeiten, Energie einzusparen. Im Folgenden sind einzelne Aspekte, die bei der obigen Modellierung nicht berücksichtigt wurden beschrieben.

Die ***Prozesssubstitution*** hin zu Sekundärrohstoffen wurde mit wenigen Ausnahmen nicht als Einsparpotenzial quantifiziert sondern ist in gleichem Maße in Form der Produktionsentwicklung in alle Szenarien eingeflossen. Durch Verschiebungen von Primärproduktion hin zu Sekundärproduktion wurden jedoch in der Vergangenheit neben den Rohstoffeinsparungen auch erhebliche Energieeinsparungen erzielt. Dieser Trend wird sich auch in Zukunft fortsetzen und erhebliche Einsparpotenziale freisetzen. Besonders groß sind die Potenziale bei der Stahlherstellung, der Aluminiumherstellung und der Chlorproduktion. Das diese Entwicklungen jedoch aufgrund einer Vielzahl von Gründen stattfinden – von denen die Steigerung der Energieeffizienz nur ein Teil ist – wurde in diesen Fällen die Prozesssubstitution nicht als Einsparoption definiert. Trotz-

dem enthält der angegebene Energiebedarf in den Szenarien die Auswirkungen dieses Trends.

Ähnlich wie die Substitution von Prozessen ist auch der ***Einsatz von Füllstoffen*** nicht als Einsparpotenzial quantifiziert. Dieser findet sich beispielsweise in der Zementherstellung mit der Nutzung von Klinkersubstituten oder in der Papierproduktion mit der Nutzung von Füllstoffen (z. B. Kaolin), die energieintensiven Faserstoffe ersetzen. Annahmen zur Entwicklung des Füllstoffeinsatzes sind in gleichem Maße als Produktionsmenge der Halbstoffe in alle Szenarien eingeflossen.

Maßnahmen, die alleine der THG-Vermeidung dienen, wie die ***Substitution von Brennstoffen*** und der Einsatz von Sekundärbrennstoffen wurde nicht quantifiziert, da sie nicht mit einer Energieeffizienzsteigerung einhergehen.

Die technologieorientierte Analyse verlangt unweigerlich das Setzen von Schwerpunkten und die ***Auswahl von betrachteten Technologien und Einsparoptionen***. Somit gibt es immer weitere, meiste kleinere Einsparoptionen, die nicht betrachtet werden können. Auch neue Technologien, die heute noch nicht bekannt sind, bis zum Jahr 2035 aber durchaus noch eine deutliche Wirkung auf den Energiebedarf haben könnten, können nicht berücksichtigt werden.

Weiterhin wurden ***radikale Prozessinnovationen***, die eine völlig neue Auffassung des grundlegenden Verständnisses der Prozesse voraussetzen nicht modelliert.

Für die Interpretation der berechneten Einsparpotenziale ist es wichtig diese Punkte zu beachten, da sie branchenabhängig noch zu erheblichen weiteren Einsparungen führen können.

2.4 Hemmnisse und fördernde Faktoren in der Industrie

Für die energieintensive Prozessindustrie in Deutschland ist eine Reihe von Faktoren zu nennen, die den Einsatz von Effizienzmaßnahmen begünstigen oder erschweren. Im Folgenden werden die Ergebnisse zu branchenübergreifenden Hemmnissen und fördernden Faktoren für den Einsatz von Effizienztechnologien in der energieintensiven Prozessindustrie in Deutschland dargestellt. Branchenspezifische, produktspezifische oder prozessspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren werden in den jeweiligen Branchenkapiteln thematisiert.

Tabelle 2-3 zeigt zusammenfassend die wichtigsten branchenübergreifenden Hemmnisse und fördernde Faktoren sowie auch ausgewählte branchenspezifische Ausprägungen. Dabei müssen einige Verallgemeinerungen getroffen werden, sodass die jeweilige Situation in Einzelunternehmen durchaus davon abweichen kann.

Tabelle 2-3: Auswahl branchenübergreifender und branchenspezifischer Faktoren für den Einsatz von Effizienzmaßnahmen

Branchenübergreifende Faktoren			
Übergreifende Faktoren	**Hemmend:** · Befürchtung negativer Produkt- oder Prozesseigenschaften (Produktionsausfall, Ausschuss, Qualitätsprobleme etc.) · Unsichere Rahmenbedingungen und Planungsunsicherheiten · Rückgriff ausschließlich auf Amortisationszeiten und Investitionssumme · Nachrangige Durchführung von Effizienzmaßnahmen · Kurze Amortisationsdauer · Vergleich und Abgrenzung von Maßnahmen, Definition von Zieloptima · Hoher Aufwand für Förderanträge und Genehmigungen · Denkweise in Einzelprozessen · Ablaufroutinen **Fördernd:** · Außendarstellung von Effizienzmaßnahmen · Nutzung von Energie/Umwelt-Managementsystemen · Einbeziehung der Mitarbeiter	**Insbesondere Großunternehmen**	**Hemmend:** · Verteilung von Zuständigkeiten · Innerbetrieblicher Informationsfluss · Komplexe Entscheidungsfindung auf Konzernebene · Kurzfristiger Planungshorizont **Fördernd:** · Internes Effizienz-Benchmarking
		Insbesondere KMU	**Hemmend:** · Unzureichender Überblick über Energieverbrauch und Effizienzmaßnahmen · Mangel an prozessspezifischen Detailkenntnissen · Kein spezielles Personal für Energiefragen · Nachrangige Priorität von Effizienzinvestitionen bei begrenztem Budget **Fördernd:** · Motivierte, tragende Mitarbeiter mit hohem Interesse an Effizienzfragestellungen

Grundstoffchemie	**Eisen/Stahlindustrie**	**NE-Metalle**	**Papier**	**Steine-Erden**	**Glas-Keramik**	**Ernährung**
Hemmend: · Unsicherheit bzgl. Emissionshandel, Absatzmärkte · Risiko durch Effizienzmaßnahmen für abgestimmte Produktionsverfahren · Anzahl der Anlagenanbieter **Fördernd:** · Synergien zwischen Energie- und Ressourceneinsparung · Ansehen	**Hemmend:** · Störung des Energieverbundes im integrierten Hüttenwerk · Ordnungsrechtliche Aspekte (Abwärmenutzung bei Sinteranlagen) · Fokussierung der Technologieentwicklung auf CCS und noch nicht gesicherte Zukunftstechnologien	**Hemmend:** · Firmeninterne Zuordnung der Energiekosten · Mittragen von Maßnahmen durch Mitarbeiter	**Hemmend:** · Hoher Entwicklungsaufwand für innovative Lösungen · Verkauf der Produkte nach Gewicht · Akzeptanz von Sekundärbrennstoffen **Fördernd:** · Nebeneffekte von Effizienzmaßnahmen (Kapazität, Platzbedarf, Produkteigenschaften)	**Hemmend:** · Hoher Entwicklungsaufwand, komplexe Fragestellungen · Akzeptanz alternativer Brennstoffe · Komplexität von Effizienzmaßnahmen · Nachfrage nach Standardprodukten bei Kunden als Entwicklungs-Hemmnis **Fördernd:** · Erfüllung von Kundenerfordernissen	**Hemmend:** · Energetisch nur teilweise sinnvolle Produktanforderungen · Unzureichende Auswertung der Messdaten von Industrieöfen · Komplexität von Effizienzmaßnahmen für bestehen Anlagen (Abwärmenutzung, Maßnahmen an Öfen)	**Hemmend:** · Technische Standards für Investitionen / Komponenten fehlen (insbes. KMU) **Fördernd:** · THG-Emissionsziele für Unternehmen

Darstellung einer Auswahl relevanter Faktoren. Branchenspezifische Faktoren sind anhand der Schwerpunkte der Expertengespräche dargestellt und können auch andere Branchen betreffen.

Die in Tabelle 2-3 jeweils für die einzelnen Branchen genannten Faktoren wurden in den Gesprächen verstärkt thematisiert. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sie ausschließlich für diese Branche relevant sind.

Die übergreifenden Ergebnisse werden im Anschluss vor allem anhand der Darstellung der 24 durchgeführten Expertengespräche diskutiert. Darüber hinaus werden jedoch auch weitere Informationsquellen mit berücksichtigt, insbesondere die im Rahmen dieser Untersuchung ebenfalls durchgeführten Expertengesprächen zu Technologiedaten und die Diskussionsinhalte des Workshops.

Zunächst wird jeweils ein kurzer Überblick über die Ergebnisse der Expertengespräche gegeben und diese dann näher thematisiert. Zur Auswertung sei angemerkt, dass einige Fragen spezifisch auf Groß- oder Kleinunternehmen ausgerichtet sind. Ist dies der Fall, wird das bei der jeweiligen Analyse entsprechend vermerkt. Fragen, zu denen die Gesprächsteilnehmer keine Angaben machen konnten oder wollten, sind der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Aus der quantitativen Darstellung lassen sich generelle Tendenzen hinsichtlich der Relevanz und Wichtigkeit unterschiedlicher Faktoren als Hemmnisse für den Einsatz energieeffizienter Technologien aus Sicht der Experten ziehen. Hierbei sei drauf hingewiesen, dass Rohdin und Thollander (2006) zu einer methodisch ähnlich gelagerten Untersuchung anmerken, dass die Quantifizierung von Hemmnissen und fördernder Faktoren große Vereinfachungen impliziert, die stets bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Allerdings ist es gleichzeitig schwierig, diese Informationen auf einem anderen Wege zu erlangen (Rohdin, Thollander 2006).

Informationen als Handlungsgrundlage

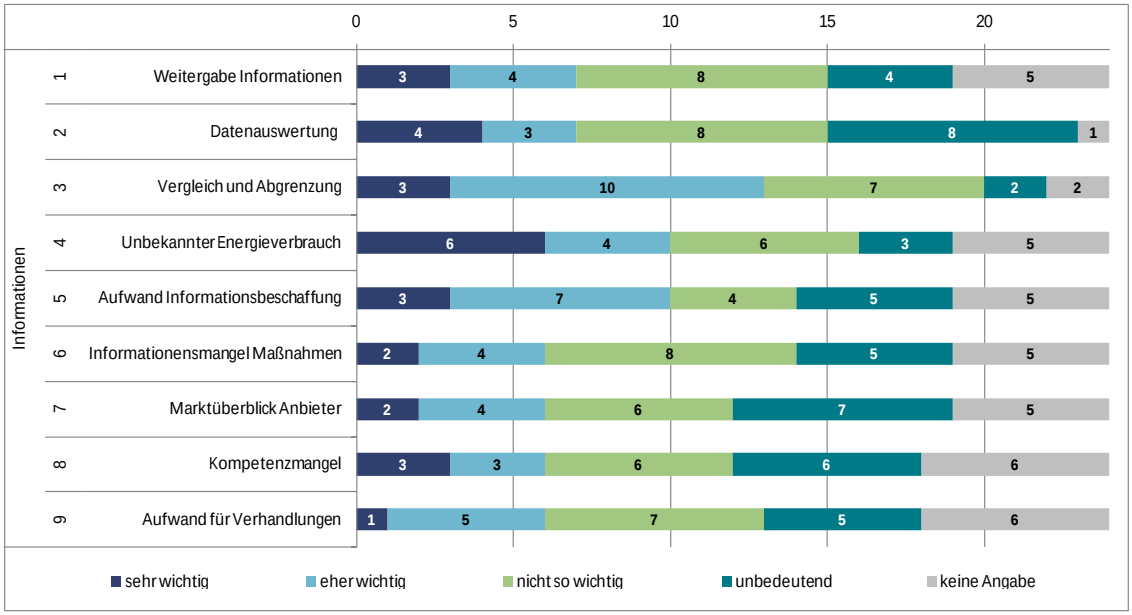
Informationen sind eine wesentliche Voraussetzung zur für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und zur Ausschöpfung von Einsparpotenzialen. Die Einschätzungen der Gesprächspartner zu unterschiedlichen Aspekten in diesem Bereich sind in Abbildung 2-22 wiedergegeben.

Insgesamt halten sich die Einschätzungen zu den unterschiedlichen Fragen in diesem Bereich in etwa die Waage. Dabei betreffen die Fragen 1 bis 3 alle Unternehmen, wohingegen die Fragen 4 bis 9 stärker, aber nicht ausschließlich, auf KMU ausgerichtet sind. Da nicht alle Gesprächspartner für diesen Bereich aus ihren Kenntnissen heraus auf diesen Bereich eingehen wollten, ist hier die Anzahl der Vermerke ohne Angabe höher.

Insgesamt hat sich in der Studie gezeigt, dass sich je nach Betrieb der Wissensstand um das Thema Energieverbrauch und Energieeffizienz deutlich unterscheidet. Dabei ist

insbesondere zu beachten, dass Großunternehmen hinsichtlich der Informationsbeschaffung, -analyse und der Umsetzung von Maßnahmen als besser aufgestellt gelten, als kleinere und mittelständige Unternehmen. Insgesamt wurde in den Gesprächen allerdings auch darauf verwiesen, dass die Situation innerhalb einer Größenklasse und Branche sehr heterogen sein kann.

Abbildung 2-22: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Informationen als Handlungsgrundlage“



Bei größeren Unternehmen gilt das Wissen um Energiefragestellungen als deutlich umfangreicher, während bei KMU oft die Grundproblematik genannt ist, dass ***Energieverbräuche unbekannt*** sind.

Gegenüber KMU ist die Organisationsstruktur im Großunternehmen komplexer und Kompetenzen, Verantwortlichkeiten und Entscheidungsbefugnisse sind stärker verteilt. Dies kann sich dann als Hemmnis wirken, wenn einfache Maßnahmen aufgrund von Verantwortlichkeiten oder interner Standards vom Personal vor Ort nicht umgesetzt werden können. Gleichzeitig kann es auch einen fördernden Faktor erweisen, wenn zentral definierte, ***interne Richtwerte und Leitlinien*** für die Umsetzung von Maßnahmen gelten. Mit Blick auf den Energieverbrauch ist es Unternehmen mit mehreren Standorten darüber hinaus möglich, interne Benchmarks auszuwerten, um so aus Vergleichen ***Rückschlüsse und Zielwerte für Effizienzindikatoren*** zu ziehen.

Diese Möglichkeit steht KMU in der Regel nicht zur Verfügung. Für sie wurde in Einzelfällen darüber berichtet, dass Unternehmen teilweise aus Gründen der Sparsamkeit auf die Erfassung des Energieverbrauchs für Teilprozesse verzichten oder durch ***unzurei-***

chende Kenntnisse Messwerte fehlerhaft erfassen oder auswerten. Dies wird unter anderem damit begründet, dass in KMU ***kein spezielles Personal*** für Energieeffizienzaspekte vorhanden ist.[12] Gerade dort wird die Energiefragestellung vom Produktionsverantwortlichen mit begleitet.

Beim Aufwand für die ***Informationsbeschaffung*** zeichnet sich ein ähnliches Bild wie für die Energieverbräuche: Während Großunternehmen ein guter Überblick über Technologieanbieter zugesprochen wird, zeichnet sich die Situation bei KMU als weniger ausgeprägt. Bei sehr spezifischen Prozessen wurde angemerkt, dass allerdings teilweise wenige oder nur ein Anbieter die entsprechende Anlagentechnik bereitstellen kann. Damit ist die ***Auswahl an Alternativen***, auch mit Blick auf den Energieverbrauch, grundsätzlich begrenzt. Der ***Aufwand für Verhandlungen*** wird generell als Hemmnis eingeschätzt, erscheint aber vergleichsweise weniger bedeutsam.

Insbesondere für den Bereich der KMU werden ***Energieberater*** als externe Informationsquelle gesehen, um diese Kenntnislücke aus herstellerneutraler Sicht zu schließen und Vorschläge für Effizienzmaßnahmen zu machen. Mit Blick auf die Prozessindustrie wurde allerdings bemängelt, dass teilweise die breite Ausbildung von Energieberatern mit den ***Erfordernissen für branchenspezifische Prozessanalysen*** nicht kompatibel sei und spezifische, prozessorientierte Energiefragestellungen nicht adäquat eingeschätzt werden könnten.

Die zielgerichtete ***Weitergabe*** von Information zu Effizienzmaßnahmen und Erfordernissen erweist sich in unterschiedlichen Zusammenhängen als Hemmnis für den Einsatz ressourceneffizienter Technologien. Neben der Weitergabe von technischem Wissen ist hier insbesondere die ***innerbetriebliche Kommunikation*** zwischen verschiedenen Unternehmensbereichen zu nennen. So liegen dem Einkauf teilweise keine Informationen über Energieeffizienzaspekte vor bzw. werden diese Informationen auch nicht vom Anbieter bereitgestellt. Daneben beurteilen Mitarbeiter aus Einkauf und Technik angebotene Lösungen teilweise anhand ***unterschiedlicher Zielsetzungen*** und wählen daher nicht die für das Unternehmen optimale Lösung.

Weitere Hemmnisse sind der ***Vergleich und Abgrenzung*** von Maßnahmen. Insbesondere aus dem Bereich von KMU wurde mehrfach darauf hingewiesen, dass dies teilweise schwierig ist und die Umsetzung von Maßnahmen behindert. In diesem Sinne wurde aufgeworfen, dass Vorschläge für Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der

---

12 Unternehmen mit Energiefachpersonal schätzen ihr Energieeinsparpotenzial höher ein und setzen häufiger Energieeffizienzmaßnahmen um als die Unternehmen ohne solches Fachpersonal (vgl. Schröter et al. 2009).

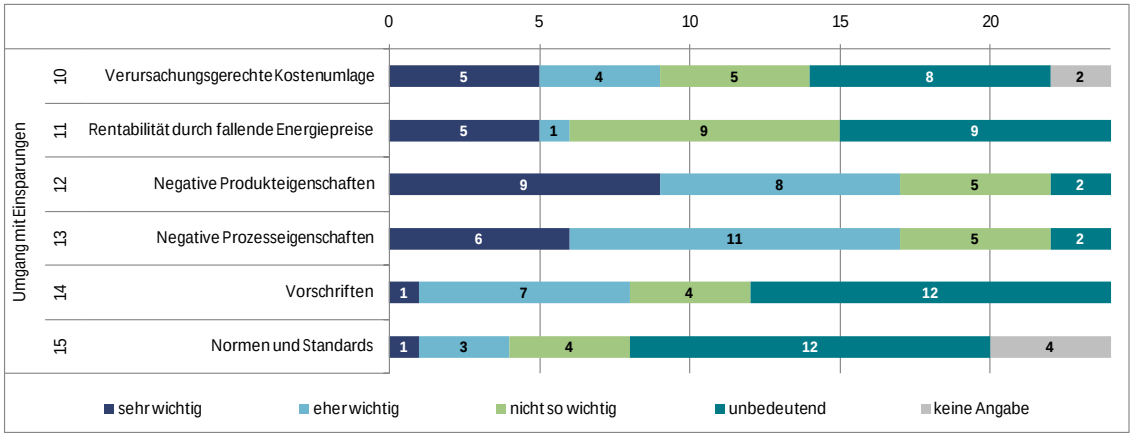
Querschnittstechnologien von unterschiedlichen Herstellern teilweise nicht oder nur ***schwierig einzuschätzen*** seien und Anbieter dieser Technologien gleichzeitig die Beraterrolle übernähmen. Als mögliche Abhilfe werden einheitliche und dokumentierte Bilanzrahmen und Definitionen gesehen.

Bei der Umsetzung von Maßnahmen oft nicht in Richtung der ***Optimierung des Gesamtsystems*** gedacht, sondern es werden primär Einzelmaßnahmen durchgeführt. In diesem Sinne wurde auch die Frage nach der ***Definition des Zieloptimums*** bei Neuanlagen aufgeworfen. Bei der Betrachtung von Gesamtsystemen verhindere die Ausbildung die Optimierung von Gesamtsystemen, da zu stark in ***Einzelprozessen*** gedacht wird und ***Kompetenzen zu stark verteilt*** sind.

Umgang mit Einsparungen, Kosten und Unsicherheiten

Bei Fragen im Bereich des Umgangs mit Einsparungen, Kosten und zu Unsicherheiten wird anhand der Experteneinschätzungen (Abbildung 2-23) deutlich, dass insbesondere Befürchtungen hinsichtlich ***negativer Konsequenzen für Produkt- und/oder Prozesseigenschaften*** durch den Einsatz von Effizienztechnologien als sehr wichtiges Hemmnis für den Einsatz dieser Technologien angesehen werden.

Abbildung 2-23: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Umgang mit Einsparungen, Kosten und Unsicherheiten“



Oft gilt, dass ein funktionierendes System nicht geändert oder abgeschaltet werden sollte. Entsprechende Maßnahmen werden daher nicht umgesetzt. Man wartet auf den „***first mover“*** und positive Erfahrungen. Bei zertifizierten Produktionsprozessen wird zudem der Aufwand für eine Neuabnahme gescheut.

Im Rahmen der Erweiterung des Emissionshandelssystems unterliegen ab der dritten Handelsphase ab 2013 neue Prozesse und Produkte aus dem Bereich der energieintensiven Industrie dem Emissionshandel. Es wurde angemerkt, dass dies derzeit eine

aufschiebende Wirkung auf Effizienz- bzw. emissionsmindernde Maßnahmen hat, da die Zuteilung von Zertifikaten auf Basis der Emissionen in einem Referenzjahr festgelegt wird. Je höher die Emissionen sind, desto stärker können Unternehmen durch den Verkauf von Zertifikaten profitieren. Einzelwirtschaftlich entspricht dies dem Kalkül der Gewinnmaximierung, führt aber volkswirtschaftlich zu einer Verzögerung von Effizienzmaßnahmen.

Mehrfach wurde die ***Planungsunsicherheit*** hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung angesprochen. Wie oben dargestellt sind Energieeffizienzmaßnahmen teilweise mit hohen Investitionen verbunden und rechnen sich erst über einen längeren Planungshorizont. Mehrere Gesprächspartner führten an, dass diese Unsicherheit zu Verzögerungen bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen führen. Sie betrifft beispielsweise die Bereiche der Ökosteuer, des Emissionshandelssystems oder den Bereich der Chemikalienverordnung (REACH). Insbesondere zum Emissionshandel wurde angemerkt, dass dieser dem langfristigen Charakter und der Lebensdauer von Industrieprozessen nicht gerecht werde und die damit verbundene Planungsunsicherheit mit Blick auf die zukünftige Konkurrenzfähigkeit in unterschiedlichen Branchen Investitionen verhindere.

Unsicherheiten über die künftige Entwicklung der Rahmenbedingungen wirken sich insbesondere auf langfristige Investitionen aus. Eine Umstellung von Prozessen erfordert erheblichen Aufwand und rechnet sich oft nur bei angemessener Auslastung und Nutzungsdauer der Anlagen und wenn keine wesentlichen Abweichungen der Energiekosten nach unten erwartet werden.

Gerade der Aspekt der Energiekosten wurde als wichtiger Einflussfaktor genannt, durch die sich Investitionen nicht rechnen. Dieser Faktor ist nur mit Einschränkungen als Hemmnis gemäß der oben genannten Definition zu sehen, da ein Hemmnis per Definition ein Mechanismus ist, „der eine Entscheidung oder ein Verhalten verhindert, dass sowohl energieeffizient als auch ökonomisch effizient ist und somit Investitionen im ökonomisch rentable, energieeffiziente Technologien verhindert.“ In diesem Sinne sind zu geringe Margen oder ein Mangel an Subventionen ebenfalls keine einzelwirtschaftlichen Hemmnisse. Die ***verursachungsgerechte Kostenumlage*** wird jeweils vom Betrieb abhängig in unterschiedlicher Ausprägung umgesetzt, ist aber generell als ein Hemmnis anzusehen.

Mit Blick auf Vorschriften wurde mehrfach das ***Spannungsfeld zwischen Energieeffizienz, Arbeits- und Brandschutz*** genannt. Letzerer verhindere in Einzelfällen die Umsetzung von Maßnahmen. Allerdings wurde aufgeworfen, dass Vorschriften teilweise in den unterschiedlichen Mitgliedsstaaten der EU unterschiedlich streng ausgelegt würden und damit zu Verzerrungen des Marktes führen. Analoges gelte für den inter-

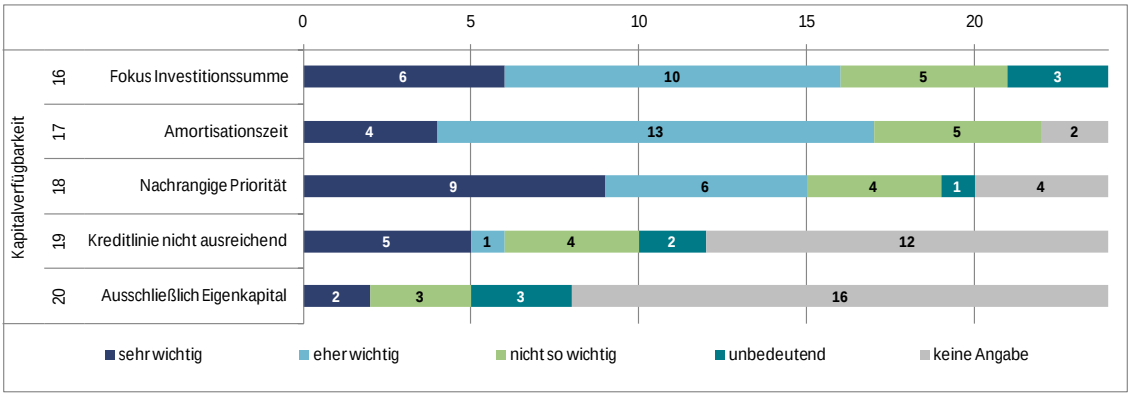
nationalen Markt. Insbesondere mit Blick auf die Beantragung von Fördermitteln und Genehmigungen wurde darauf hingewiesen, dass ***bürokratische Hemmnisse*** Aufwand und Transaktionskosten bei den Unternehmen deutlich erhöhen. ***Normen und Standards*** wurde als Hemmnisse ***keine besondere Relevanz*** beigemessen, allerdings gilt die Entwicklung neuer Normen und Standards mit Blick auf Energieverbrauch oft noch nicht als abgeschossen.

Mit Blick auf das Risiko von Effizienzbemühungen wurde ergänzend angemerkt, dass Effizienzbemühungen insbesondere in Schwellenländern durch die ***Gefahr eines Abflusses von Kompetenzen*** nur bedingt durchgeführt werden. Dadurch werden Effizienzmaßnahmen global gesehen nicht optimal allokiert.

Kapitalverfügbarkeit, -beschaffung und -nutzung

Die Auswahl der Entscheidungskriterien bei Investitionsalternativen und die Finanzierung dieser Alternativen spielt eine wichtige Rolle. Mit Blick auf die Finanzierung ist auf die besondere Situation von KMUs einzugehen. Die Fragen 19 und 20 in Abbildung 2-24 beziehen sich daher insbesondere auf KMU, womit sich die geringe Zahl an Antworten für diese Frage erklärt.

Abbildung 2-24: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Kapitalverfügbarkeit, -beschaffung und -nutzung“



Ein häufig genannter Grund für die langsame Annahme von investiven Energieeffizienzmaßnahmen im Markt wird im ***Fokus auf Investitionssummen*** und Amortisationszeiten gesehen. Oft ziehen effizientere Lösungen höhere Investitionen als vergleichbare Standard-Lösungen mit sich. Diese rechnen sich erst im Verlauf der Zeit. Bei einer Betrachtung der Investitionssumme als einzigem Entscheidungskriterium wird dem langfristigen Unternehmenserfolg keine Rechnung getragen. Insgesamt wird dies von den Gesprächsteilnehmern als sehr wesentliches Hemmnis erachtet. Oft wird bei Großunternehmen durch die kurzfristige Erfolgsorientierung stärker auf die kurzfristige

Rentabilität von Maßnahmen geachtet. Je nach Unternehmensphilosophie werden bei KMU und Familienbetrieben auch langfristigere Maßnahmen umgesetzt.

Die Amortisationszeit als Risikomaßstab gibt an, wie lange es dauert, bis eine Investition vorteilhaft ist. Wird ausschließlich sie zur Bewertung von Investitionsalternativen genutzt, wird langfristig lohnenswerten Einsparungen nicht Rechnung getragen. Grundsätzlich wird dem Fokus auf die ***Amortisationsdauer*** als Hemmnis große Bedeutung zugemessen. Dabei wird von Erfordernissen an die Amortisationszeit von maximal 5 Jahren ausgegangen. Tendenziell werden bei größeren Unternehmen gegenüber KMU tendenziell stärker auch statische und dynamische Methoden der Investitionsrechnung (Barwert, interne Verzinsung) herangezogen. Allerdings zeichnen einzelne Gesprächspartner teilweise sehr unterschiedliche Situationen in den einzelnen Unternehmen und Branchen.

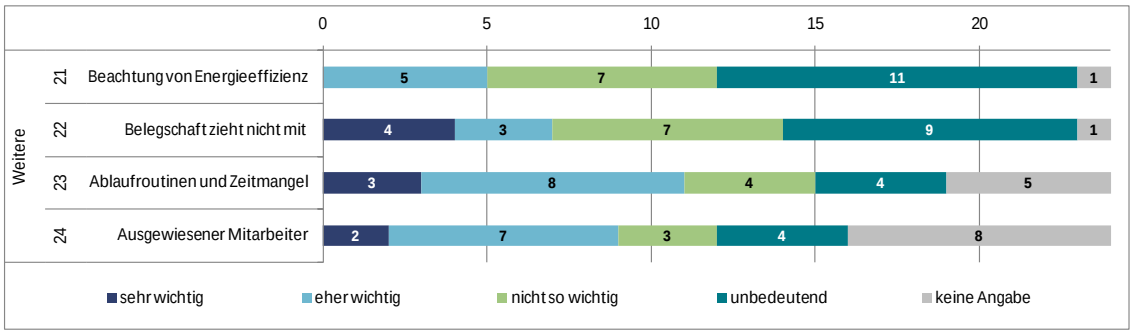
Als weiteres wichtiges Hemmnis kristallisiert sich heraus, dass Energieeffizienzmaßnahmen gegenüber Investitionen in Produktionsmaschinen und Anlagen nachrangig durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang wird bei Unternehmen oft danach unterschieden, ob eine Investition als strategische Investition oder als ***Profit-Investitionen*** angesehen wird. Für strategische Investitionen im Bereich der Kernkompetenzen liegt die Anforderung an die Rentabilität deutlich niedriger, da sie als zentrale Investitionen für den Fortbestand des Unternehmens gesehen werden. Reine Energieeffizienzmaßnahmen unterliegen zusammen mit anderen Profit-Investitionen einer höheren Renditeanforderung, obwohl dies nicht zwangsweise mit einer wirtschaftlichen Nachteiligkeit der Effizienzinvestition gegenüber der strategischen Investition einhergeht.

Zur ***Finanzierung*** von Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen wurde in engem Zusammenhang zur Frage der Priorität von Energieeffizienzmaßnahmen. Bei den Antworten wurde tendenziell stärker Fokus auf die Konkurrenz zwischen strategischen Investitionen und Profit-Investitionen gelegt, denn dass ein generelles Problem der Kapitalverfügbarkeit thematisiert wurde. Die Fokussierung auf die Finanzierung von Effizienzmaßnahmen durch ***Eigenkapital*** wurde nur in Einzelfällen als relevant angesehen. Entgegen den Ergebnissen aus den Expertengesprächen wurde in weiteren Gesprächen allerdings häufig der Punkt angesprochen, dass die Kreditlinien von KMU oft nicht ausreichten, um Investitionen in Effizienzmaßnahmen durchzuführen.

Weitere Hemmnisse

Einschätzungen zu weiteren Hemmnissen sind in Abbildung 2-25 dargestellt, wobei sich die letzen beiden Fragen wiederum speziell auf KMU beziehen.

Abbildung 2-25: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Weitere Hemmnisse“



Energieeffizienz gilt über die Branchen hinweg als intensiv diskutiertes Thema. Eine Nichtbeachtung des Themas, beispielsweise auf Grund zu geringen Prestiges, wird nicht verstärkt wahrgenommen. Durch die Einführung von Energiemanagementsystemen wird die Rolle des Themas grundsätzlich organisatorisch gefestigt.

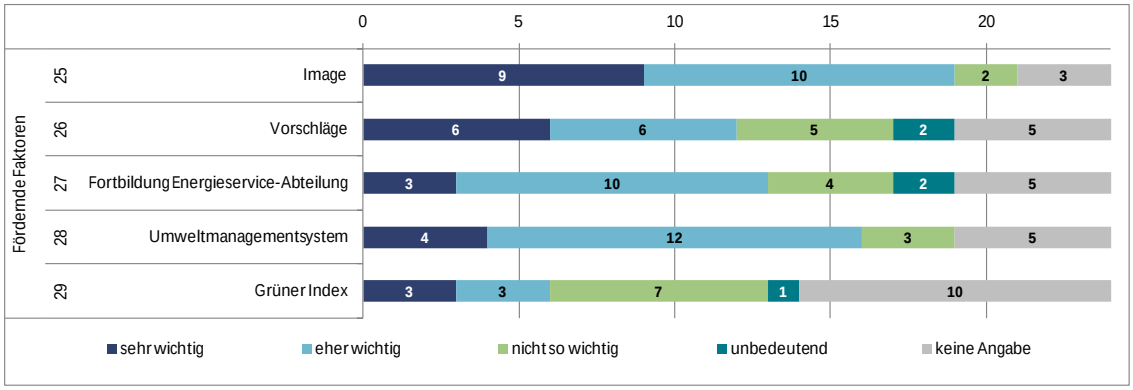
Allerdings sind die in der Literatur unter dem Sammelbegriff „Begrenzte Rationalität“ zusammengefassten Gründe weiterhin relevant. In diese Kategorie fallen ***Ablaufroutinen und Zeitmangel***, die als wichtige Hemmnisse der Energieeffizienz gegenüberstehen. Während im vorangegangenen Abschnitt investive Maßnahmen verstärkt im Fokus standen, gibt es eine Reihe von Maßnahmen, die primär auf organisatorischer Ebene relevant sind. Die Umsetzung dieser Maßnahmen wird nicht durch Aspekte des Investitionskalküls verhindert, sondern vielmehr durch unzureichende organisatorische Fokussierung. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise auch zu erwähnen, dass ***einfach umsetzbare Maßnahmen*** schneller umgesetzt werden als „komplexe“ und teure Maßnahmen, auch wenn Risiko und Wirtschaftlichkeit auf gleichem Niveau liegen. Allerdings unterscheiden sich Rolle und Unterstützung durch die Mitarbeiter von Betrieb zu Betrieb. In den Gesprächen wurde deutlich, dass viele Maßnahmen nur dann vollständig wirksam sind, wenn sie durch die ***organisatorische Struktur*** und die ***Mitarbeiter mitgetragen*** werden. Dabei wird als Haupthemmnis genannt, dass Mitarbeiter von den Veränderungen zu überzeugen sind. Wie bereits oben andiskutiert, spielt im Zusammenhang mit der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen eine verantwortliche Person eine zentrale Rolle. Gerade im Bereich der KMU (Fragen 23-24) fehlt eine solche Person als ***zentraler Verantwortlicher*** mit den erforderlichen Kenntnissen.

Fördernde Faktoren

Neben den genannten Hemmnissen gibt es eine Reihe von fördernden Faktoren, die die Umsetzungsdauer von Energieeffizienzmaßnahmen verkürzen. Abbildung 2-26

zeigt die Einschätzung zu diesen Faktoren, wobei der letztgenannte Punkt sich ausschließlich auf Großunternehmen bezieht.

Abbildung 2-26: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Fördernde Faktoren“



Es zeigt sich, dass die ***Außenwirkung der Effizienzmaßnahmen*** für das Unternehmen eine besondere Rolle hat, insofern die technische Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Anlagen gegeben bleibt. Durch eine ***Vorbildfunktion*** einzelner Unternehmen können beispielsweise auch andere Unternehmen zu verstärkten Effizienzaktivitäten angeregt werden. Demgegenüber wurde aber auch aus dem Bereich von KMU davon berichtet, dass Umsetzungserfolge bewusst nicht in die Öffentlichkeit getragen werden, um keine Aufmerksamkeit zu erregen.

Als durchgängig positiv wird darüber hinaus die Rolle eines ***Managementsystems für Umweltfragen und Energiefragen*** eingeschätzt. Klare Bekenntnisse und ***Zielvorgaben der Unternehmensleitung*** zur Reduzierung des Energieverbrauchs werden in diesem Kontext ebenfalls als Faktor zur Förderung der Energieeffizienz gesehen.

Zur Verankerung des Energieeffizienzgedankens in Unternehmen wird auch die ***regelmäßige Fortbildung*** und ein ***innerbetriebliches Vorschlagswesen*** für Energiefragestellungen als wichtig erachtet. Die primär an Großunternehmen gerichtete Frage nach der Aufführung eines Unternehmens im grünen Index wird, bezogen auf die Anzahl der Antworten, ebenfalls als fördernder Faktor angesehen, steht den Aussagen zufolge aber in seiner Bedeutung den anderen Faktoren nach.

Darüber hinaus wurden mehrfach ***laterale Aspekte*** der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen genannt. Geht beispielsweise die Maßnahmenumsetzung mit einer Erhöhung der Produktivität als zusätzlicher Verbesserung einher oder die Produktqualität wird verbessert, so wird diese Maßnahme deutlich schneller im Unternehmen eingesetzt. Derartige Seiteneffekte wirken sich als starker fördernder Faktor aus.

2.5 Politische Instrumente in der Industrie

Die wichtigsten derzeit in Kraft befindlichen Instrumente mit direktem Bezug zu industriellen Prozesstechnologien sind die Vereinbarung zwischen der deutschen Wirtschaft und der Bundesregierung zur Klimavorsorge vom 9. November 2000 und das europäische System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten (ETS) nach Richtlinie 2003/87/EG. Hinzu kommt die Öko-Steuer mit Steuervergünstigungen wie dem Spitzenausgleich für Industriebetriebe. Die übrigen derzeit für den Industriesektor existierenden energie- und klimapolitischen Instrumente betreffen überwiegend die industriellen Querschnittstechnologien und richten sich vor allem an kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Zu nennen sind insbesondere die Initiative Energieeffizienz der Deutschen Energie-Agentur (dena) sowie der Sonderfonds Energieeffizienz und weitere finanzielle Förderprogramme der KfW (einen Überblick gibt Öko-Institut et al. 2009). Hinzu kommen die ab 2010 sukzessive in Kraft tretenden Mindesteffizienzstandards für energierelevante Produkte, die teilweise auch die Industrie betreffen, allerdings wiederum nur industrielle Querschnittstechnologien.

Das Energiekonzept der Bundesregierung vom 28. September 2010 nennt eine Reihe weiterer Maßnahmen zur Ausschöpfung der Effizienzpotenziale in der Industrie. Dazu gehört neben dem Ausbau von Förderprogrammen insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen vor allem die Einführung von Energiemanagement-Systemen. Außerdem ist die Auflage eines Energieeffizienzfonds vorgesehen, der u. a. auch an den Mittelstand und die Industrie gerichtete Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz beinhalten soll.

Nachfolgend werden – nach einer kurzen Darstellung der wichtigsten bereits bestehenden Instrumente – aus den Ergebnissen dieser Untersuchung einige Empfehlungen für Instrumente und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz abgeleitet, die speziell an industrielle Prozesstechnologien adressieren.

2.5.1 Bestehende Instrumente

Vereinbarung zwischen der deutschen Wirtschaft und der Bundesregierung zur Klimavorsorge

Verpflichtungserklärungen der Wirtschaft kommen in der deutschen Klima- und Energiepolitik seit den 1990er Jahren eine wichtige Bedeutung zu. Am 9. November 2000 schlossen die Bundesregierung und die deutsche Wirtschaft die „Erweiterte Vereinbarung zur Klimavorsorge“, die bis heute Gültigkeit hat. Die Vereinbarung wurde von einigen großen Verbänden der Energiewirtschaft unterzeichnet und von weiteren 14 Verbänden des Produzierenden Gewerbes getragen. Die Verpflichtung beinhaltet eine

Senkung der spezifischen CO_2-Emissionen bis 2005 um 28 % sowie der spezifischen Emissionen der sechs Kyoto-Gase um 35 % bis 2012 (jeweils gegenüber dem Basisjahr 1990). Konkret umgesetzt wird die Vereinbarung durch 19 Einzelverpflichtungen der beteiligten Verbände, die jeweils Reduktionsziele in der Regel für das Jahr 2012 enthalten. Darunter sind viele der auch in dieser Untersuchung berücksichtigten Industriebranchen (Chemische Industrie, Eisenschaffende Industrie, Glasindustrie, Kalkindustrie, Keramische Fliesen und Platten, NE-Metallindustrie, Zellstoff- und Papierindustrie sowie Zement-, Ziegel- und Zuckerindustrie). Einen Überblick über die jeweiligen Reduktionszielen und den Stand der Zielerreichung gibt der regelmäßige Statusbericht zur Umsetzung der Vereinbarung (zuletzt RWI 2010).

Die Vereinbarung ist auch insofern von Bedeutung, als sich die Bundesregierung im Gegenzug verpflichtete, bei erfolgreicher Umsetzung auf weitere ordnungspolitische Maßnahmen wie verpflichtende Energieaudits zu verzichten, ausgenommen die Umsetzung von EU-Recht. Außerdem wurden die Anstrengungen beim Einstieg in die ökologische Steuerreform in Form eines Spitzenausgleichs anerkannt (siehe unten). Kritik an den Selbstverpflichtungen macht sich vor allem an deren geringer Zusätzlichkeit fest.

EU-Emissionshandel

Eine wesentliche politische Rahmenbedingung für die meisten der im Mittelpunkt dieser Untersuchung stehenden energieintensiven Branchen stellen die Einführung des EU-Emissionshandelssystems (EU ETS) ab 2005 und die ab 2013 vorgesehenen Erweiterung dar.

Aufgrund der Bestrebungen die Treibhausgasemissionen und den damit verbundenen anthropogenen Klimawandel zu begrenzen, wurde vom Europäischen Parlament im Oktober 2003 die Richtlinie 2003/87/EG erlassen, die die rechtlichen Rahmenbedingungen und den Umfang eines Systems zum Handel von Zertifikaten für Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union definiert. Die Umsetzung dieser Richtlinie, die zum 1. Januar 2005 in Kraft trat, zielt auf eine Reduktion des Emissionsniveaus innerhalb der Europäischen Union um 20 % bis zum Jahr 2020 – bezogen auf das Emissionsniveau des Jahres 1990 – ab, wobei der Fokus auf die Energieumwandlung und -umformung sowie auf die großen industriellen Emittenten gelegt ist.

Das Instrument des Emissionshandels ist funktional als ein ***Cap-and-Trade-System*** aufgebaut, das sowohl eine Beschränkung der gesamten Menge an Treibhausgasen respektive der sich im Umlauf befindenden Zertifikaten vorsieht als auch die Möglichkeit des Handels der Emissions-Berechtigungen innerhalb der Europäischen Union erlaubt. Aufgrund dieser Ausgestaltung wird der EU-Emissionshandel auch als ein

marktbasiertes Instrument verstanden, das einen ökonomischen Anreiz liefern soll, die kostengünstigsten technischen Maßnahmen für die Reduktion von Treibhausgasen umzusetzen; die Umsetzung für die Reduktion von Treibhausgasen basiert hierbei auf Allokationsplänen, die auf der Grundlage der Richtlinie 2003/87/EG eine Unterteilung des Referenzzeitraums vom Jahre 2005 bis zum Jahre 2020 in drei Handelsphasen vornehmen. Dieser Ansatz zielt unter anderem darauf ab, die Vergleichbarkeit des Emissionsniveaus – das bspw. aufgrund starker konjunktureller Schwankungen in der Kapazitätsauslastung der industriellen Anlagen oder durch eine unterschiedliche Höhe der unterjährigen Temperaturverläufe – zwischen den einzelnen Jahren zu gewährleisten.

Für den Zeitraum der ersten Handelsphase (2005-2007), die im Wesentlichen als Testphase diente, wurden aus dem Bereich der Energieumwandlung und -umformung sowie für industrielle Anlagen Treibhausgas emittierende Prozesse definiert, für die von den Anlagenbetreibern bis spätestens zum 30. April des Folgejahres Zertifikate zu entrichten sind (Tabelle 2-4). Dieser Erfassungsumfang hat sich auch in der zweiten Handelsphase (2008-2012) nicht grundsätzlich geändert, wobei in dieser Phase ein zunehmender Fokus auf die einheitliche Interpretation der Richtlinie 2003/87/EG in den Nationalen Allokationsplänen (NAP), die die Verteilung der Zertifikate auf die unterschiedlichen Industrien regeln, gelegt wurde. Zudem wurde ein zusätzlicher Mechanismus implementiert, der es den Mitgliedsstaaten ermöglicht, Emissionsberechtigungen durch Projekte in Drittländern – sogenannte Clean Development Mechanism (CDM) und Joint Implementation (JI) – zu erwerben. Sowohl CDM als auch JI erlauben es Betreibern von Tätigkeiten die unter die Richtlinie fallen ihre Reduktionsverpflichtungen bis zu einem gewissen Grad auch außerhalb des eigenen Staatengebiets – bspw. in Entwicklungsländern – einzulösen.

In der dritten Handelsphase (2013-2020), die auf der Novellierung der Richtlinie 2003/87/EG beruht (Richtlinie 2009/29/EG), strebte die Europäische Kommission eine Erweiterung des Erfassungsbereichs durch die Einbeziehung neuer Treibhausgase und Tätigkeiten an (Tabelle 2-4). Grundlegend für eine Erweiterung des Handelssystems sind dabei die Emissionshöhe der Tätigkeiten, die Überwachbarkeit der Emissionen, die Angemessenheit der durch die Einbindung verursachten Transaktionskosten und die Verfügbarkeit von Technologie zur Vermeidung von Emissionen. Darüber hinaus wird in der dritten Handelsphase zudem darauf verzichtet, dass die vorgegebene Obergrenze an Treibhausgasemissionen, die von der Europäischen Union festgelegt wurden, von den Mitgliedsländern in nationale Allokationspläne zu überführen ist. In der Richtlinie 2009/29/EG ist lediglich festgelegt, ab dem Jahr 2013 die Menge an Emissionen um einen linearen Faktor von 1,74 % – bezogen auf den Durchschnittswert der zweiten Handelsphase zu senken – um das Ziel der Europäischen Union, die

Emissionen bis zum Jahre 2020 um 20 % gegenüber dem Jahr 1990 zu senken, zu erreichen.

Tabelle 2-4: Tätigkeiten, die in den Geltungsbereich der Richtlinien 2003/87/EG und 2009/29/EG fallen (für detaillierte Angaben vgl. Anhang I der Richtlinien)

Kategorien von Tätigkeiten	Tätigkeiten	Phase I & Phase II	Phase III
Energieumwandlung- und umformung	Verbrennung von Brennstoff	X	X
	Raffination von Mineralöl	X	X
	Herstellung von Koks	X	X
Eisenmetallerzeugung- und verarbeitung	Röstung oder Sinterung	X	X
	Herstellung von Roheisen oder Stahl	X	X
	Herstellung oder Verarbeitung von Eisenmetallen		X
	Herstellung von Primär- und Sekundäraluminium		X
	Herstellung oder Verarbeitung von Nichteisenmetallen		X
Mineralverarbeitende Industrie	Herstellung von Zementklinker	X	X
	Herstellung von Kalk, Brennen von Dolomit oder Magnesit	X	X
	Herstellung von Glas einschließlich Glasfasern	X	X
	Herstellung von keramischen Erzeugnissen	X	X
	Herstellung von Dämmmaterial		X
	Trocknen oder Brennen von Gips und Gipserzeugnissen		X
Chemische Industrie	Herstellung von Industrieruß		X
	Herstellung von Slapetersäure		X
	Herstellung von Adipisäure		X
	Herstellung von Glyoxal und Glyoxylsäure		X
	Herstellung von Ammoniak		X
	Herstellung von organischen Grundchemikalien		X
	Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas		X
	Herstellung von Soda und Matriumbicacrbonat		X
Geologische Speicherung	Abscheidung von Treibhausgasen zwecks Beförderung		X
	Beförderung von Treibhausgasen in Pipelines		X
	Geologische Speicherung von Treibhausgassen		X
Sonstige Industriezweige	Herstellung von Zellstoff	X	X
	Herstellung von Papier und Karton	X	X
Luftverkehr	- nicht relevant für die Studie -		X

Ökologische Steuerreform

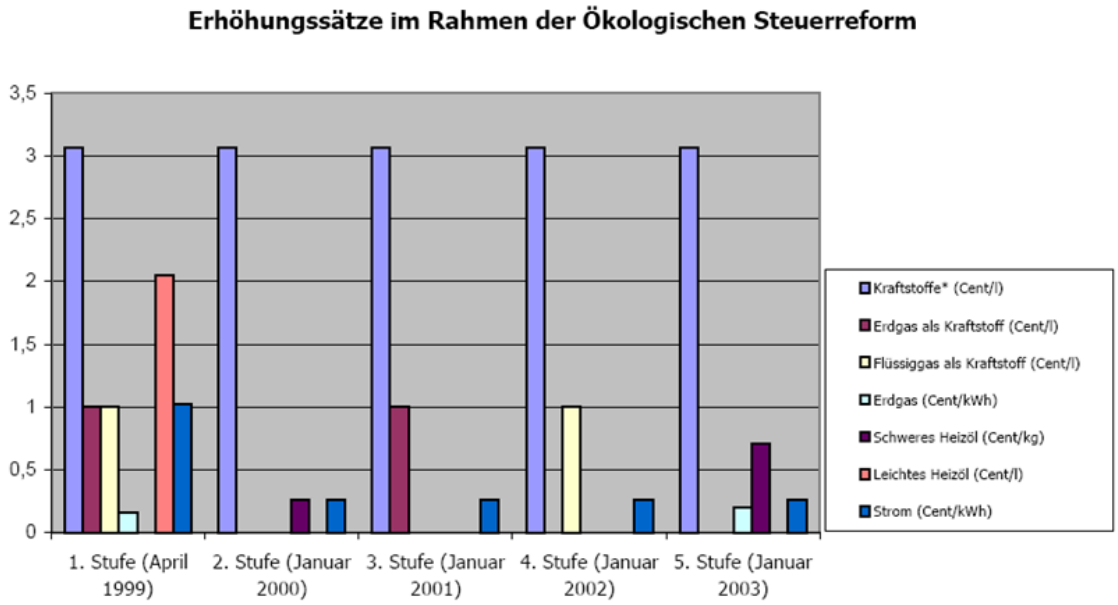
Mit dem Erlass des Gesetzes zum Einstieg in die ökologische Steuerreform (BGBl. I S. 378) wurde im März 1999 ein steuerrechtlicher Rahmen geschaffen, der auf dem Grundgedanken basiert, dass schädigende ökologische Auswirkungen durch den Verbrauch von Energie in der vorherigen Rechtsprechung nur unzureichend Berücksichtigung fanden. Daraus resultierte die politische Motivation durch die Einführung eines Gesetzes eine steuerliche Kopplung zwischen ökonomischem Handeln und ökologischem Folgen herzustellen sowie einen Anreiz für eine geringe Nutzung von Energie zu schaffen, der entgegen ordnungspolitischen Maßnahmen dadurch erzielt wird, dass der Steuerträger durch seine Entscheidung respektive sein Verhalten die Höhe der

Steuerzahlungen beeinflussen kann. Aus volkswirtschaftlicher Perspektive kann durch diese Art von Besteuerung in doppelter Hinsicht eine vorteilhafte Wirkung erzielt werden; zum einen durch eine Internalisierung der externen Effekte des Energieverbrauchs in Form von Umweltverschmutzung und zum anderen durch eine Generierung von zusätzlichen Steuereinnahmen.

Bei der Ausgestaltung des Gesetzes zum Einstieg in die ökologische Steuerreform wurde keine explizite Ökosteuer eingeführt, sondern eine Modifikation bestehender Steuergesetze vorgenommen, die um die Einführung einer Stromsteuer ergänzt wurde. Durch diese Kombination von steuerpolitischen Maßnahmen soll eine Lenkungswirkung im Sinne des Umweltschutzes erzielt werden, indem sowohl die verbrauchte Menge an Energie als auch Vergünstigungen für die Nutzung von effizienten Technologien steuerlich Berücksichtigung finden. Eine Ermäßigung – im Sinne der Gesetzgebung – erhalten industrielle Großverbraucher, um deren internationale Wettbewerbsfähigkeit nicht zu gefährden. Dies betrifft insbesondere Unternehmen aus den in dieser Untersuchung betrachteten energieintensiven Branchen. Vollständig von der Besteuerung ausgenommen ist derjenige Stromverbrauch, der ausschließlich auf regenerative Energieträger zurückzuführen ist.

Im Dezember 1999 wurde in einem zweiten Schritt das Gesetz zur Fortführung der ökologischen Steuerreform (BGBl. I S. 2432) erlassen, in dem zwischen den Jahren 2000 bis 2003 eine stufenweise jährliche Anhebung bspw. der Mineralölsteuer in Höhe von 3,07 Ct/l und der Stromsteuer in Höhe von 0,26 Ct/kWh beschlossen wurde (Abbildung 2-27), wobei Unternehmen des produzierenden Gewerbes sowohl von der Erhöhung der Mineralölsteuer befreit wurden als auch die Stromerhöhung nur zu einem Anteil von 40 % zu tragen haben. Inhaltlich zielt dieses Gesetz im Kern darauf ab, Korrekturen am Gesetzes zum Einstieg in die ökologische Steuerreform (BGBl. I S. 378) vorzunehmen, um unerwünschte Auswirkungen der vorherigen Rechtsprechung zu vermeiden. Eine Ausnahmeregelung wurde insofern in das Gesetz integriert, als eine Mineralölsteuerbefreiung für Gas- und Dampfturbinenkraftwerke mit hohem Wirkungsgrad für die gesamte Zeitspanne von 2000 bis 2003 erteilt wurde. Als dritter Schritt der Ökologischen Steuerreform (Abk.: ÖSR) ist im Dezember 2002 das Gesetz zur Fortentwicklung der ökologischen Steuerreform (BGBl. I S. 4602) erlassen worden, das im Januar 2003 in Kraft trat. Entsprechend zur ersten Novelle wurden auch in diesem Gesetz im Wesentlichen umweltschädigende Steuerermäßigungen abgebaut sowie weitere Anpassungen bei der Höhe der Besteuerung der Energieträger vorgenommen.

Abbildung 2-27: Erhöhungssätze im Rahmen der Ökologischen Steuerreform in den Jahren 1999 – 2003



Quelle: UBA 2002

Sonderfonds Energieeffizienz und sonstige Programme der KfW

Der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und der KfW Förderbank Ende 2007 initiierte „Sonderfonds Energieeffizienz in KMU“ (KfW 2007) richtet sich an kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und soll dort Anreize für Investitionen zur Förderung der Energieeffizienz schaffen. Der Sonderfonds ist Anfang 2008 gestartet und besteht aus zwei miteinander gekoppelten Instrumenten. Zum einen wird eine Energieeffizienzberatung in Unternehmen gefördert, bei der qualifizierte Experten Potenziale zur Energieeinsparung identifizieren. Es wird sowohl eine kurze Initialberatung wie auch eine umfangreichere Detailberatung mit einem Zuschuss zum Beratungshonorar gefördert. Zweiter Baustein des Sonderfonds ist die Gewährung zinsgünstiger Darlehen im Rahmen des „ERP-Energieeffizienzprogramms“. Hinzu kommen weitere an Industrie und Gewerbe gerichtete finanzielle Förderprogramme wie das KfW-Umweltprogramm, das ERP-Umwelt- und Einsparprogramm sowie das BMU-Programm zur Förderung von Demonstrationsvorhaben (siehe auch KfW Förderbank 2008a und 2008b).

Allerdings richten sich diese Programme in erster Linie an kleine und mittlere Unternehmen, die innerhalb der hier betrachteten energieintensiven Branchen erheblich weniger bedeutend sind als Großunternehmen. Hinzu kommt, dass hier bisher im We-

sentlichen industrielle Querschnittstechnologien wie Beleuchtung, Druckluft, Klimatisierung und Lüftung, Motorsysteme, Wärmerückgewinnung oder Raumwärme gefördert werden und keine Prozesstechnologien (siehe u. a. Öko-Institut et al. 2009; IREES/ Fraunhofer ISI 2010). Von daher sind diese Programme in ihrer derzeitigen Ausgestaltung für die Förderung energieeffizienter Prozesstechnologien kaum relevant.

Mindesteffizienzstandards unter der EU Ökodesign-Richtlinie

Den Rechtsrahmen für die Festlegung von Mindesteffizienzstandards stellt die Öko-Design-Rahmenrichtlinie 2009/125/EG dar, welche die Richtlinie 2005/32/EG ersetzt. Die Richtlinie 2009/125/EG wird derzeit in deutsches Recht umgesetzt, womit das Energiebetriebene-Produkte-Gesetz (EBPG), das die deutsche Umsetzung der Rahmenrichtlinie 2005/32/EG darstellt und am 7.3.2008 in Kraft getreten ist, weiterhin gilt. In den Durchführungsmaßnahmen, welche nach Veröffentlichung im EU-Amtsblatt EU-weit gelten, werden verschiedene Anforderungen an einzelne Produktgruppen festgelegt. Die Mindesteffizienzstandards werden nicht durch die Richtlinie selbst, sondern erst durch die auf ihrer Grundlage erlassenen Durchführungsmaßnahmen etabliert, in der Regel in der Form direkt in den Mitgliedsstaaten geltender EU-Verordnungen. Die Erfüllung dieser Anforderungen muss gegeben sein, damit das Produkt die CE-Kennzeichnung tragen und damit in der EU in Verkehr gebracht oder in Betrieb genommen werden darf.

Die Höhe der Effizienz-Anforderungen wird auf Grundlage einer technischen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Analyse festgelegt. Der derzeitige Stand der Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie variiert für die rund 35 Produktgruppen, die bisher grundsätzlich für die Einführung von Mindeststandards vorgesehen sind.[13] Bei diesen Produktgruppen handelt es sich jedoch ausschließlich um Querschnittstechnologien, die in den privaten Haushalten oder in Industrie und Gewerbe eingesetzt werden. Für jede Produktgruppe wird vor dem Entwurf und schließlich rechtskräftigen Erlass der Durchführungsmaßnahme eine Vorstudie durchgeführt, die eine Marktanalyse und eine technische Analyse der Produkte sowie die Ausarbeitung von Standardszenarien in verschiedenen Varianten beinhaltet. Für folgende Produktgruppen gab es bis Ende 2010 bereits Durchführungsmaßnahmen: einfache Set-top-Boxen, Fernsehgeräte, Standby und Scheinaus-Verluste, externe Netzteile, Haushaltskühl- und Gefriergeräte, nicht gerichtete Haushaltsbeleuchtung, Umwälzpumpen, Straßen- und Bürobeleuchtung sowie Elektromotoren.

13 http://www.umweltbundesamt.de/produkte/oekodesign/EbP-Aktuell.htm

2.5.2 Ansatzpunkte für weitere politische Maßnahmen aus der Hemmnis-Analyse

Anhand der Ausführungen zu den Hemmnissen lassen sich verschiedene, zunächst allgemeine Ableitungen hinsichtlich politischer Instrumente treffen, die die Umsetzung von Maßnahmen in der energieintensiven Industrie fördern können. Diese werden dann im nachfolgenden Abschnitt 2.5.3 näher konkretisiert.

Informationen als Handlungsgrundlage

Insgesamt lässt sich anhand der Aussagen zu den Hemmnissen ableiten, dass übergreifend kein generelles Problem der Informationsverfügbarkeit herrscht. Vielmehr liegen Probleme derzeit darin, dass Informationen nicht geeignet bereitgestellt werden bzw. der Aufwand für die Interpretation der Informationen vergleichsweise hoch ausfällt. Insbesondere für KMU ergibt sich die Situation, dass der Vergleich von Maßnahmen und auch die Auswahl der geeigneten Maßnahmen schwer fallen. Hier kann die Entwicklung entsprechender ***Normen und Standards***, die auch die kostenmäßige Bewertung der Prozesstechnologien einschließen, ein hilfreiches Instrument darstellen. Neben einfacheren Aussagen zur Wirtschaftlichkeit könnte dies auch die Transaktionskosten für die Informationsbeschaffung reduzieren, da unter Rückgriff auf diese Standards adäquate ***Vergleiche*** gezogen werden können.

Insbesondere mit Blick auf KMU wurde hervorgehoben, dass vielfach Kompetenzen fehlen, um die branchenspezifischen Prozesse zu optimieren bzw. wie Prozesse ausgestaltet sein könnten, um eine verbesserte Energieeffizienz zu erreichen, ohne negative Seiteneffekte (Produkt, Prozess) hervorzurufen. Hier könnte die gezielte Bereitstellung externer Kompetenzen Abhilfe schaffen. In diesem Sinne könnten beispielsweise ***spezialisierte, externe Berater*** eingesetzt werden, die sich aufgrund umfangreicher Kenntnisse speziell mit branchenspezifischen Prozessen gut auskennen und Befürchtungen betreffend den Einsatz von Effizienzmaßnahmen in KMU inhaltlich begegnen können.

Im Sinne einer ausgeweiteten Informationsbereitstellung über reine Technologiedaten hinaus wäre es denkbar, ***Informationen zur Rentabilität*** von Energieeffizienzmaßnahmen unter Berücksichtigung der Heterogenität der Unternehmen bereit zu stellen, um damit zusätzliche Informationen in Entscheidungsprozesse einzuspielen. Entsprechende Informationen könnten zielgruppenspezifisch für unterschiedliche Prozesstechnologien, insbesondere für Branchen zum Einsatz kommen, die sich durch eine hohe Zahl von kleineren Einzelunternehmen auszeichnen.

Im Rahmen der ***Ausbildung*** kommt der langfristigen Vermittlung grundlegender Kenntnisse zur Vorteilhaftigkeitsbewertung von Maßnahmen und zur Problematik der Energieeffizienz eine wesentliche Rolle zu. Mehrfach wurde in diesem Sinne auch darauf verwiesen, dass Bewertungen von Effizienzmaßnahmen sehr oft mit Blick auf einzelne Prozesse durchgeführt werden, ihr Potenzial allerdings erst vollständig entfalten, wenn in ***Systemverbünden*** gedacht wird. Die Schaffung eines entsprechenden Bewusstseins sollte sich in entsprechenden Ausbildungsinhalten widerspiegeln.

Eine weitergehende Verankerung der Aspekte Energieeffizienz und Treibhausgasminderungen in das Organisationssystem von Unternehmen könnte durch eine breitere Einführung von entsprechenden ***Managementsystemen*** in den Unternehmen geschehen. Dies könnte beispielsweise Hemmnisse bei der Weitergabe von Informationen reduzieren. Gleichzeitig könnte ein verstärkter Einsatz ***interdisziplinärer Teams*** in Unternehmen unterschiedliche Sichtweisen auf Energieeffizienzfragestellungen zusammenführen, um übergreifende Lösungen für diese Fragen zu finden.

Umgang mit Einsparungen, Kosten und Unsicherheiten

Mit Blick auf langfristige Investitionsentscheidungen wurde sehr häufig darauf verwiesen, dass Unternehmen derzeit die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen als instabil wahrnehmen. Daher werden Investitionen, die sich nur über einen langen Zeithorizont wirtschaftlich lohnen, nicht realisiert. Hier wünscht sich die Industrie, dass die Politik zuverlässigere und langfristige Planungsperspektiven im Sinne ***stabiler Rahmenbedingungen*** schafft.

Neben Unsicherheiten aus den Rahmenbedingungen werden über alle Branchen hinweg durchweg Befürchtungen über negative Auswirkungen auf Produkte und Prozessen geäußert, die damit eine sehr wesentliche Rolle für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen spielen. Politische Maßnahmen könnten ansetzen, um eine zu starke Wahrnehmung des ***Risikos zu reduzieren*** oder um das ***Risiko zu transferieren***.

Zu diesem Zwecke bieten sich unterschiedliche Instrumentenbausteine und Maßnahmen an: Tendenziell wurde insbesondere bei Großunternehmen darauf verwiesen, dass ausreichende Informationen für die Einschätzung von Energieeffizienzmaßnahmen vorliegen. Daher kommt der Darstellung von der erfolgreichen Umsetzung möglicher Maßnahmen eine große Bedeutung zu. Dabei würden sich beispielsweise ***Demonstrationsvorhaben*** oder ***Erfahrungsberichte*** von erfolgreichen Umsetzungen als Ansatzpunkt anbieten, das wahrgenommene Risiko zu reduzieren und um die Umsetzbarkeit zu unterstreichen. Je nach Technologiefeld könnte es sich im Anschluss auch anbieten, ***Transferkonzepte*** aus Demonstrationsanlagen in Richtung von Bestandsan-

lagen zu entwickeln. Auch können thematische Verbünde wie beispielsweise ***Energieeffizienznetzwerke*** den Austausch von Unternehmen befördern und damit die Bereitschaft erhöhen, in entsprechende Energieeffizienzmaßnahmen zu investieren. Bei nachweislich risikoneutralen Maßnahmen ist es auch denkbar, entsprechende ***Technologieanforderungen*** festzulegen.

Im Sinne eines Transfers von Risiken könnte es sich auch anbieten, beispielsweise durch entsprechend ausgestaltete ***Versicherungen*** die wahrgenommenen Risiken auf Unternehmensseite zu reduzieren und durch gezielte ***Auslagerungen von Teilverantwortlichkeiten***, beispielsweise an Dritte, diesen Risikotransfer zu erleichtern. Hier wären geeignete Rahmenbedingungen für derartige Transaktionen, beispielsweise durch die Schaffung einheitlicher Rahmenbedingungen für das Contracting, zu schaffen.

Wie oben erläutert führt der ausschließliche Rückgriff auf Amortisationszeiten und Investitionssummen als alleiniges Entscheidungskriterium bei der Bewertung von Investitionen zu Fehlschlüssen. Ein Ansatzpunkt politischer Maßnahmen sollte es daher sein, dieses ***Entscheidungsverhalten*** zu beeinflussen. Der bereits genannte, verstärkte Einsatz von ***Energiemanagementsystemen*** in der Praxis kann an diesem Punkt unterstützend wirken. Die Ableitung entsprechender verpflichtender Anforderungen an die energieintensive Industrie kann den Einsatz derartiger Managementsysteme in der Praxis erhöhen. Gerade bei KMU ist die verpflichtende Einführung derartiger Systeme aufgrund des Verwaltungsaufwandes unter Umständen nicht gerechtfertigt. Hier wäre statt eines umfassenden Managementsystems ein ***vereinfachtes Managementinstrumentarium*** für KMU denkbar.

Gegenüber Großunternehmen ist die Situation der Kapitalverfügbarkeit bei KMU tendenziell problematischer – um langfristige Investitionen in effiziente Anlagen zu sichern, kommt der Bereitstellung entsprechender ***Kreditlinien und zinsgünstiger Darlehen für KMU*** daher eine wichtige Rolle zu. Daneben kann die gezielte Forschungsförderung für spezielle Fragestellungen von KMU ein wichtiges Element sein.

Weitere Hemmnisse und fördernde Faktoren

Wie oben dargestellt sind Ablaufroutinen und Zeitmangel als Hemmnisse für die Energieeffizienz zu werten. Zur Reduzierung der Bedeutung bieten sich auf organisatorischer wie auf technischer Ebene Maßnahmen an, um diese zu überwinden. Ablaufroutinen können durch die Anpassung der Organisationsstrukturen überwunden werden. So kann beispielsweise bei Beschaffungsprozessen der Energieverbrauch von Anlagen als Pflichtaspekt bei Ausschreibungen Berücksichtigung finden. Daneben können ***Anreize*** in den Betrieben für die Mitarbeiter gesetzt werden, die sich für das Thema

Energieeffizienz besonders einsetzen. Sind technische Benchmarks möglich, können auch entsprechende Anreizsysteme mit Leistungsdaten oder Malussystemen gekoppelt werden.

Ein anderer Ansatzpunkt betrifft die Ausgestaltung der technischen Systeme. Durch ***intelligente Prozessüberwachung***, beispielsweise durch automatisches Abschalten von Komponenten, können Verbräuche von System von vornherein ohne Zutun des Mitarbeiters reduziert werden. Derartige Systemeigenschaften könnten beispielsweise durch ***Selbstverpflichtungen*** der Zulieferindustrie, durch Festlegung von ***Minimaleffizienzen oder Maximalwerten*** oder durch flankierende ***Fördersysteme*** (Subventionen, Steuererleichterungen etc.) eingeführt werden, die beispielsweise anhand von nachgewiesenen Einsparungen die Entwicklung fördern. Dies wäre neben der ***Forschungsförderung*** insbesondere für sehr risikobehaftete Technologieentwicklungen ein Ansatzpunkt.

Neben dem Abbau von Hemmnissen ist oben aufgezeigt, dass unterschiedlichste fördernde Faktoren für Effizienzmaßnahmen als relevant angesehen werden. Wiederkehrendes Element ist dabei oft die Anforderung an das ***Management***, die Energie- und Ressourceneffizienz als ein Ziel in der Organisation des Unternehmens zu verankern.

2.5.3 Empfehlungen für weitere politische Instrumente und Maßnahmen für die energieintensive Industrie insgesamt

Ausgehend von dieser allgemeinen Darstellung lassen sich konkretere Empfehlungen für weitere Instrumente und Maßnahmen ableiten, die sich speziell an die energieintensive Industrie richten. Für die Ausgestaltung dieser Maßnahmen sind dabei insbesondere folgende Überlegungen für die untersuchten Branchen entscheidend:

- Die bestehenden Hemmnisse und fördernde Faktoren in einer Zielgruppe müssen mit geeigneten Maßnahmen als Bündel simultan wirken, um insgesamt effektiv und effizient zu sein. Die Adressierung von nur ein oder zwei Hemmnissen mit entsprechenden Maßnahmen bei bestehenden fünf oder sechs Hemmnissen ist nicht zielführend.
- Ein großer Teil der sinnvollerweise zu ergreifenden Maßnahmen muss von den Selbstorganisationen der Wirtschaft selbst kommen, weil dort die Kompetenz und das Vertrauen untereinander besteht. Der Staat hat hier häufig nur eine anstiftende, motivierende und unterstützende Rolle.

Im Folgenden wird eine Reihe von zusätzlichen Maßnahmen der Politik und der betroffenen Wirtschaftsverbände näher detailliert dargestellt, die geeignet sein können, die in dieser Untersuchung ermittelten Potenziale zu erschließen.

Energiemanagement-Systeme

Das Energiemanagement genießt in der Betriebsorganisation in Unternehmen bisher nur geringe Aufmerksamkeit. In den hier vor allem betrachteten großen Unternehmen energieintensiver Branchen mit hohen Energiekostenanteilen ist das Energiemanagement zwar schon stärker verbreitet, u. a. weil für große Unternehmen bereits heute die Möglichkeit besteht, durch die Einführung eines Energiemanagement-Systems von der Zahlung der EEG-Umlage ausgenommen zu werden. Aber auch hier könnte die Nutzung solcher Systeme noch verstärkt werden.

Grundsätzlich versteht man unter Energiemanagement eine einheitliche Strategie zur Überwachung von Energieverbräuchen und Umsetzung von Energieeinsparungen. D. h., ein Unternehmen erfasst seine Energieverbräuche regelmäßig an wichtigen Verbrauchsstellen, um unnötige Verluste zu vermeiden und ergriffene Effizienzmaßnahmen in ihrer Wirkung beobachten zu können. Die konkrete Ausgestaltung von Energiemanagement-Systemen ist jedoch sehr unterschiedlich. Welches Energiemanagement für ein Unternehmen geeignet ist, hängt vor allem von der Betriebsgröße und der Energieintensität bzw. der Höhe der jährlichen Energiekosten ab. Es lassen sich drei Gruppen von Unternehmen mit unterschiedlichen Anforderungen an ein Energiemanagement unterscheiden:

- ***Unternehmen mit Energiekosten < 200.000 €/a***: v.a. externe Energieberatung (bei energieintensiven Betrieben mit hohem prozessspezifischen Energiebedarf: branchenspezifische Beratung), Fortbildung der technischen Leiter sowie Gebäude- und bei energieintensiven Betrieben Prozessleittechnik.
- ***Unternehmen mit Energiekosten zwischen ca. 200.000 und 20 Mio. €/a***: externe Beratung zu Fachfragen, Fortbildung der Energieverantwortlichen und des Fachpersonals; Prozess- und Gebäudeleittechnik, Energiemanagement-Systeme und Investitionsberechnungshilfen. Ergänzend: Teilnahme an regionalen Energieeffizienz-Netzwerken (s. u.).
- ***Unternehmen mit Energiekosten > 20 Mio. €/a***: Fortbildung der Energieverantwortlichen und des Fachpersonals; Prozess- und Gebäudeleittechnik, Energiemanagement-Systeme und Investitionsberechnungshilfen. Ergänzend: unternehmensweite globale Netzwerke über alle, häufig weltweit verteilten Betriebsstätten.

Es existieren mehrere Instrumente zur Zertifizierung eines Energiemanagements: das EMAS-System sowie die deutsche Fassung der Europäischen Norm DIN EN 16001, die sich an der DIN EN ISO 14001 orientiert und sich nach wenigen Anpassungen auch von Unternehmen erfüllen lässt, die bereits dem EMAS-Zertifizierungssystem unterliegen. Im Rahmen der seit Anfang 2009 vom BMU geförderten regionalen Ener-

gieeffizienz-Netzwerken wurde außerdem ein Netzwerk-Managementsystem entwickelt (LEEN-Managementsystem)[14].

Bereits im Rahmen des Integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung (IEKP) von 2007 war spätestens bis 2013 eine Kopplung zwischen dem Nachweis eines Energiemanagement-Systems und der Fortsetzung der Erleichterungen für Unternehmen mit hohem Energieverbrauch im Rahmen der Energie- und Stromsteuern vorgesehen. Dieses wurde im aktuellen Energiekonzept der Bundesregierung vom 28. September 2010 wieder aufgegriffen. Hintergrund ist die Forderung der EU, dass die Betriebe für Steuervergünstigungen wie den Spitzenausgleich eine entsprechende Gegenleistung erbringen. Ab 2013 soll der Spitzenausgleich im Rahmen der Energie- und Stromsteuer daher nur noch gewährt werden, wenn die Betriebe einen Beitrag zu Energieeinsparungen leisten. Der Nachweis der Einsparung kann durch die zertifizierte Protokollierung in Energiemanagementsystemen oder durch andere gleichwertige Maßnahmen erfolgen. Bei den anderen Steuervergünstigungen will die Bundesregierung prüfen, mit welchen Maßnahmen den Anforderungen der Richtlinie nach einer entsprechenden Gegenleistung Rechnung getragen werden kann. Diese soll in Zukunft an die Durchführung von Energiemanagementsystemen entsprechend den internationalen Normen (EN 16001, ISO 50001) geknüpft werden. Dabei geht es nach den Ausführungen im Energiekonzept um ein kostengünstiges Konzept, das insbesondere kleine und mittlere Unternehmen nicht überfordert und dennoch systematisch die Verbesserungschancen offen legt.

Standards und Normen

Die unter der EU-Ökodesign-Richtlinie bereits erlassenen oder geplanten Mindesteffizienzstandards beziehen sich ausschließlich auf industrielle Querschnittstechnologien. Im Hinblick auf industrielle Prozesse könnte die Ausarbeitung von Standards und Normen auf freiwilliger Basis durch die relevanten Industrieverbände verstärkt eingesetzt werden, um den Vergleich und die Abgrenzung von Maßnahmen zu erleichtern. Bisher existieren solche Ansätze bereits im Bereich einiger Querschnittstechnologien (z. B. Kälteanlagen).

Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender finanzieller Förderprogramme

Generell könnte die Einführung von ausgewählten Technologien durch finanzielle Anreize für Effizienz-Investitionen beschleunigt werden (z. B. Steuervergünstigungen bei Investitionen für Abwärmenutzung von Dritten, Bürgschaften oder die Einführung eines

14 http://www.30pilot-netzwerke.de/

Versicherungsproduktes zur Risikobegrenzung von Contracting-Projekten). Anlässlich der Gewährung derartiger finanzieller Anreize könnte die Darlegung der Rentabilität und Lebenszykluskosten des geplanten Projektes (nicht nur des Risikos) eine Förderanforderung sein.

Auch im neuen Energiekonzept der Bundesregierung wird die zielorientierte Verbesserung der finanziellen Förderung für Effizienzmaßnahmen insbesondere bei KMU als eine Maßnahme genannt, um Energieeffizienzpotenziale in der Industrie stärker auszuschöpfen. In diesem Zusammenhang sollten finanzielle Förderprogramme der KfW oder des BAFA auch auf Möglichkeiten geringeren Verwaltungsaufwands und auf Vereinheitlichung geprüft werden. Die im Energiekonzept der Bundesregierung vorgesehene Einführung eines – auch an den Mittelstand und die Industrie gerichteten – Energieeffizienz-Fonds oder die ebenfalls geplante Ausstattung der nationalen Klimainitiative (NKI) des BMU mit zusätzlichen finanziellen Mitteln könnten dafür einen organisatorischen Rahmen bieten.

Informationskampagnen und sonstige Initiativen zur Förderung der Energieeffizienz

Eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen auch informative Maßnahmen, die nicht zuletzt auch zur Flankierung der o. g. Maßnahmen erforderlich sind. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung sind insbesondere folgende Maßnahmen zu empfehlen:

- Als Reaktion auf die weit verbreitete Investitionsentscheidungspraxis, lediglich das Risikomaß der Amortisationszeit heranzuziehen: eine bundesweite ***Informationskampagne*** der Bundesregierung und der Dachverbände der Wirtschaft (BDI und DIHK) sowie der Verbände der Investitionsgüterindustrie (z. B. VDMA und ZVEI) zum Thema der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für energieeffiziente Lösungen (Lebenszykluskosten, Barwert und interne Verzinsung) sowie zu Ausschreibungen zu Investitionen mit energietechnischen Effizienzspezifikationen der hier behandelten Branchen.
- Eine ***Informations- und Fortbildungskampagne*** der Verbände der energieintensiven Energiebranchen, insbesondere für die KMU, zu energietechnischen Messverfahren und kostengünstigen Energiemanagement-Systemen.
- ***Informationskampagnen und wohl vorbereitete Fortbildungsangebote für die Energieverantwortlichen*** seitens des BDI, DIHK, der Verbände der Investitionsgüterhersteller und der Bundesregierung für die KMU und beratende Ingenieure nicht nur zu Querschnittstechniken, sondern auch im Hinblick auf die Ausbildung spezialisierter Energieberater für einzelne Branchenprozesse. Damit kann dazu beigetragen werden, dass in den Betrieben die notwendigen Kompetenzen für Identifikation, Analyse und Umsetzung möglicher Effizienzmaßnahmen bei den Industrieprozessen besser zur Verfügung stehen.

- Generell sollten Fortbildungsangebote verstärkt im Rahmen der allgemeinen Sensibilisierung zur Energieeffizienz auch im Bereich der Mitarbeiter-Motivation, der Verbesserung der Ausschreibungen von energietechnischen Anlagen und Maschinen bzgl. Spezifikationen von Energieeffizienzanforderungen und zur Verteilung der Energiekosten auf Produktionslinien und Produkte (statt als Gemeinkosten) erarbeitet und regional angeboten werden.
- Die Erfahrungen aus den ***regionalen Energieeffizienz-Netzwerken*** in der Schweiz und auch in Deutschland mit etwa 1000 Betrieben zeigen, dass der Erfahrungsaustausch zwischen den beteiligten Unternehmen zum Thema Energieeffizienz und eine gemeinsame Zielsetzung eine Möglichkeit der mittelständischen Betriebe ist, um ihre Entscheidungen schneller zu treffen und ihre Energiekosteneinsparungen gegenüber dem Durchschnitt der Industrie zu verdoppeln. Solche Netzwerke sollten weiter ausgedehnt werden. Während die bisherigen Netzwerke überwiegend auf regionaler Ebene stattfinden und überwiegend Querschnittstechnologien betrachtet werden, sind für einzelne Branchen sind durchaus auch spezialisierte Netzwerke denkbar, die sich dann auch mit branchenspezifischen Prozessen befassen können.
- Eine ***Initiative der Bundesregierung***, an die großen Unternehmen der energieintensiven Branchen mit der Bitte heranzutreten, ehrgeizige Energieeffizienzprogramme durch ihre technische Zentralen entwickeln zu lassen. Hierzu könnte eine vergleichbare Initiative wie mit dem DIHK (Partnerschaft für Klimaschutz, Energieeffizienz und Innovation[15]) entwickelt werden.
- Die Selbstorganisationen der Wirtschaft und die Bundesregierung sollten weitere ***Formen der Auszeichnung für energieeffiziente und klimabewusste Unternehmen und Erfindungen*** überlegen bzw. verstärkt an den bestehenden Wettbewerben mit innovativen und effizienten Technologien teilnehmen (ähnlich den bereits existierenden Auszeichnungen wie dem Innovationspreis für Klima und Umwelt iku[16], der Klima- und Energieeffizienzgruppe des DIHK oder dem internationalen Energieeffizienzpreis der dena).

Forschung und Entwicklung

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass im Bereich industrieller Prozesse noch ein erheblicher Forschungsbedarf besteht, um auch technologische Einsparpotenziale längerfristig stärker auszuschöpfen. Die Forschungsprogramme bzw. Forschungspolitik der Bundesregierung zur Energieeffizienz sollten daher mit größerer Intensität (und Initiierung von Forschungskooperationen – insbesondere für mittelständische Branchen) weitergeführt werden.

15 http://www.klimaschutz-partnerschaft.de/

16 http://www.iku-innovationspreis.de/

Bei technologisch offenen Fragen können öffentlich geförderte Forschungs- und Pilotvorhaben dazu beitragen Klarheiten zu schaffen. Hierbei wäre zu prüfen, ob Bearbeitungszeiten der Förderantragsprüfung noch verkürzt werden könnten. Generell sollte man über Verwaltungsvereinfachungen nachdenken, um den zeitlichen Aufwand für die Beantragung und Organisation der Forschungsaktivitäten zu vermindern. Auch wenn aus Sicht öffentlicher Rechnungsprüfung ein transparentes Prüfverfahren notwendig ist, sollte über standardisierte und elektronisch gestützte Formulare nach Meinung der befragten Branchenexperten eine zeiteffizientere Form möglich sein.

Um die Befürchtungen negativer Folgen für Produkte und Prozesse zu reduzieren, sollten Demonstrationsvorhaben und Erfahrungsberichte aus praktischen Umsetzungsaktivitäten den Zielgruppen stärkere Verbreitung finden und zugänglich gemacht werden. Transferkonzepte und der Erfahrungsaustausch zwischen Unternehmen sollten unter Einbeziehung der relevanten Branchenverbände intensiviert werden.

Branchenspezifische Empfehlungen

Weiterhin gibt es spezielle branchenspezifische Empfehlungen zu Einzelmaßnahmen, die in den jeweiligen Branchenkapiteln dargestellt wurden. Diese müssen aber immer im Kontext mehrerer und auch der in diesem Abschnitt beschreibenden branchenübergreifender Maßnahmen gesehen werden. Diese Maßnahmen helfen den Branchen auch, ihre Selbstverpflichtungen für 2012 einzuhalten und neue Perspektiven dieses Instrumentes für das Zieljahr 2020 zu eröffnen.

2.6 Literatur

AGEB (AG Energiebilanzen) (2010): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1990-2008 (Energiebilanz 2007: Stand 28.10.2009; Energiebilanz 2008: Stand 25.8.2010) und Auswertungstabellen 1990-2009 (Stand Juli 2010). Stand Juli 2010. DIW Berlin, EEFA, Köln http://www.ag-energiebilanzen.de

Bundesminsterium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin, 28.10.2010

IREES GmbH, Fraunhofer ISI (2010): Evaluation des Förderprogramms „Energieeffizienzberatung“ als eine Komponente des Sonderfonds‘ Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Schlussbericht. Karlsruhe

KfW (2007): Sonderfonds Energieeffizienz. KMU: Zuschüsse für Energieberatungen. www.kfw.de

KfW Förderbank (2008a): Sonderfonds Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen. Frankfurt am Main (http://www.kfw-foerderbank.de/DE_Home/Beratung/Energieeffizienzberatung/index.jsp Zugriff 10.12.2008)

KfW Förderbank (2008b): Förderangebote im Bereich Umweltschutz (http://www.kfw-foerderbank.de/DE_Home/Umweltschutz/index.jsp Zugriff 10.12.2008)

Öko-Institut, DIW Berlin, FZ Jülich IEF-STE, Fraunhofer ISI, Ziesing, H.-J. (2009): Politikszenarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA). Berlin, Karlsruhe, Jülich, Oktober 2009. online: http://www.uba.de

Rohdin, P.; Thollander, P. (2006): Barriers to and driving forces for energy effciency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. Energy 31: 1836-1844

Schröter, M..; Weißfloch, U.; Buschak, D. (2009): Energieeffizienz in der Produktion – Wunsch oder Wirklichkeit? In: Mitteilung aus der ISI-Erhebung Modernisierung der Produktion, Fraunhofer ISI, Karlsruhe

UBA (2002): Ökosteuer – sparen oder zahlen?

UBA (2007): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden – Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. Umweltbundesamt: Dessau

2.7 Anhang

2.7.1 Standardisierter Interviewleitfaden für die Hemmnis-Analyse

Informationen als Handlungsgrundlage

		Als Hemmnis …			
		sehr wichtig	**eher wichtig**	**nicht so wichtig**	**unbe-deutend**
1	Dem technischen Einkauf werden entscheidungsrelevante Informationen nicht weitergegeben (z. B. technische Mindestanforderungen wie Hocheffizienzmotoren).	☐	☐	☐	☐
2	Daten zum Energieverbrauch sind vorhanden, werden aber nicht ausgewertet.	☐	☐	☐	☐
3	Einzelmaßnahmen können durch unterschiedliche Abgrenzungen nicht miteinander verglichen werden (z. B. Austausch eines Pumpenmotors gegenüber Austausch der gesamten Pumpe).	☐	☐	☐	☐
Ergänzende Fragen für KMU:					
4	Der Energieverbrauch einzelner Betriebsteile, Systeme oder Prozesse ist nicht bekannt.	☐	☐	☐	☐
5	Die Beschaffung genauerer Informationen über Ihren Energieverbrauch wird als zu aufwändig betrachtet.	☐	☐	☐	☐
6	Für die Branche sind generell zu wenige Informationen über relevante Energieeffizienzmaßnahmen verfügbar.	☐	☐	☐	☐
7	Es fehlt der Marktüberblick über Anbieter von Energieeffizienz-Technik oder die Suche ist zu aufwändig.	☐	☐	☐	☐
8	Vorhandene Informationen können mangels Kompetenzen nicht umgesetzt werden.	☐	☐	☐	☐
9	Verhandlungen mit Lieferanten, Installateuren oder Beratern erfordern zu viel Aufwand.	☐	☐	☐	☐
Kommentare:					

Umgang mit Einsparungen, Kosten und Unsicherheiten

		Als Hemmnis …			
		sehr wichtig	**eher wichtig**	**nicht so wichtig**	**unbedeutend**
10	Energiekosten werden nicht verursachungsgerecht umgelegt (z. B. auf Abteilungen, Organisationseinheiten, Teilbereiche etc.); sie werden als Gemeinkosten behandelt.	☐	☐	☐	☐
11	Betriebe fürchten um die Rentabilität von Energieeffizienzmaßnahmen durch eventuell fallende Energiepreise.	☐	☐	☐	☐
12	Betriebe fürchten, dass Energieeffizienzmaßnahmen Produkteigenschaften negativ beeinflussen.	☐	☐	☐	☐
13	Betriebe fürchten, dass Energieeffizienzmaßnahmen Prozesseigenschaften negativ beeinflussen (z. B. Sicherheit, Zuverlässigkeit, Produktivität, usw.)	☐	☐	☐	☐
14	Vorschriften, z. B. Gesetze, Normen, usw. verhindern den Einsatz von Effizienzmaßnahmen. (Ggf. welche?)	☐	☐	☐	☐
15	Technische Normen und Standards für Energieeffizienz sind nicht vorhanden.	☐	☐	☐	☐
Kommentare:					

Kapitalverfügbarkeit, -beschaffung und -nutzung

		Als Hemmnis …			
		sehr wichtig	**eher wichtig**	**nicht so wichtig**	**unbedeutend**
16	Es wird nur auf die Investitionssumme geachtet, d. h. keine Lebenszykluskostenanalyse durchgeführt.	☐	☐	☐	☐
17	Bei Entscheidungen wird lediglich auf die Amortisationszeit geachtet, d. h. der Barwert oder die interne Verzinsung der Investition werden nicht ermittelt.	☐	☐	☐	☐
18	Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen werden erst mit nachrangiger Priorität ausgeführt, d. h., Priorität haben meist die Investitionen in Produktionsmaschinen und -anlagen.	☐	☐	☐	☐
Ergänzende Fragen für KMU:					
19	Kreditlinien sind nicht ausreichend, um (weitere) Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen zu täti-	☐	☐	☐	☐

		Als Hemmnis …			
		sehr wichtig	**eher wichtig**	**nicht so wichtig**	**unbe-deutend**
	gen.				
20	Da Investitionen ausschließlich aus Eigenkapital finanziert werden sollen dadurch steht kein Kapital für Effizienztechnologien zur Verfügung.	☐	☐	☐	☐
Kommentare:					

Weitere Hemmnisse

		Als Hemmnis …			
		sehr wichtig	**eher wichtig**	**nicht so wichtig**	**unbe-deutend**
21	Das Thema Energieeffizienz findet wenig Beachtung.	☐	☐	☐	☐
22	Mitarbeiter und Belegschaften ziehen bei der Umsetzung von organisatorischen Maßnahmen nicht mit.	☐	☐	☐	☐
Ergänzende Fragen für KMU:					
23	Durch Ablaufroutinen und Zeitmangel werden Einsparungen nicht umgesetzt.	☐	☐	☐	☐
24	Es gibt keinen ausgewiesenen Mitarbeiter, der sich mit Energiefragestellungen befasst.	☐	☐	☐	☐
Kommentare:					

Fördernde Faktoren

		Als fördernder Faktor…			
		sehr wichtig	**eher wichtig**	**nicht so wichtig**	**unbe-deutend**
25	Unternehmensleiter achten für das Image des Unternehmens auf eine umweltfreundliche und energieeffiziente Produktion (z. B. für Pressemitteilungen, jährliche Umweltberichte, Wettbewerbe etc.)	☐	☐	☐	☐
26	Bei innerbetrieblichen Verbesserungsvorschlägen werden Vorschläge zur Energieeffizienz besonders gern von der Geschäftsleitung gesehen.	☐	☐	☐	☐
27	Die regelmäßige Fortbildung/Messebesuche der Energieservice-Abteilung/des Energiebeauftragten	☐	☐	☐	☐

		Als fördernder Faktor…			
		sehr wichtig	**eher wichtig**	**nicht so wichtig**	**unbe-deutend**
	ist der Geschäftsführung ein Anliegen.				
28	Unternehmen verfügen über ein Umweltmanagementsystem (z. B. EMAS-Auditierung oder ISO 14001-Zertifizierung).	☐	☐	☐	☐
Ergänzende Fragen für Großunternehmen					
29	Unternehmensleiter möchte in einem „grünen Index“ wie beispielsweise dem Dow Jones Sustainability Index gelistet sein.	☐	☐	☐	☐.
Kommentare:					

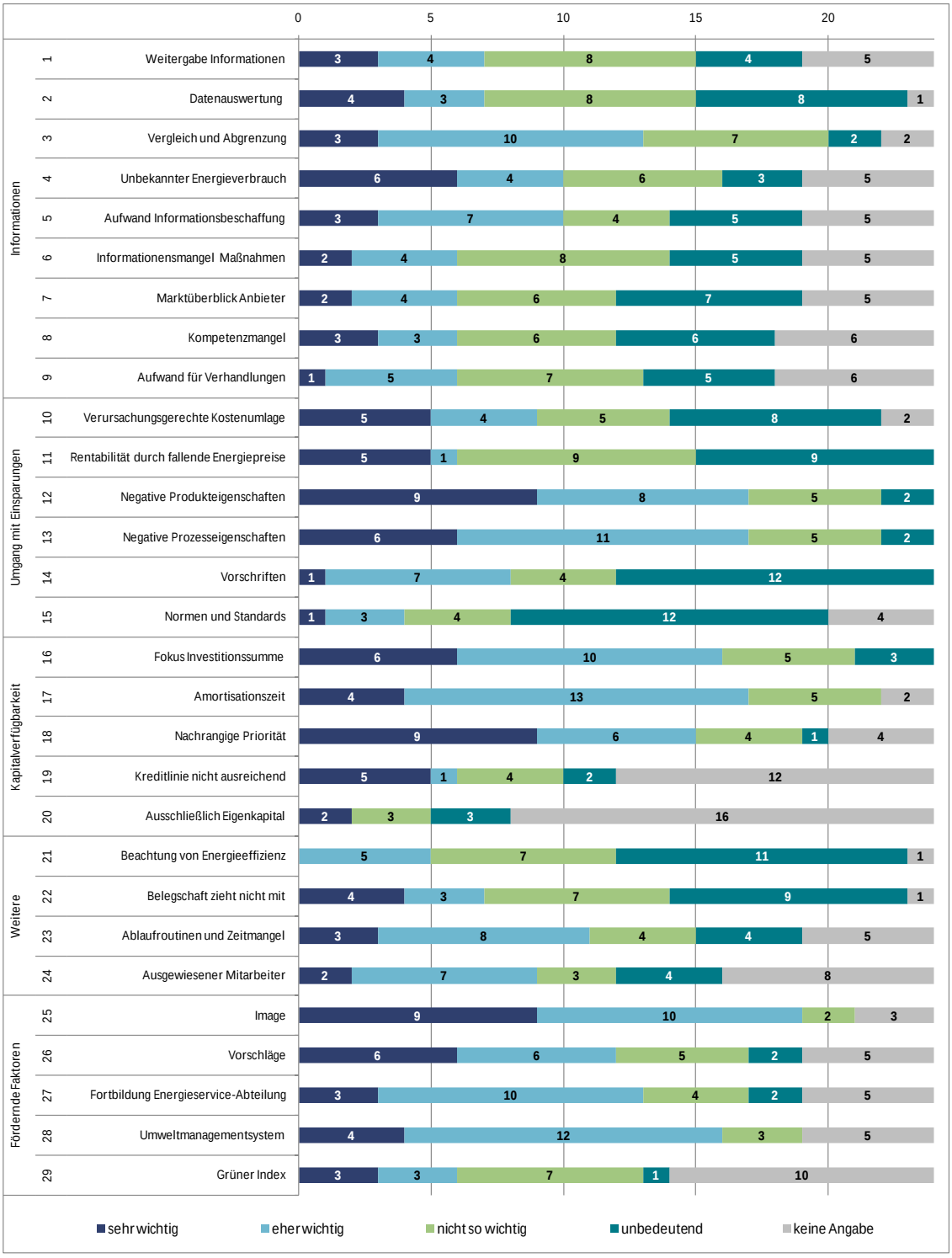
Abschließende Fragen

30	Gibt es weitere wichtige Hemmnisse oder fördernde Faktoren, die bisher nicht ausreichend berücksichtigt wurden?
31	Welche Maßnahmen des Staates oder anderer Institutionen könnten aus Ihrer Sicht dazu beitragen, Hemmnisse für den Einsatz von Energieeffizienztechnologien zu überwinden oder Treiber weiter zu fördern?
32	Wie schätzen Sie die zukünftige Entwicklung der Branche in Deutschland ein?
33	Könnten Sie uns noch weitere Experten nennen, die wir befragen sollten?
34	Dürfen wir Sie nochmals kontaktieren, wenn sich im Nachhinein noch Fragen ergeben?

2.7.2 Übersicht über alle Antworten aus den Expertengespräche

In der nachfolgenden Abbildung 2-28 werden die Antworten auf alle Fragen in den Expertengesprächen dargestellt.

Abbildung 2-28: Übersicht über alle Antworten aus den Expertengespräche



2.7.3 Überblick zu Strom-, Brennstoff-, und Primärenergiebedarf sowie THG-Emissionen je Prozess im Jahr 2007

	Strom		Brennstoffe		THG Emissionen [kt CO_2-eq]			Primärenergiebedarf	
Prozess	[PJ]	[TWh]	[PJ]	[TWh]	Indirekt (Strom)	Direkt energie-bedingt	Prozess-bedingt	[PJ]	[TWh]
Ernährungsgewerbe	30,4	8,5	75,7	21,0	5.450	4.723	500	154,9	43,0
Backwaren	6,4	1,8	10,6	2,9	1.144	662	-	27,2	7,6
Bierbrauen	3,9	1,1	9,8	2,7	707	611	500	20,1	5,6
Fleischverarbeitung	7,3	2,0	9,6	2,7	1.310	601	-	28,7	8,0
Molkerei	7,5	2,1	22,3	6,2	1.345	1.389	-	41,8	11,6
Stärke	2,5	0,7	5,7	1,6	448	356	-	12,2	3,4
Zucker	2,8	0,8	17,7	4,9	497	1.103	-	24,9	6,9
Glas	16,0	4,4	54,4	15,1	2.864	3.204	591	96,0	26,7
Behälterglas	6,2	1,7	25,6	7,1	1.116	1.505	190	41,8	11,6
Flachglas	5,8	1,6	19,1	5,3	1.037	1.123	312	34,1	9,5
Glasfasern	1,7	0,5	4,6	1,3	306	274	28	9,1	2,5
Übriges Glas	2,3	0,6	5,1	1,4	404	302	60	11,0	3,1
Grundstoffchemie	77,7	21,6	368,2	102,3	13.911	21.988	10.768	570,3	158,4
Adipinsäure	0,5	0,2	10,1	2,8	97	606	5.616	11,6	3,2
Ammoniak 1, Erdgas	1,1	0,3	19,4	5,4	192	1.161	429	22,2	6,2
Ammoniak 2, andere KW	0,5	0,1	18,2	5,0	95	1.084	1.585	19,5	5,4
Calciumcarbid	1,6	0,4	1,2	0,3	282	69	-	5,3	1,5
Chlor, Membran-Verf.	27,6	7,7	5,1	1,4	4.939	304	-	76,8	21,3
Ethylen 1, Naphtha	-	-	135,7	37,7	-	8.104	-	135,7	37,7
Ethylen 2, gasförmige KW	-	-	7,1	2,0	-	426	-	7,1	2,0
Ethylen 3, andere KW	-	-	38,3	10,6	-	2.289	-	38,3	10,6
Industrieruß	1,2	0,3	43,0	12,0	212	2.570	-	46,1	12,8
Methanol 1, Erdgas	-	-	3,1	0,9	-	185	-	3,1	0,9
Methanol 2, erdölbasierte KW	1,0	0,3	25,5	7,1	172	1.520	-	28,0	7,8
Methanol 3, Klärschlamm	0,0	0,0	1,9	0,5	4	113	-	1,9	0,5
Polycarbonat	1,2	0,3	5,9	1,6	217	349	-	9,0	2,5
Polyethylen	5,8	1,6	1,8	0,5	1.039	109	-	16,9	4,7
Polypropylen	2,2	0,6	1,5	0,4	396	91	-	7,3	2,0
Polysulfone	1,0	0,3	8,3	2,3	187	498	-	11,0	3,1
Salpetersäure	0,0	0,0	- 0,4	- 0,1	2	- 24	3.138	- 0,4	- 0,1
Sauerstoff	7,3	2,0	-	-	1.309	-	-	19,0	5,3
Soda	0,5	0,1	16,0	4,5	84	958	-	17,3	4,8
TDI	1,1	0,3	10,7	3,0	198	637	-	13,5	3,8
Titandioxid 1, Sulfat	1,3	0,4	14,0	3,9	229	833	-	17,3	4,8
Titandioxid 2, Chlor	0,3	0,1	1,8	0,5	46	107	-	2,5	0,7
Keramik	3,4	1,0	18,7	5,2	616	1.101	2.114	27,6	7,7
Feuerfestkeramik	1,1	0,3	6,0	1,7	188	356	547	8,8	2,4
Fliesen, Platten, andere	1,0	0,3	6,8	1,9	186	403	380	9,5	2,7
Haushaltswaren	0,3	0,1	1,8	0,5	62	104	192	2,7	0,7
Sanitärkeramik	0,2	0,1	1,1	0,3	42	68	102	1,8	0,5
Technische Keramik u. Sonstig	0,8	0,2	2,9	0,8	138	170	893	4,9	1,4
Metallerzeugung	69,4	19,3	738,7	205,2	12.422	71.628	-	919,2	255,3
Elektrostahl - EAF	28,2	7,8	10,2	2,8	5.056	986	-	83,6	23,2
Koksofen	1,1	0,3	26,9	7,5	205	2.608	-	29,9	8,3
Oxygenstahl - Hochofen	14,1	3,9	568,3	157,9	2.521	55.102	-	604,9	168,0
Sintern	3,5	1,0	64,4	17,9	627	6.240	-	73,5	20,4
Walzstahl	22,2	6,2	60,1	16,7	3.969	5.830	-	117,8	32,7
Nicht-Eisen Metalle	61,0	16,9	37,3	10,3	10.916	2.622	465	195,8	54,4
Aluminium Gießereien	4,6	1,3	6,0	1,7	830	420	-	18,0	5,0
Aluminium Halbzeuge	8,2	2,3	11,1	3,1	1.462	781	-	32,3	9,0
Aluminium primär	29,6	8,2	2,9	0,8	5.290	202	465	79,7	22,1
Aluminium sekundär	1,4	0,4	7,7	2,1	256	543	-	11,4	3,2
Kupfer primär	0,8	0,2	2,4	0,7	148	167	-	4,5	1,3
Kupfer sekundär	0,8	0,2	1,5	0,4	152	102	-	3,7	1,0
Kupferbearbeitung	10,2	2,8	5,4	1,5	1.817	378	-	31,8	8,8
Primärzink	5,3	1,5	0,3	0,1	951	24	-	14,1	3,9
Sekundärzink	0,1	0,0	0,1	0,0	10	6	-	0,2	0,1
Papiergewerbe	74,4	20,7	153,4	42,6	13.321	7.926	-	346,9	96,3
Altpapierstoff	14,8	4,1	8,5	2,4	2.648	439	-	47,0	13,0
Holzstoff	11,5	3,2	- 2,9	- 0,8	2.064	- 151	-	27,1	7,5
Papier	44,5	12,4	128,3	35,6	7.973	6.628	-	244,1	67,8
Zellstoff	3,6	1,0	19,5	5,4	636	1.010	-	28,8	8,0
Steine-Erden	18,2	5,0	131,7	36,6	3.254	9.112	17.042	179,0	49,7
Aufbereitung von Kalkstein	3,4	0,9	-	-	605	-	-	8,8	2,4
Gips	0,2	0,1	1,0	0,3	34	66	-	1,4	0,4
Kalkbrennen	1,0	0,3	26,0	7,2	176	1.796	5.508	28,5	7,9
Kalkmahlen	0,8	0,2	-	-	151	-	-	2,2	0,6
Klinker Brennen (halbtrocken)	0,3	0,1	6,8	1,9	49	472	896	7,5	2,1
Klinker Brennen (trocken)	3,2	0,9	79,4	22,0	568	5.491	11.905	87,6	24,3
Zementmahlen	6,7	1,9	-	-	1.196	-	-	17,4	4,8
Ziegel	2,7	0,7	18,6	5,2	475	1.286	1.540	25,5	7,1
Gesamtergebnis	**351**	**97**	**1.578**	**438**	**62.754**	**122.304**	**31.480**	**2.490**	**692**

TEIL II Branchenanalysen

3 Grundstoffchemie

A. Hassan (TU Berlin)

3.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse

3.1.1 Branchenbeschreibung

3.1.1.1 Hintergrund

Die chemische Industrie in Deutschland ist die größte in Europa, mit einem Anteil von ca. 25 % des gesamten europäischen Umsatzes. Das entspricht einem Anteil von etwa 8 % der weltweiten Chemieproduktion. Sie ist auch einer der energieintensivsten Industrien mit ca. 5,22 % des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland für das Jahr 2007 (AGEB 2007) bzw. 22,23 % des Energieverbrauches beim Verarbeitenden Gewerbe (VCI 2008a, S. 74).

Nach der ersten Erdölkrise hat man in der chemischen Industrie aus wirtschaftlichen Gründen angefangen, sich intensiver mit der Energieeinsparung zu beschäftigen. Auf der Ebene von einzelnen Apparaten und Maschinen konnte die Energieeffizienz merklich gesteigert werden. Bei Gesamtanlagen und Chemiestandorten haben Maßnahmen zur Energieintegration zu signifikanten Energieeinsparungen geführt. Seit Anfang dieses Jahrzehnts beschäftigt man sich im Rahmen der Klimadiskussion und aufgrund steigender Energiepreise noch intensiver mit der Energieeffizienz. Jedoch besteht ohne Zweifel noch immer ein großes Potenzial für eine energieeffizientere chemische Produktion.

Hinzu kommt, dass bei der Produktion in der chemischen Industrie nicht unbeachtliche Mengen an Treibhausgasen (THG) entstehen. Strengere Umweltgesetze in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts führten zu einer bedeutenden Reduktion. Die geplante Einführung des Emissionshandels für die chemische Industrie im Jahre 2013 schafft einen Anreiz, die THG-Emissionen weiter zu reduzieren.

Als Ausdruck des neuen Interesses für die Energieeffizienz haben einige Chemie- und Engineering-Unternehmen damit angefangen, Instrumente für die Steigerung der Energieeffizienz zu entwickeln bzw. zu vermarkten. In diesem Zusammenhang sind die von der Bayer AG und der Bayer Technical Services entwickelten „Bayer Climate Check“ und „Climate Footprint“ (siehe Bayer Climate Check, o.J.) bzw. die von der BASF entwickelte Methode „BASF Ökoeffizienz-Analyse“ zu nennen.

Dabei entstanden 2004 fast 87 % der energiebedingten Emissionen in der chemischen Industrie durch die Erzeugung von Chemiegrundstoffen[17]. Ähnliches gilt für die THG-Emissionen mit 85 %[18] (McKinsey 2006, S. 57). Kapitel 2 beschäftigt sich mit den Energieeinsparpotenzialen in der Grundstoffchemie.

3.1.1.2 Derzeitiger Stand der Arbeiten

In den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts erschienen zahlreiche Veröffentlichungen zu einzelnen Themen der Energieeinsparung in der chemischen Industrie, wie z. B. Wärmeintegration bei großen Chemieanlagen, Wärmedämmung, Optimierung von Wärmetauschern, Synthese von Rektifizierkolonnen usw. Andere Themen der Energieeinsparungen wurden erst in den letzten Jahren aufgegriffen und intensiver behandelt. Beispiele hierzu sind drehzahlgeregelte Pumpen, energieeffiziente Prozessleitsysteme, energetische Schwachstellenanalysen, Energieeinsparung bei Trennverfahren usw.

Nur wenige Studien haben sich systematisch mit der Ermittlung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen in der chemischen Industrie in Deutschland beschäftigt[19]. Dabei wurden ausgewählte Prozesse aus der Grundstoffchemie untersucht. Jedoch sind die gemachten Angaben in der Regel Durchschnittswerte, gemittelt über verschiedene Prozessvarianten. Die Anlagen aus denen die Werte stammen, wurden außerdem zu verschiedenen Zeitpunkten errichtet. Sie geben nicht unbedingt den aktuellen Stand des Energieverbrauchs wieder, da Chemieanlagen in Deutschland regelmäßig modernisiert werden. Sie sind aber auf jeden Fall brauchbar für eine überschlägige Darstellung.

Eine noch geringere Anzahl von Untersuchungen wurde zu den Einsparpotenzialen, den Technologiebewertungen sowie den notwendigen Minderungsmaßnahmen in diesem Industriezweig veröffentlicht. Sie wurden für nur wenige energieintensive Prozesse ermittelt, wie z. B. zur Herstellung von Ammoniak und Methanol sowie Steam-Cracker und Chloralkalielektrolyse. Neben den IPTS-Merkblättern zu den besten verfügbaren Technik, die auch den Aspekt der Energieeffizienz berücksichtigen, haben vor allem Prozessentwickler hierzu Informationen bekannt gegeben. Jedoch sind oft die Rahmenbedingungen unbekannt.

---

17 Energiebedingte Emissionen: durch Strom- und Dampferzeugung sowie Wärmebereitstellung entstehende CO_2-Emissionen.

18 THG-Emissionen: alle in der chemischen Industrie entstehende Treibhausgas-Emissionen.

19 Siehe z. B. Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008; Weiss, Neelis, Patel 2006; McKinsey 2006.

Investitions- und Betriebskosten im Zusammenhang mit konventionellen und neueren Technologien sind kaum veröffentlicht worden. Es ist bekannt, dass Kostendaten in der chemischen Industrie oft vertraulich behandelt werden. Dagegen veröffentlichen Technologielieferanten und Unternehmen des Chemieanlagenbaus in einigen Fällen im Zusammenhang mit dem Marketing der eigenen Technologie solche Daten. Allerdings sind die Daten nicht immer brauchbar. Beispielsweise sind Berechnungsgrundlage und die Bilanzgrenzen oft unklar. Bei Prozessen der organischen Chemie werden meistens Daten zum Ressourcenverbrauch ohne Differenzierung nach energetischem und nichtenergetischem Verbrauch mitgeteilt.

Anders sieht es mit Kosten- und Energieverbrauchsdaten von in Serie hergestellten Apparaten und Maschinen aus, wie z. B. von Pumpen, Kompressoren, Trocknern, Kristallisatoren usw. Solche Daten werden beispielsweise in Herstellerinformationsbroschüren bzw. auf Anfrage mitgeteilt. Sie müssen aber jedes Mal analysiert und auf ihre Brauchbarkeit geprüft werden. Deshalb sind derzeit kaum belastbare Daten zu Energieeffizienzpotenzialen bei den chemischen Grundstoffen vorhanden.

3.1.1.3 Angewandte Methodik

Repräsentativ für die chemische Industrie wird in dieser Untersuchung die Grundstoffindustrie behandelt, die mehr als 85 % des Energieverbrauchs und 87 % der THG-Emissionen dieses Industriesektors für sich beansprucht (McKinsey 2006, S. 57). Wegen der großen Anzahl von Prozessen in der Grundstoffindustrie wird eine Auswahl getroffen. Das Hauptkriterium dabei ist der Gesamtenergieverbrauch bei der Herstellung des jeweiligen Produktes in Deutschland. Außerdem werden Prozesse mit bedeutenden Mengen an direkten CO_2-Emissionen (Prozess-CO_2) bzw. an anderen THG-Emissionen untersucht. Die ausgewählten Prozesse verbrauchen den größten Teil der Energie und können damit eine Aussage über den Energieverbrauch der Branche machen.

Zur Bestimmung des Energiebedarfs wird eine Bottom-up-Analyse für das Jahr 2007 durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2). Dabei wird der eigentliche chemische Prozess (Inside of Battery Limits (ISBL)) als Black-Box betrachtet. Erfasst werden sollen die Input- und Outputströme für elektrischen Strom, Dampf und Brennstoff und damit die „Sekundärenergie“. Zum Vergleich von verschiedenen Prozessen werden Dampf, Brennstoff und Strom auf ihre ursprüngliche Form als Primärenergie zurückgeführt. Dabei werden für die Ermittlung der Primärenergie aktuelle, pauschale Umrechnungsfaktoren verwendet. Weitere Energieströme, wie Druckluft, Stickstoff, Kühlwasser usw., werden nicht erfasst. Auf die Behandlung der Bereitstellung von Strom und Dampf wird verzichtet. Außerdem wird nicht zwischen Eigenerzeugung und Fremdbezug unterschieden. Ferner

wird auf die Behandlung der Nebenanlagen (Outside of Battery Limits (OSBL)), z. B. solche für die Erzeugung von Strom und Dampf, für die Aufbereitung von Wasser und die Behandlung von Abwasser, verzichtet.

Für jeden Prozess werden folgende Untersuchungsergebnisse zusammengestellt: kurze Beschreibung der in Deutschland gebräuchlichen Prozessvarianten, Produktionszahlen für das Basisjahr 2007 sowie Energieverbrauch, Prozess-CO_2 und THG-Emissionen (siehe Kapitel 3.2).

Zur Kontrolle wird eine zweite Methode angewandt, nämlich ein Top-down-Modell. Der Energieverbrauch der Grundstoffchemie wird summarisch aus verfügbaren Statistiken der AG Energiebilanzen und des Statistischen Bundesamtes ermittelt. Abweichungen beider Betrachtungsweisen werden bestimmt und begründet.

In einem weiteren Schritt werden die technischen und wirtschaftlichen Energieeinsparpotenziale für die ausgewählten Prozesse ermittelt (zur Definition siehe Kapitel 1.4). Für jeden Prozess werden dann folgende Untersuchungsergebnisse zusammengestellt: zukünftige Entwicklung der Produktion in Deutschland bis 2035, Beste Verfügbare Technik (BVT), Analyse der Energieeinsparoptionen und -potenziale und chemiespezifische Hemmnisse für die Steigerung der Energieeffizienz (Kapitel 3.3).

Ferner werden prozessunabhängig chemierelevante Anlagenkomponenten, wie Reaktoren, Stofftrennapparate usw., und chemiespezifische Aspekte bei Querschnittstechnologien, wie die Prozessleittechnik, die Dämmstoffe usw., untersucht. Außerdem werden Maßnahmen vorgestellt, die zur Reduzierung des Energieverbrauchs führen, wie z. B. die Wärmeintegration, energieeffiziente Prozesssynthese usw. Dann werden chemiespezifische Szenarien zur Wirkung der Energieeinsparoptionen und -potenziale bis 2035 entwickelt (Kapitel 3.4).

Außerdem werden die branchenspezifischen Hemmnisse besprochen (Kapitel 3.5). Abschließend werden chemiespezifische Handlungsfelder sowie bestehende und geplante energiepolitische Instrumente identifiziert (Kapitel 3.6).

3.1.1.4 Informationsquellen

Zur Ermittlung der Produktionszahlen für das Basisjahr 2007 werden Angaben des Statistischen Bundesamtes, des VCI und der chemischen Industrie herangezogen. Für die Beschreibung der Prozesse stehen zahlreiche Standardwerke, Zeitschriftenartikel, Broschüren von Technologieentwicklern und Anlagenbauunternehmen usw. zur Verfügung. Der Energieverbrauch, das Prozess-CO_2 und die anderen THG-Emissionen werden aus Studien von Forschungsinstituten und Unternehmensberatern, meistens im

Auftrage der EU bzw. von nationalen Behörden in Deutschland, ermittelt (siehe Kapitel 3.2.4).

Zur Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Produktion in Deutschland bis 2035 werden Veröffentlichungen des VCI und des CEFIC sowie von zahlreichen Unternehmensberatern, Forschungsinstituten und Chemieunternehmen herangezogen.

Für die Ermittlung der Besten Verfügbaren Technik (Stand der Technik) und für die Analyse der Einsparoptionen und –potenziale werden sowohl die IPTS-Merkblätter zu dem jeweiligen Thema als auch zahlreiche Veröffentlichungen von Fachverbänden, Technologieentwicklern, Forschungsinstituten und Anlagenbauunternehmen verwendet. Für die chemiespezifischen Hemmnisse werden die unten erwähnten Gespräche mit Chemieunternehmen, Chemieanlagenbauunternehmen sowie Forschungsinstituten zugrunde gelegt.

Veröffentlichte Daten weisen jedoch einige Mängel aus, sodass die Datenqualität in vielen Fällen unbekannt ist:

- Die Informationen sind oft unvollständig.
- Oft liegen Durchschnittswerte verschiedener Technologien sowie verschiedener Errichtungsjahre und Auslastungen vor.
- Die Daten sind nicht immer transparent. Manchmal sind die Prozesse bzw. Prozessvarianten nicht genau spezifiziert. Der Zeitpunkt der Datenermittlung ist oft unbekannt.
- Die Daten sind teilweise älteren Datums und damit nicht ganz aktuell, da sich die Energieeffizienz für viele Prozesse gebessert hat.
- Die Daten gelten für eine Vollauslastung. Jedoch werden Chemieanlagen, in Abhängigkeit von der Konjunktur, mit hoher oder niedriger Auslastung gefahren.

Zur Vervollständigung der veröffentlichten Daten wurden Informationen bei Chemieunternehmen, Anlagenbauern, Apparate- und Maschinenherstellern, Energieberatungsfirmen, Verbänden und Forschungsinstituten akquiriert.

Informationen zum Zustand der Chemieanlagen in Deutschland stellen eine wichtige Voraussetzung dar, um die wirtschaftlichen Energieeinsparpotenziale zu ermitteln. Der Informationsstand ist jedoch sehr mangelhaft. Informationen werden aus Gründen der Vertraulichkeit kaum veröffentlicht. Beispiele hierzu sind:

- Die angewandten Prozessvarianten sind in vielen Fällen nicht bekannt.
- Typisch für die chemische Industrie ist, dass ältere Anlagen immer wieder modernisiert werden. Dadurch ist der Energieverbrauch der heutigen Anlagen nicht identisch

mit dem zum Zeitpunkt der Anlagenerrichtung. Auch diese Informationen werden nicht veröffentlicht.

Seit einigen Jahren werden die Prozesse durch die chemische Industrie bzw. den Chemieanlagenbau systematisch auf Energieverbrauch und Energieeffizienz untersucht. Energieverbrauchsmessungen und Schwachstellenanalysen werden durchgeführt. Diese Daten werden vertraulich behandelt.

3.1.1.5 Abgrenzung der Grundstoffchemie

Die Abgrenzung der chemischen Grundstoffindustrie erfolgt anhand der Kriterien des VCI. Dabei werden die Wirtschaftszweignummern (WZ-Nummern) des Statistischen Bundesamtes zur genaueren Identifikation verwendet (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Abgrenzung der chemischen Grundstoffindustrie

Nummerierung	**VCI-Abgrenzung der Chemiesparten**	**WZ-Nummern** $_{\text{Destatis}}$
1.	Anorganische Grundchemikalien	
1.1	Industriegase	2411
1.2	Anorganische Grundstoffe	2413
2.	Organische Grundstoffe/ Petrochemikalien und Derivate	2414, 2415 (teilweise auch 2413)
3.	Polymere	
3.1	Kunststoffe	2416
3.2	Synthetischer Kautschuk	2417

Nach dieser Definition gehören zu den chemischen Grundstoffen die anorganischen Grundstoffe, die Düngemittel und Stickstoffverbindungen, die Petrochemikalien und deren Derivate sowie die Polymere in Primärform.

Raffinerieprozesse, obwohl sie manchmal diese Charakteristika erfüllen, sollen hier nicht zu der genannten Gruppe zugerechnet werden. Jedoch werden diejenigen chemischen Produkte berücksichtigt, die in Raffinerien produziert, wie z. B. Methanol, Aromaten, Propylen und Wasserstoff, und an die chemische Industrie zur Weiterverarbeitung abgegeben werden.

Die Zuordnung der Grundstoffe zu den drei oben erwähnten Segmenten erfolgt überwiegend nach der Einteilung des Statistischen Bundesamtes. Danach gehören zu den organischen Grundstoffen sowie den Petrochemikalien und ihren Derivaten (im Folgenden als organische Grundstoffe bezeichnet) diejenigen Verbindungen, zu deren Herstellung organische Rohstoffe eingesetzt werden, unabhängig davon, ob sie ein Kohlenstoffatom enthalten oder nicht (WZ-Nummern 2414 und 2415). So zählt Ammo-

niak zu den organischen Grundstoffen, obwohl es kein Kohlenstoffatom besitzt. Eine Ausnahme bilden dabei Calciumcarbid und Industrieruß, beide mit den WZ-Nummern 2413. In der Fachliteratur findet man oft eine andere Systematisierung. Danach zählen Ammoniak, Salpetersäure usw. zu den anorganischen Chemikalien (siehe z. B. Büchel, Moretto, Wodisch 1999).

3.1.1.6 Wirtschaftliche Bedeutung der Grundstoffchemie

Die chemische Industrie in Deutschland weist mit einem Anteil von etwa 25 % an der europäischen Chemieindustrie den höchsten Umsatz auf. Mit einem Umsatz von ca. 180 Mrd. € pro Jahr steht sie an vierter Stelle des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland hinter dem Fahrzeugbau, der Elektrotechnik und dem Maschinenbau. Außerdem ist die deutsche chemische Industrie eine der größten Exporteure in Deutschland mit ca. 74 % Exportanteil (VCI 2008a, S. 77).

Der Anteil der Grundstoffchemie am Produktionswert der gesamten chemischen Industrie liegt bei ca. 46 % (VCI 2008a). Es kann also vereinfachend davon gesprochen werden, dass je die Hälfte des Produktionswertes der chemischen Industrie in Deutschland von den Chemiegrundstoffen im oben genannten Sinne, einschließlich der Industriechemikalien, auf der einen Seite und von den Feinchemikalien und Spezialprodukten auf der anderen Seite erwirtschaftet werden.

Die Grundstoffchemie ist dabei Lieferant von Grundstoffen und Industriechemikalien an die anderen Sektoren der chemischen Industrie, wie Feinchemikalien und Spezialitäten, sowie der Pharmaindustrie. Außerdem versorgt sie die gesamte restliche Industrie mit chemischen Produkten. Die Polymere bilden dabei mengenmäßig die größte Gruppe der gelieferten Produkte.

Charakteristisch für die Grundstoffchemie ist die großtechnische Produktion. Dabei wird die Grundstoffchemie durch Unternehmen der Großchemie dominiert. Die organischen Grundstoffe werden zum größten Teil durch einige wenige Unternehmen hergestellt, wie z. B. BASF, Bayer, Dow Chemical und Ineos. Ähnliches gilt für die Polymere in Primärform. Hauptproduzenten sind Dow Chemical, Ineos, Lanxess, LyondellBasell und Sabic. Bei den anorganischen Chemikalien wird Chlor von den großen integrierten Chemieunternehmen hergestellt, während andere anorganische Produkte meistens von spezialisierten Chemieunternehmen produziert werden.

3.1.1.7 Energieverbrauch, CO_2- und andere THG-Emissionen in der Grundstoffchemie

Die chemische Industrie in Deutschland ist nach der eisenproduzierenden Industrie zweitgrößter industrieller Energieverbraucher. Die Branche ist zudem der mit Abstand bedeutendste Strom- und der größte industrielle Erdgasnutzer. Der Anteil der chemischen Industrie am Gesamtverbrauch der Industrie liegt bei 41 % (1.300 PJ), einschließlich der nicht-energetischen Verwendung. Davon werden 870 PJ als Rohstoffe (nicht-energetischer Einsatz) verwendet. Dies entspricht 12,5 % des gesamten Primärenergieverbrauchs in Deutschland (diese Werte gelten für 2003 nach AGEB 2007).

Für die hier betrachteten Chemiegrundstoffe ergibt sich in Deutschland ein Energiekostenanteil an den Fertigungskosten von 16 % bis 48 %. Bezogen auf die Herstellkosten liegen die Energiekosten noch immer zwischen 10 % und 44 % (Maier, Thomas 2000). Der Energieverbrauch für die Grundstoffchemie und die chemische Industrie insgesamt wird in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Bruttoproduktionswert und Endenergieverbrauch (ohne nicht-energetischen Verbrauch) der chemischen Industrie in Deutschland

Branche	**Bruttoproduktionswert (Mrd. € /a)**	**Brennstoffe (inkl. Fernwärme) (PJ/a)**	**Strom (PJ/a)**	**Gesamte Endenergie in (PJ/a)**
Chemische Industrie	176,09	362,35	188,89	551,24
Grundstoffchemie	83,26	298,01	162,10	460,10
Sonstige chemische Industrie	92,84	64,34	26,80	91,14

Quelle: AGEB 2009a; St. BA 2009a

Die Energie wird in der chemischen Industrie für verschiedene Zwecke verwendet. Brennstoffe werden für die Bereitstellung von Prozesswärme, zur thermischen Aufbereitung und für die Erzeugung von Dampf benutzt. Beim Strom werden etwa 70 % für motorische Antriebe und 20 % für elektrochemische Prozesse eingesetzt (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. xvii)[20]. Bei den Antrieben erfordern Kompressoren und Pumpen die meiste Energie, gefolgt von anderen Einsatzgebieten (siehe Tabelle 3-3).

Betrachtet man den Energieverbrauch der Chemiesparten, ist die organische Grundstoffindustrie, einschließlich der Petrochemie, der Hauptenergieverbraucher. An zwei-

20 Vgl. auch Stein 2006, S. 308.

ter und dritter Stelle stehen die anorganische Grundstoffindustrie und die Polymerindustrie (siehe Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 49).

Dabei bilden sich THG-Emissionen als direkte oder indirekte Emissionen durch:

- Verbrennung von Brennstoffen zur Wärmeerzeugung (indirekte Emissionen),
- Verbrennung von Brennstoffen zur Erzeugung von Strom und Dampf (indirekte Emissionen),
- Bildung von Prozess-CO_2 (prozessbedingte CO_2-Emissionen, direkte Emissionen) und
- Bildung von anderen THG-Emissionen im Prozess, wie von Distickstoffmonoxid (N_2O), FCKW usw. (direkte Emissionen).

Tabelle 3-3: Geschätzter differenzierter Stromverbrauch in der chemischen Industrie in Deutschland im Jahre 2003

Prozessverbrauch	**Absoluter Verbrauch (PJ/a)**	**Anteile (%)**
Antriebe	126	77 % vom Prozessverbrauch
Gebläse	13	10 % von den Antrieben
Pumpen	9	23 % von den Antrieben
Kompressoren	31	25 % von den Antrieben
Prozesskühlung	20	16 % von den Antrieben
Andere	33	26 % von den Antrieben
Elektrochemische Prozesse	36	22 % vom Prozessverbrauch
Prozessheizung	1	1 % vom Prozessverbrauch
Summe Prozessverbrauch	163	100 %
Nicht-Prozessverbrauch	14	8 %
Gesamtsumme	180	100 %

Quelle: Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 53

3.1.1.8 Energiespezifische Charakteristika der chemischen Industrie

Der Energieverbrauch in der chemischen Industrie wird durch eine Anzahl von charakteristischen Eigenschaften beeinflusst:

- Im Vergleich zu anderen Industriebranchen ist die Produktionskette in der chemischen Industrie hochkomplex. Die Prozessstufen sind stofflich und energetisch miteinander stark gekoppelt (horizontale und vertikale Integration). Dadurch entstanden weltweit große Standorte, wie z. B. in Deutschland in Ludwighafen, Leverkusen und Frankfurt/Hoechst. Diese Tatsache beeinflusst die Energiebereitstellung wesentlich und bietet außerdem Möglichkeiten der Wärmeintegration.

- Die eigene Produktion von Strom und Dampf ist üblich (Kuppelproduktion in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK)). Fast ein Drittel des Stromes wird durch Eigenerzeugung produziert. Beim Dampf ist es mehr als 80 %.
- Fossile Brennstoffe sind gleichzeitig Rohstoffe und Brennstoffe für die chemischen Prozesse und für die Erzeugung von Dampf und Strom.
- Erdgas dominiert mit einem Anteil von 85 % bei den Brennstoffen und wird überwiegend in KWK-Anlagen verwendet (Stein 2006, S. 256).
- Im nicht-energetischen Bereich ist dagegen Naphtha mit 57 % der Hauptrohstoff in der organischen Grundstoffchemie (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. IV).
- Wärme wird auch aus Abhitze und durch Abfallverbrennung gewonnen.
- Der Anteil des Stromverbrauchs ist mit mehr als 50 %, bezogen auf den Primärenergieverbrauch, relativ hoch.
- Die Prozesswärme > 400 °C liegt bei über 50 %. Sie kann nicht über KWK bereitgestellt werden und erfordert eine gesonderte Erzeugung von Wärme.
- Ein Teil der Energie in der chemischen Industrie wird durch Verbrennung von kohlenwasserstoffhaltigen Nebenprodukten gedeckt. Damit fließt ein Teil der nicht-energetischen Verwendung in die Energiebilanz eines Prozesses bzw. eines Chemiestandortes ein.
- Die Energieeinsparung der chemischen Industrie in den letzten Jahren wurde durch Verringerung des Verbrauchs an Brennstoff und Dampf erzielt. Dagegen beobachtet man eine Zunahme des Stromverbrauchs.

Zusätzlich wird der Energieverbrauch in der Grundstoffchemie durch eine Anzahl von energierelevanten Eigenschaften wesentlich mitbestimmt:

- Große Durchsätze: Chemiegrundstoffe werden in großen Mengen hergestellt. Dadurch ist der absolute Energieverbrauch hoch, auch wenn der spezifische Energiebedarf gering ist.
- Kontinuierliche und vollautomatische Anlagen: Dadurch ist die Verwendung der Energie im Vergleich zu diskontinuierlicher Produktion effizienter, bedingt durch die Möglichkeiten zur Verringerung von Energieverlusten und zur besseren Energieintegration.
- Hochdrucksynthesen: Viele der organischen Grundstoffprozesse sind Gasphasen-Prozesse und laufen unter höheren Drücken und Temperaturen. Dies führt zu einem hohen Energiebedarf für die Aufheizung der Stoffströme und für die Kompression der Gase.
- Katalytische Prozesse: Die meisten Prozesse der Grundstoffindustrie laufen katalytisch ab. Dabei spielt die Katalysatortechnik eine entscheidende Rolle, Ausbeute

und Selektivität zu optimieren und damit den spezifischen Energiebedarf zu reduzieren.

- Integrierte Standorte: Die meisten Produktionsanlagen der Grundstoffchemie stehen an großen, historisch gewachsenen Standorten, die eine bessere Möglichkeit der Standortwärmeintegration bieten.

Auch die Auswahl der Rohstoffe kann den Energieverbrauch bzw. die CO_2-Emissionen wesentlich beeinflussen. Beispiele hierzu sind wie folgt:

- Kohlebasierte Prozesse haben regelmäßig einen höheren Energieverbrauch als Naphtha- oder erdgasbasierte Prozesse, wie z. B. bei der Herstellung von Synthesegas.
- Rohstoffe, die eine aufwändige Aufbereitung aufgrund von Verunreinigungen benötigen, weisen einen höheren Energieverbrauch auf, z. B. Calciumcarbonat bei der Soda-Herstellung.
- Unterschiedliche CO_2-Emissionen pro erzeugte Produkteinheit können je nach Rohstoff entstehen.

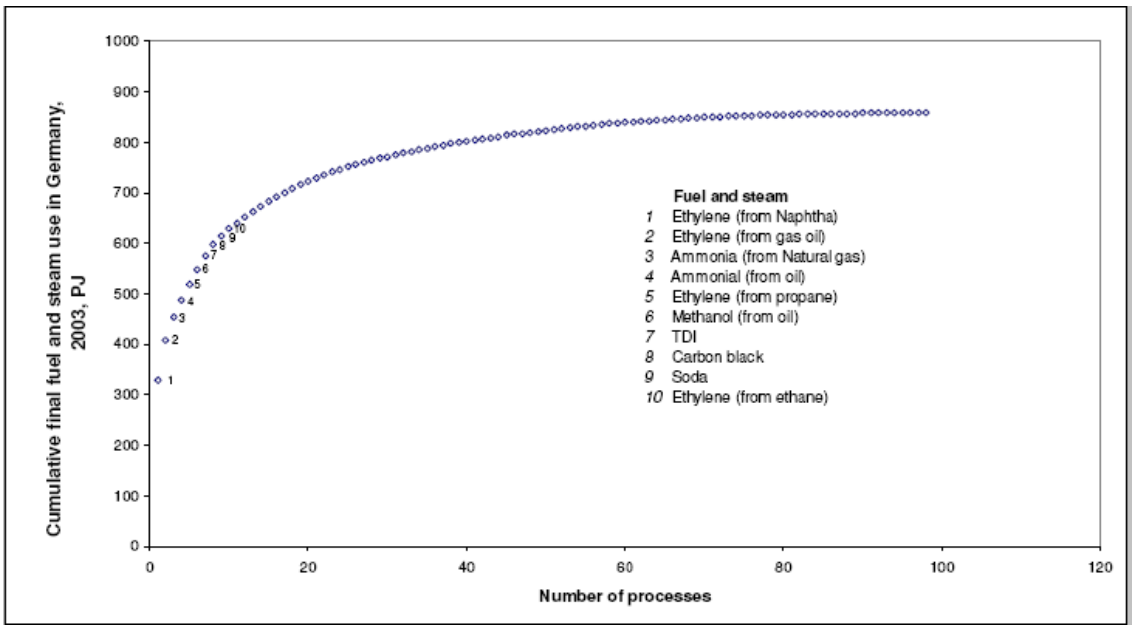
3.1.2 Auswahl der Prozesse

3.1.2.1 Untersuchungsumfang

Wegen der sehr großen Anzahl von Prozessen in der Grundstoffchemie wird für diese Untersuchung eine Prozessauswahl getroffen. Die ausgewählten Prozesse sollen dabei eine Aussage im Sinne der Ziele der Studie, nämlich die Ermittlung der Energieeinsparpotenziale in wichtigen Industriesektoren bis 2035, machen. Saygın, Patel, und Marscheider-Weidemann haben gezeigt, dass weniger als 20 Prozesse mehr als 80 % des Energieverbrauchs repräsentieren (siehe für Abbildung 3-1 Brennstoff und Dampf und Abbildung 3-2 für Strom) (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 41). Diese Aussage wird nun für die vorliegende Untersuchung zugrunde gelegt.

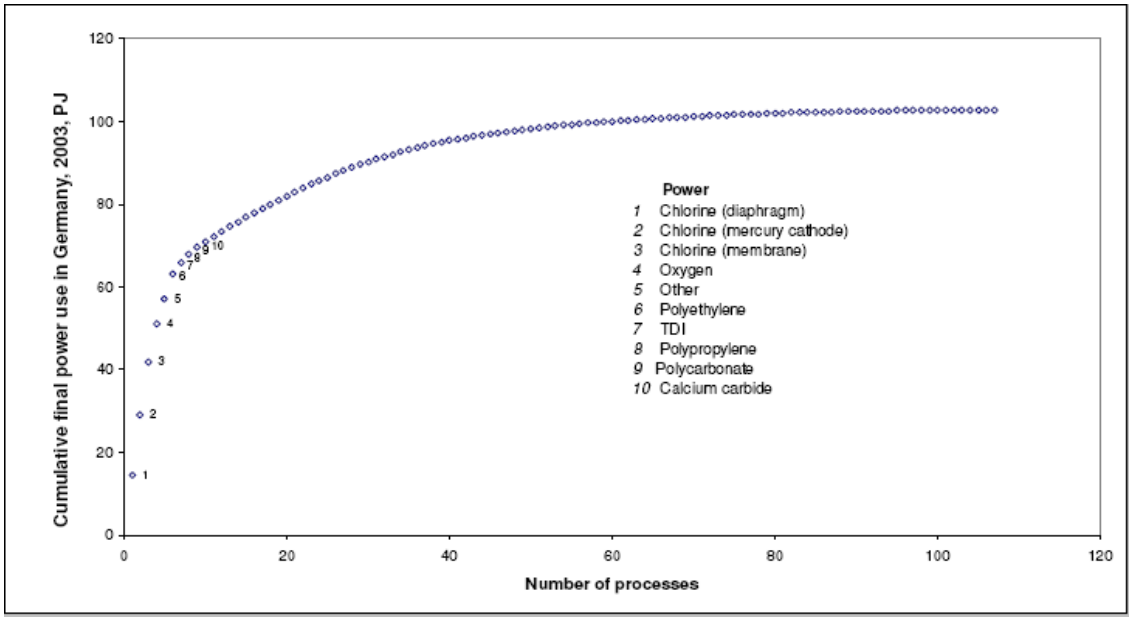
Eine Aussage über die gesamte Grundstoffchemie bzw. der gesamten chemischen Industrie kann man mit Hilfe von Zuschlagsfaktoren erreichen, die man aus statistischen Daten bzw. durch Abschätzungen ermittelt.

Abbildung 3-1: Kumulativer Brennstoff- und Dampfverbrauch in Deutschland in Abhängigkeit von einer Anzahl ausgewählter Prozesse der Grundstoffchemie



Quelle: Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 41

Abbildung 3-2: Kumulativer Stromverbrauch in Deutschland in Abhängigkeit von einer Anzahl ausgewählter Prozesse der Grundstoffchemie



Quelle: Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 41

3.1.2.2 Kriterien für die Auswahl der Prozesse

Aus der Gruppe der chemischen Grundstoffe werden Prozesse mit hohem Energieverbrauch (Produktionsmenge x spezifischem Energieverbrauch) und Prozesse mit hohen Emissionen an CO_2 und anderen Treibhausgasen ausgewählt. Über die Auswahl eines Prozesses entscheidet auch die Verfügbarkeit der Daten.

Dabei sind die meisten ausgewählten Prozesse durch eine oder mehrere der folgenden Eigenschaften gekennzeichnet: elektrochemische Reaktionen mit hohem Stromverbrauch, stark endotherme Reaktionen mit hohem Verbrauch an Dampf und/oder Brennstoffen, unter hohen Drücken ablaufende Reaktionen und/oder aufwändige Trennoperationen.

Eine der wichtigsten Probleme im Zusammenhang mit der Auswahl der Prozesse ist ihre Abgrenzung. In der chemischen Industrie ist es üblich, dass zwei oder mehrere Prozesse integriert werden, um ein Produkt herzustellen. Beispiele hierzu sind die Herstellung von Ammoniak und Methanol. In beiden Fällen errichtet man integrierte Anlagen, bestehend aus der Synthesegas-Anlage und der Anlage zur Synthese des eigentlichen Produktes. Jedoch kann Synthesegas, mit unterschiedlicher Zusammensetzung an H_2 und CO, auch für andere Zwecke erzeugt werden. Damit ist es im Grunde ein eigenständiger Prozess. Die Entscheidung über die Abgrenzung eines Herstellungsprozesses hängt damit von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise der Relevanz für den Energieverbrauch, der Datenverfügbarkeit usw.

Außerdem kann ein Prozess über mehrere Prozessvarianten verfügen, die regelmäßig unterschiedliche Energieverbräuche aufweisen. Die Gründe dafür sind wie folgt:

- Jede Chemieanlage ist ein Unikat.
- Es können verschiedene Rohstoffe und Energiearten eingesetzt werden.
- Verschiedene Katalysatoren sind möglich.
- Konstruktive Abweichungen sind üblich.
- Während des Lebenslaufs der Anlagen werden Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt.

Diesem Problem kann man entgegenwirken, indem man den Hauptprozess bzw. die Hauptmodifikation als Standardprozess betrachtet bzw. Durchschnittswerte für den Energieverbrauch verwendet.

Unter Zugrundelegung der genannten Kriterien und der Untersuchungsergebnisse von Saygın, Patel und Marscheider-Weidemann (2008) werden folgende Prozesse ausgewählt:

Organische Grundstoffe/ Petrochemikalien und ihre Derivate

1. Adipinsäure
2. Ammoniak
3. Calciumcarbid
4. Ethylen
5. Industrieruß
6. Methanol
7. Salpetersäure
8. Toluylendiisocyanat.

Anorganische Grundstoffe

1. Chlor
2. Sauerstoff
3. Soda
4. Titandioxid.

Polymere

1. Polycarbonate
2. Polyethylen
3. Polypropylen
4. Polysulfone und Polysulfide.

3.1.2.3 Festlegung der Bilanzgrenzen

Die Grenzen des Bilanzraumes spielen bei der Ermittlung des Energieverbrauchs eine entscheidende Rolle. Dabei ist die Grenze des Produktionsprozesses (ISBL) nicht immer einheitlich definiert und hängt vom Prozess sowie von den Festlegungen des Anlagenbauers und des Betreibers ab. Als Beispiel seien hier die Steam-Cracker genannt, wo die Aufbereitung des Einsatzstoffes, die Benzol-Abtrennung, das Kühlwassersystem usw. zum ISBL oder als eigenständige Anlagen gezählt werden können.

Außerdem werden verschiedene Festlegungen für den energetischen und nicht-energetischen Verbrauch gemacht. Die Angaben können eventuell zu falschen Aussagen führen. Weiss, Neelis und Patel weisen auf diese Problematik hin und stellen fest, dass in der deutschen Energiebilanz unterschiedliche Systemgrenzen für den nicht-energetischen Verbrauch verschiedener fossiler Energieträger verwendet werden (Weiss, Neelis, Patel 2006, S. I; Weiss 2009):

- Bei Steam-Crackern auf Naphtha-Basis ist der Einsatzstoff zur Erzeugung von Prozesswärme in dem nicht-energetischen Verbrauch enthalten.
- Dagegen wird das Erdgas zur Erzeugung von Prozesswärme bei der Ammoniak- und Methanol-Herstellung in dem energetischen Verbrauch berücksichtigt.

Die Autoren erklären diese Inkonsistenzen damit, dass diese Informationen durch unterschiedliche Stellen gesammelt und dadurch unterschiedliche Definitionen verwendet werden.

Zusätzlich wird der Energieverbrauch in der Grundstoffchemie dadurch gekennzeichnet, dass in einigen organischen Prozessen aggregierte Zahlen für den energetischen und den nicht-energetischen Verbrauch verwendet werden. Beispiele hierzu sind die Herstellverfahren für Ammoniak, Methanol, Synthesegas und Ethylen in Steam-Crackern. Dadurch sind Energieverbrauchsindikatoren in der organischen Grundstoffindustrie und der Polymerindustrie nicht immer eindeutig. Eine Abschätzung des Energieverbrauchs kann jedoch mit Hilfe von thermodynamischen Überlegungen bzw. der Kohlenstoffbilanz erfolgen.

Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass ein Teil der Kohlenwasserstoffe (Rohstoffe, nicht-energetischer Verbrauch) im Prozess bewusst oxidiert wird, um Wärme zu liefern. Dieser Teil verbleibt nicht im Produkt, sondern liefert die notwendige Energie für die Reaktion bzw. für die Aufwärmung des Stoffstromes. Als Beispiel ist hier die partielle Oxidation für die Synthesegas-Herstellung zu nennen, bei der durch Zufuhr von Sauerstoff ein Teil des Rohstoffs zur Wärmeerzeugung verbrannt wird. Dieser Anteil wird auf ca. 10 % der eingesetzten organischen Rohstoffe geschätzt (Weiss, Neelis, Patel 2006). 49 Produkte wurden bei der IEA identifiziert, bei denen ein aggregierter Indikator verwendet wird (IEA 2007, S. 87). Legt man theoretische Werte zugrunde, ist die Energiebilanz eventuell ungenau. Ein weiterer Teil entweicht als CO_2-Emissionen (siehe auch Weiss 2009, S. 6).

Außerdem müsste die Wärmeintegration über die Prozessgrenze hinweg berücksichtigt werden. Dies ist vor allem in Deutschland der Fall, wo die meisten Anlagen für die Grundstoffchemie an wenigen Standorten konzentriert und die Energiepreise relativ hoch sind. Der Energieaustausch zwischen den Prozessen eines Standortes ist aber oft unbekannt, da er von den Standortbetreibern nicht veröffentlicht wird. Dies erschwert eine genauere Energiebilanz für den Prozess, sodass man auf Schätzungen angewiesen ist.

3.1.2.4 Prozessparameter

In den nächsten drei Kapiteln werden Prozesse aus der organischen Grundstoffchemie, der anorganischen Grundstoffchemie und der Polymerchemie beschrieben. Dabei werden für jeden Prozess folgende Angaben gemacht:

1. Zielprodukt, Nebenprodukte, Rohstoffe,

2. Produktionsmenge des Zielproduktes und der wichtigsten Nebenprodukte für Deutschland im Basisjahr 2007,
3. Auflistung der wichtigsten Prozessvarianten,
4. kurze Beschreibung der dominierenden Prozessvariante mit Auflistung der Hauptprozessschritte, vor allem derjenigen Prozessschritte, die für den Energieverbrauch bzw. für die THG-Emissionen relevant sind,
5. Energieverbrauch, differenziert nach Strom sowie Brennstoff und Dampf,
6. relevante andere THG-Emissionen,
7. eventuell Standorte, Errichtungsjahr und ausgeführte Modernisierungsmaßnahmen, wenn sie bekannt sind.

Für die Produktionsstatistiken der chemischen Grundstoffe sollen die üblichen Quellen herangezogen werden. Neben den Statistiken des Statistischen Bundesamtes veröffentlicht der VCI Produktionszahlen zu den wichtigsten Grundstoffen.

Die Prozesse bzw. ihre Varianten sowie ihre Prozessschritte werden nur soweit beschrieben, wie dies für das Verständnis des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen notwendig ist. Beschreibung der wirklich bestehenden Anlagen und ihren heutigen Zustand wird aus Mangel an Daten nicht angestrebt.

Der Energieverbrauch ist die wichtigste Angabe in diesem Kapitel. Wie oben dargestellt, sind in der Regel verschiedene Prozesse mit unterschiedlichen Prozessmodifikationen im Einsatz. Wenn der prozessspezifische Energieverbrauch nicht bekannt ist, wird ein mittlerer Verbrauch bzw. der Verbrauch des dominierenden Prozesses herangezogen. Der Energieverbrauch wird dabei als Endenergie angegeben. Dieser Ansatz garantiert die Kompatibilität mit den Energiestatistiken.

Es sollen außerdem die CO_2-Emissionen ermittelt werden. Bei Strom müsste man eigentlich die unterschiedlichen Brennstoffe und Kraftwerkmodifikationen berücksichtigen. Dies würde jedoch den Umfang der Untersuchung sprengen. Daher werden durchschnittliche Wirkungsgrade verwendet. Für das Basisjahr 2007 wird für den deutschen Strommix ein Wirkungsgrad von 40,7 %-dies entspricht 8,8 kJ Wärme/ kWh elektrischer Energie (AGEB 2009b) oder 605 g CO_2/kWh Strom – zugrunde gelegt (UBA 2009).

Für die Ermittlung der CO_2-Emissionen der Brennstoffe gelten die Emissionsfaktoren, die durch das UBA mitgeteilt werden (UBA 2005). Für die Erzeugung von Dampf wird ein Wirkungsgrad von 90 % angenommen. Für die Bewertung von Nieder-, Mittel- und Hochdruckdampf gelten die Wärmeinhalte 2,38, 2,57 und 2,79 GJ/t (Chemsystems 1998 zitiert in Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 8). Wenn Daten ver-

fügbar sind, werden auch für den Dampf Druckstufen angegeben. Außerdem werden das Prozess-CO_2 sowie CO_2-Äquivalente für andere THG-Emissionen erfasst.

Verfügbare Daten beziehen sich auf die Vollauslastung der Anlagen (Design-Kapazität, Nominalkapazität, installierte Kapazität). Der spezifische Energieverbrauch (pro Tonne Produkt) ist aber abhängig von der Auslastung der Anlage. Chemieanlagen mit sehr hoher Auslastung (105 – 110 % der Design-Kapazität) bzw. sehr niedriger Auslastung (unter 80 %) weisen meistens einen höheren spezifischen Energieverbrauch auf. Der Verlauf des spezifischen Energieverbrauchs in Abhängigkeit von der Auslastung ist prozessspezifisch. Je weiter man von der Design-Kapazität entfernt ist, desto geringer ist die Energieeffizienz. Erfahrungsgemäß wird das Energieoptimum bei Vollauslastung und in der näheren Umgebung davon erreicht. Allerdings werden Chemieanlagen selten genau bei der Design-Kapazität gefahren.

Erschwerend für die Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs in der Grundstoffchemie wirken folgende Eigenschaften:

- Die Kuppelproduktion ist charakteristisch für die chemische Industrie. Beispiele hierzu sind die Chloralkalielektrolyse und das Steam-Cracking. Im ersten Fall werden Chlor, Natronlauge und Wasserstoff als Kuppelprodukte hergestellt. Im zweiten Falle handelt es sich um eine breite Palette von Produkten, auch wenn Ethylen in der Regel als das Hauptprodukt gilt.
- Ein Produkt bzw. Kuppelprodukte können aus verschiedenen Rohstoffen bzw. mit Hilfe von verschiedenen Prozessen hergestellt werden, wie z. B. bei Ammoniak und Methanol.
- Verschiedene Energieträger und Brennstoffe können bei einem Prozess eingesetzt werden. Beispielsweise werden Reaktoren elektrisch, durch Dampf oder unterschiedliche Brennstoffe beheizt.
- Angaben zu den Anlagen der Grundstoffchemie in Deutschland sind nicht immer verfügbar. Es fehlen vor allem Informationen zu den Modernisierungsmaßnahmen. Diese werden, wenn sie nicht explizit für bestehende Anlagen bekannt sind, pauschal mit Hilfe von Durchschnittswerten wiedergegeben.

3.2 Analyse der Prozesse

3.2.1 Organische Grundstoffe und Petrochemikalien

3.2.1.1 Adipinsäure

Herstellungsprozesse

Adipinsäure wird durch oxydative Spaltung von Cyclohexan in einem zweistufigen Prozess mit Cyclohexanol/ Cyclohexanon als Zwischenprodukt hergestellt. In der ersten Prozessstufe läuft die stark exotherme Reaktion der oxydativen Spaltung von Cyclohexan in Flüssigphase bei 125 – 165 °C und 8 – 15 bar ab (ΔH = -294 kJ/mol). Das Zwischenprodukt wird dann mit hochkonzentrierter Salpetersäure zu Adipinsäure bei einer Temperatur von 150 °C und einem Druck von 10 bar katalytisch umgesetzt (Arpe 2006, S. 264). Dabei wird ein Mol N_2O pro Mol Adipinsäure gebildet. Die Stickoxide werden dann aus dem Gemisch mit Luft gestrippt. Dadurch entsteht ein stickoxidhaltiger Abgasstrom. Die drei Hersteller in Deutschland, BASF, Lanxess und Radici Chimica, haben jeweils ihre eigenen Prozessrouten entwickelt.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Die Bedeutung der Herstellung von Adipinsäure für diese Untersuchung liegt in den Emissionen an N_2O. Hinsichtlich der Gesamt-THG-Emissionen steht Adipinsäure nach CEFIC-Angaben an vierter Stelle in Europa. Trotz der relativ geringen Produktionsmenge hatten die Anlagen für Adipinsäure im Jahre 2005 einen Ausstoß von 13 Mt CO_2-eq./a (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 4).

Dabei hängt die Höhe der spezifischen Emissionen von mehreren Faktoren ab, wie z. B. von der Katalysatorart, dem Alter des Katalysators und den Betriebsbedingungen. Ohne Maßnahmen zur Verringerung des N_2O-Stromes fallen im Durchschnitt ca. 300 kg N_2O pro Tonne Adipinsäure an (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 43).

Zur Reduktion der N_2O-Emissionen im Abgasstrom können verschiedene Verfahren eingesetzt werden, die in zwei Verfahrensgruppen zusammengefasst werden können. Die erste Verfahrensgruppe hat zum Ziel, das N_2O in seine Bestandteile zu zerlegen:

1) Katalytische Zersetzung: Dafür wurden selektive katalytische Reduktionsverfahren entwickelt, die bei einer Temperatur zwischen 400 und 600 °C arbeiten und 90 bis 95 % des N_2O zersetzen. Die Reaktion ist exotherm, sodass Dampf gewonnen werden kann. Der Katalysator muss allerdings zwei Mal jährlich ausgetauscht werden (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 45; IPTS 2003, S. 43; UBA 2001a, S. 34).

2) Thermische Zersetzung: Thermische Verfahren arbeiten bei Temperaturen um 1.000 °C in Gegenwart von Methan und zersetzen 98 – 99 % des N_2O. Durch die stark exotherme Reaktion entstehen große Mengen überschüssiger Wärme, die für Dampferzeugung genutzt werden. Jedoch werden nach Angaben von Herstellern nur 60 % der Betriebskosten abgedeckt. Effizientere Abgasreinigungssysteme könnten die gesamten Betriebskosten abdecken (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 44).

Die zweite Verfahrensgruppe strebt die Herstellung von Produkten aus dem N_2O an. Dadurch wird der Abgasstrom nützlich verwendet:

1) Verbrennung bei höheren Temperaturen in Gegenwart von Wasserdampf, um Salpetersäure zu erzeugen: Dabei handelt es sich um ein partielles Recycling des N_2O, das unter bestimmten Bedingungen eine kostengünstige Option darstellt. Dieses Verfahren findet keine Anwendung in Deutschland.
2) Verwendung des N_2O zur selektiven Oxidation von Benzol zu Phenol: Dieses Verfahren wurde zwar vorgeschlagen, aber nie großtechnisch umgesetzt.
3) Herstellung von Cyclododecanon: Die Anlage für die Herstellung von Cyclododecanon wird vor der Abgasreinigung geschaltet. Dieses Verfahren wurde bereits in Deutschland implementiert (siehe hierzu Kapitel 3.3.2.1).

Die tatsächlichen N_2O-Emissionen hängen nicht nur von der Effizienz der Abgasreinigungsanlagen ab, sondern wesentlich von den An- und Abfahrvorgängen, die sich durch die regelmäßigen Revisionen der Anlagen bzw. durch ungeplante Stilllegungen ergeben. Zudem steht in der Regel keine redundante Abgasreinigungsanlage zur Verfügung, falls wegen Instandhaltungsmaßnahmen oder technischen Problemen die eigentliche Abgasreinigungsanlage abgeschaltet werden muss. Dadurch unterliegen die N_2O-Emissionen von Jahr zu Jahr starken Schwankungen (vgl. auch Entec 2008, S. 40).

Seit 1994 wird in Deutschland das N_2O-reiche Abgas behandelt, sodass die tatsächlichen Emissionen wesentlich geringer sind als die oben genannten theoretisch möglichen Emissionen (siehe UBA 2010, S. 274 und Kapitel 3.3.2.1). Für das Jahr 2007 hat das UNFCCC die N_2O-Emissionen aus der Adipinsäure-Herstellung in Deutschland mit 5.623,500 kt CO_2-eq. angegeben (vgl. www.unfccc.int/di/FlexibleQueries/Event.do?event=go, abgelesen am 17.9.2010). Dies entspricht 18,140 kt N_2O/a. Sie stammen überwiegend aus An- und Abfahrvorgängen sowie aus Abschaltzeiten der Abgasbehandlungsanlage wegen Störung. Eine weitere Reduktion der N_2O-Emissionen erfordert also den Bau von redundanten Abgasbehandlungsanlagen. Diese sind inzwischen geplant (JISC 2008a; JISC 2008b).

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-4 zusammengefasst. Im Anhang 3.9, Tabelle 3-59 werden die Standorte und die Kapazitäten in Deutschland mitgeteilt.[21]

Tabelle 3-4: Wichtigste Parameter der Adipinsäure-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Adipinsäure $C_6H_{10}O_4$ (WZ-Nummer, 2414 33 850) Nebenprodukte: N_2O
Produktionsmenge 2007	543,665 kt[22]
Prozesse	Oxydative Spaltung von Cyclohexan
Energieverbrauch, absolut	Strom = 0,783 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 14,630 PJ/a, TFEU[1] = 15,413 PJ/a, TPEU[2] = 16,540 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 1,44 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 26,91 GJ/t, TFEU = 28,35 GJ/t, TPEU = 30,45 GJ/t (Neelis et al. 2005)
Andere THG-Emissionen 2007	5.623,500 kt CO_2-eq./a oder 18,140 kt N_2O/a, entspricht 14,9 t CO_2-eq./t Produkt (www.unfccc.int/di/FlexibleQueries/Event.do?event=go) [3] Unterliegt ab 2013 dem Emissionshandel
Anzahl der Produzenten	3
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-59

[1] TFEU = Total Final Energy Use, [2] TPEU = Total Primary Energy Use
[3] Vergleiche auch (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 46)

3.2.1.2 Ammoniak

Herstellungsprozesse

Die Herstellung von Ammoniak besteht traditionell aus zwei integrierten Prozessstufen: dem Synthesegas-Prozess und der Ammoniak-Synthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren. In dieser Untersuchung werden nur integrierte Prozesse betrachtet. Zwei Verfahren werden dabei für die Herstellung des Synthesegases eingesetzt: das Steam-Reforming und die partielle Oxidation.

Das Steam-Reforming ist ein allothermer katalytischer Prozess. Wärme muss von außen, z. B. durch Verbrennung von Erdgas, zugeführt werden. Es werden Einsatzstoffe bis 200 °C Siedetemperatur verwendet. Meistens wird Erdgas als Rohstoff (überwiegend Methan) eingesetzt. In Deutschland liegt der Einsatz an Erdgas bei der Ammoni-

21 Weiteres zur Herstellung von Adipinsäure siehe z. B. (Arpe 2006, S. 264; Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 42ff; IPTS 2003, S. 43ff).

22 Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 46.

ak-Herstellung bei 67 %. Die Hauptprozessstufen sind: Entschweflung, Primärreformer im katalytischen Röhrenspaltofen, Sekundärreformer im katalytischen Schachtofen, CO-Konverter (zwei katalytische Stufen: Hoch- und Niedertemperaturkonverter), CO_2-Abscheidung und Feingasreinigung. Dabei unterscheidet man drei verschiedene Modifikationen (UBA 2001a, S. 13; IPTS 2007b, S. 58ff):

- Das weiterentwickelte konventionelle Steam-Reforming (Advanced Conventional Process: ACP): Der Primärreformer wird von außen beheizt. Die Rohstoffe werden in dieser Prozessstufe zum größten Teil umgesetzt. Der Sekundärreformer wird mit einem stöchiometrischen H/N-Verhältnis gefahren. Die neueren Modifikationen dieser Prozessvariante weisen eine bessere Energieeffizienz als die ursprüngliche Prozessvariante auf.
- Das reduzierte Primärreforming (Reduced Primary Reforming: RPR): Es herrschen mildere Betriebsbedingungen im beheizten Primärreformer. Dadurch wird mit einem geringeren Umsatz gefahren. Im Sekundärreformer wird mit überschüssiger Luft und einem höheren Umsatz gearbeitet (unterstöchiometrisches H/N – Verhältnis).
- Das autotherme Reforming (Heat Exchange Autothermal Reforming: HPR): Das Prozessgas aus dem Sekundärreformer wird als Wärmelieferant für den Primärreformer eingesetzt. Dadurch herrschen in ihm autotherme Betriebsbedingungen. Der Sekundärreformer wird mit Luftüberschuss gefahren (unterstöchiometrisches H/N–Verhältnis oder stöchiometrisches H/N-Verhältnis).

Für die genannten Prozessvarianten werden zahlreiche Modifikationen von den Anlagenbauunternehmen angeboten.

Bei der partiellen Oxidation handelt sich um einen autothermen nicht-katalytischen Prozess. Der Wärmebedarf wird durch eine partielle Verbrennung des Einsatzstoffes gedeckt, wobei eine unterstöchiometrische Menge an Sauerstoff zugeführt wird. Es können theoretisch alle Kohlenwasserstoffe eingesetzt werden. In der Praxis werden schweres Heizöl und Destillationsrückstand verwendet. In der Regel wird mit Sauerstoff angereicherte Luft dem Vergasungsreaktor zugeführt, um das Zielgemisch für die Ammoniak-Synthese zu erreichen. Dadurch ist ein zusätzlicher Strombedarf für die Luftzerlegung notwendig. Der flüssige Stickstoff wird für die Reinigung des Synthesegases verwendet.

Die Ammoniak-Synthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren ist die zweite Hauptprozessstufe und verläuft katalytisch in einem Druckreaktor bei einer Temperatur zwischen 380 und 520 °C. Der wirtschaftlich optimale Druckbereich liegt zwischen 90 und 230 bar (Winnacker-Küchler 2005, S. 218). Die Reaktion ist exotherm. Dadurch kann Dampf in größeren Mengen erzeugt werden. Die Kompression des Gases erfolgt heute mit Hilfe von dampfgetriebenen Turboverdichtern. Nicht-umgesetzte Einsatzstoffe werden im Kreislauf in den Reaktor zurückgefahren. Das Ausscheiden des gebildeten Ammoniaks aus dem Kreislaufgas erfolgt durch Kondensation bei tieferen Temperatu-

ren. Als Kältemittel verwendet man verdampfendes Ammoniak. Für die Kälteerzeugung werden ebenfalls dampfgetriebene Turboverdichter verwendet.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Es laufen bei beiden Prozessen zur Erzeugung von Synthesegas exotherme und endotherme Reaktionen ab. Jedoch ist die Nettoreaktion stark endotherm (ΔH = -91,6 kJ/mol). Hohe Reaktionstemperaturen werden dabei benötigt, um wirtschaftlich akzeptable Reaktionsgeschwindigkeiten zu erhalten.

Beim Steam-Reforming wird die überschüssige Wärme aus dem Primärreformer, dem Sekundärreformer, dem CO-Konverter und der Ammoniaksynthese zur Erzeugung von Hochdruckdampf mit einem Druck von über 100 bar verwendet. Mit diesem werden Turboverdichter zur Verdichtung des Synthesegases, der Luft für den Sekundärreformer und des Kältemittels angetrieben. Mitteldruckdampf wird dann aus den Turbinen abgezogen, um den Wärmebedarf in der Anlage zu decken. Bei modernen Ammoniak-Anlagen ist es daher nicht notwendig, größere Mengen an Energie in Form von Dampf oder Strom von außen zu beziehen, sondern überschüssiger Dampf wird an andere Anlagen am Standort geliefert (IPTS 2007b, S. 43).

Bei der partiellen Oxidation herrscht wegen des Fehlens heißer Abgase aus dem Vergasungsreaktor ein geringerer Grad der Energieintegration als beim Steam-Reforming. Wenn alle Kompressoren mit Dampf angetrieben werden, muss Dampf von außen bezogen werden. Daher werden Hilfsdampfkessel und Pre-Heater eingesetzt. Die Kompressoren für die Zerlegung der Luft werden elektrisch oder mit Dampf angetrieben.

In Tabelle 3-5 wird der Rohstoff- und Energieverbrauch für neue und bestehende Anlagen angegeben.

Tabelle 3-5: Rohstoff- und Energieverbrauch bei der Ammoniak-Herstellung

Prozess	**Rohstoff (GJ/t NH_3)**	**Brennstoff (GJ/t NH_3)**	**Summe (GJ/t NH_3)**
Steam-Reforming, bestehende Anlagen	22 – 25 (Durchschnitt = 23,5)	4 – 9 (Durchschnitt = 6,5)	26 – 34 (Durchschnitt = 30)
Steam-Reforming, neue Anlagen			29,3
Partielle Oxidation, bestehende Anlagen	29 – 34 (Durchschnitt = 31,5)	6 – 20 (Durchschnitt = 13)	35 – 54 (Durchschnitt = 44,5)
Partielle Oxidation, neue Anlagen			36

Quelle: UBA 2001a, S. 13

Aus der Darstellung erkennt man, dass neuere Anlagen bedeutend weniger Rohstoff und Energie benötigen. Dies hängt mit der regelmäßigen Weiterentwicklung der Prozesse zusammen (hierzu siehe Kapitel 3.3.2.2).

Wie oben besprochen, hängt der Rohstoff- bzw. Energieverbrauch stark von der Prozessvariante des Steam-Reformings ab (vgl. Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Energetischer und nicht-energetischer Verbrauch bei der Ammoniak-Herstellung

Verbrauch	**Steam-Reforming (GJ/t NH_3)**	**Partielle Oxidation (POC) (GJ/t NH_3)**
Nicht-energetischer Verbrauch (Rohstoff)	ACP = 24,5 RPR = 26,0 HPR = 27,5	32,0
Energetischer Verbrauch (Brennstoff)	ACP = 8 – 10 RPR = 6 – 8 HPR = 4 – 8	6 – 10
Energetischer und nicht-energetischer Verbrauch	32 – 35	41 (39 – 42)

Quelle: UBA 2001a, S. 14

Weitere Angaben zum Ressourcen- bzw. Energieverbrauch findet man in den Broschüren von Technologielieferanten (siehe z. B. Uhde 2009a).

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-7 zusammengefasst. Im Anhang dieses Kapitels werden in Tabelle 3-60 die Standorte und die Kapazitäten in Deutschland mitgeteilt.

In beiden Prozessen zur Herstellung von Synthesegas fallen erhebliche Mengen an CO_2 an, die vom Rohstoff abhängig sind. Bei dem Steam-Reforming beträgt das Prozess-CO_2 1,15 – 1,40 t CO_2/t NH_3 und bei der partiellen Oxidation 2 – 2,6 t CO_2/t NH_3 (IPTS 2007b, S. 38). Das durch die Ammoniak-Herstellung entstehende Prozess-CO_2 wird für 2007 auf 7.721 kt angegeben[23]. Im Falle der Weiterverarbeitung des Ammoniaks zu Harnstoff wird das Prozess-CO_2 zum größten Teil verbraucht. Dabei werden je nach Prozess unterschiedliche Mengen an CO_2 benötigt. Beispielsweise werden ca. 1,3 t CO_2/t NH_3 beim Stamicarbon-Prozess verbraucht (Uhde 2007). Außerdem werden kleinere Mengen des Prozess-CO_2 gereinigt und in der Getränkeindustrie, als Trockeneis, als technisches Gas usw. eingesetzt. Hierzu sind keine genauen Daten verfügbar.

23 UBA (2011), S. 558.

Tabelle 3-7: Wichtigste Parameter der Ammoniak-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Ammoniak NH_3 (WZ-Nummer, 2415 10 750) Nebenprodukt: Kohlendioxid
Produktionsmenge 2007	2.746,177 kt N (Statistisches Bundesamt 2008), entspricht 3.334,643 kt NH_3
Prozesse	Integrierter Prozess: Synthesegasherstellung + Haber-Bosch-Verfahren Prozesse der Synthesegas-Herstellung: Steam-Reforming und partielle Oxidation Rohstoffe: · Erdgas, Steam-Reforming: 67 % (2.234,211 kt/a), · Erdölbasierte Kohlenwasserstoffe, partielle Oxidation: 33 % (1.100,432 kt/a)
Energieverbrauch 1, absolut (Steam-Reforming, Erdgas)	Strom = 1,072 PJ/a, Brennstoff und Dampf = 19,438 PJ/a, TFEU = 20,510 PJ/a, TPEU = 21,873 PJ/a
Energieverbrauch 1, spezifisch (Steam-Reforming, Erdgas)	Strom = 0,48 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 8,70 GJ/t, TFEU = 9,18 GJ/t, TPEU = 9,79 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 104)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs, Steam-Reforming	Primärreformer: 800 °C Sekundärreformer: 1.200 °C
Energieverbrauch 2, absolut (partielle Oxidation, erdölbasierte Kohlenwasserstoffe)	Strom = 0,528 PJ/a, Brennstoff und Dampf = 18,157 PJ/a, TFEU = 18,652 PJ/a, TPEU = 19,566 PJ/a
Energieverbrauch 2, spezifisch (partielle Oxidation, erdölbasierte Kohlenwasserstoffe)	Strom = 0,48 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 16,50 GJ/t, TFEU = 16,95 GJ/t, TPEU = 17,780 GJ/t (Neelis et al. 2005; UBA 2001a, S. 13)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs, partielle Oxidation	Vergasungsreaktor: 1.200 – 1.500 °C
Anzahl der Produzenten	5
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-60
Spezifisches Prozess- CO_2	Steam-Reforming: 1,15 – 1,40 t CO_2/t NH_3 . Partiellen Oxidation: 2 – 2,6 t CO_2/t NH_3 (IPTS 2007b, S. 38)

Unter Berücksichtigung dieses Verbrauchs und nach Abzug des bei der Harnstoffsynthese umgesetzten CO_2 verbleibt ein relativ kleiner CO_2-Überschuss, der im Vergleich zu anderen Quellen für CO_2-Emissionen, wie Stromerzeugung und die Bereitstellung von Wärme- oder Dampf, eine begrenzte Bedeutung hat. Wegen des unterschiedlichen Bedarfs für die Harnstoff-Anlagen und der ungenauen Werte der anderen CO_2-Verbräuche ist nur eine sehr grobe Schätzung möglich. McKinsey schätzt diesen Überschuss auf 3,1 Millionen t (McKinsey 2006, S. 44). Eigene Schätzungen für 2007 liegen ebenfalls in dieser Größenordnung.[24]

24 Weiteres zur Ammoniak-Herstellung siehe (Althaus et. al. 2004, S. 98; Appl 1999; Büchel, Moretto, Wodisch 1999; Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 30; EFMA 2000a; IPTS 2007b, S. 35; Ullmann2009; Winnacker-Küchler 2005).

3.2.1.3 Calciumcarbid

Herstellungsprozesse

Calciumcarbid wird durch Umsetzung von hochreinem Calciumoxid mit Koks im elektrischen Ofen (Lichtbogen-Reduktionsofen) bei 1.800 – 2.300 °C gewonnen. Die Reaktion ist stark endotherm (ΔH = + 465 kJ/mol). Moderne Anlagen sind abgeschlossen, sodass das CO zurückgewonnen werden kann (Arpe 2006, S. 100).

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der Stromverbrauch ist bei diesem Verfahren sehr hoch (10,08 – 11,16 GJ/t) (Büchel, Moretto, Wodisch 1999, S. 249) und damit entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Produktion. Von der eingesetzten elektrischen Energie werden 49 % für die Carbidbildung genutzt, 25 % gehen mit dem Carbid-Strom und 3 % mit dem Reaktionsgas als fühlbare Wärme verloren. Der Rest sind andere Wärmeverluste (Winnacker-Küchler 2005, S. 782). Außerdem wird Energie in Form von Brennstoff für das Brennen des Kalks benötigt, das bei 800 – 900 °C stattfindet. Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-8 zusammengefasst.[25]

Tabelle 3-8: Wichtigste Parameter der Calciumcarbid-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Calciumcarbid, CaC_2 (WZ-Nummer, 2413 54 500)
Prozesse	Lichtbogenofen Einsatzstoffe: Kohle und Kalk
Produktionsmenge 2007	189,629 kt/a (Statistisches Bundesamt 2008)
Energieverbrauch, absolut	Strom = 1,578 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 1,161 PJ/a, TFEU = 2,739 PJ/a, TPEU = 5,038 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 8,32 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 6,12 GJ/t, TFEU = 14,44 GJ/t, TPEU = 26,562 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 97)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs	Brennen des Kalks: 800 – 900 °C

25 Weiteres zur Calciumcarbid-Herstellung siehe z. B. (Althaus et al. 2004, S. 174; Arpe 2006, S. 100; Büchel, Moretto, Wodisch 1999, S. 248; IPTS 2007b, S. 336; Ullmann 2009; Winnacker-Küchler 2005, S. 769).

3.2.1.4 Ethylen

Herstellungsprozesse

Das Steam-Cracking ist der einzige großtechnische Prozess, der zurzeit für die Herstellung des gesamten Sortiments kurzkettiger Olefine zur Verfügung steht. Weltweit werden 98 % des Ethylens und 70 % des Propylens in Steam-Crackern hergestellt. Das restliche Propylen wird hauptsächlich durch katalytisches Cracken von höher siedenden Fraktionen in Raffinerien erzeugt. Kurzkettige Olefine werden auch in kleineren Mengen aus dem Raffineriegas abgetrennt. Auch Butadien erhält man fast ausschließlich in Steam-Crackern. Die Aromaten werden zum größten Teil in Steam-Crackern produziert (bei Benzol ca. 70 %). Den Rest gewinnt man durch das Reforming in Erdölraffinerien.

Dabei werden folgende Rohstoffe verwendet: gasförmige Kohlenwasserstoffe (Ethan, Propan und Flüssiggas (LPG)), Naphtha und Gasöl. In Deutschland dominiert das Naphtha. Steam-Cracking weist verschiedene Modifikationen auf, hauptsächlich bedingt durch den Einsatzstoff und die Trennung der entstehenden Produkte. Dabei bestehen Steam-Cracker aus drei Hauptprozessabschnitten: dem Pyrolyseofen, dem Kompressionsteil und der Trennung der Produkte. Die Crack-Reaktionen sind stark endotherm – mit einem Gesamtenergiebedarf von 15 bis 50 GJ/t Ethylen – und werden bei Temperaturen von über 800 °C durchgeführt. Der Rohstoff wird vorher mit überhitztem Dampf gemischt. Die Öfen werden unabhängig vom Rohstoff mit Erdgas oder in noch größerem Umfang mit Rückstandsgas (einer Mischung aus Methan und Wasserstoff aus dem Prozess) beheizt. Das Produktgas aus dem Pyrolyseofen wird gequencht. Dabei wird Hochdruckdampf erzeugt. Für die Kompression werden überwiegend dampfgetriebene Turboverdichter verwendet. Im Gegensatz dazu findet im Rahmen der anschließenden Rückgewinnung und Reinigung der Olefine eine Tieftemperaturabscheidung bei Temperaturen von bis zu -150 °C und Drücken von 35 bar statt. Diese beiden Tatsachen erklären den hohen Bedarf an Energie.

Die Produktzusammensetzung kann durch die Einstellung von drei Parametern beeinflusst werden: Spalttemperatur, Verweilzeit und Partialdrücke der Kohlenwasserstoffe. Moderne Anlagen sind hinsichtlich des Einsatzstoffes relativ flexibel. Sie können je nach Design mehrere Einsatzstoffe bzw. einen Einsatzstoff unterschiedlicher Zusammensetzung bearbeiten. Die Flexibilität geht allerdings auf Kosten der Energieeffizienz.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der Bezug des Energieverbrauchs auf das Ethylen ist insofern problematisch, als der Ethylenanteil im Produkt von einem Rohstoff zum anderen stark variiert. Dadurch entsteht der Eindruck, dass höher siedende Einsatzstoffe einen höheren Energiever-

brauch aufweisen. Dies stimmt aber nur bis zu einem gewissen Maße. Als Beispiel liegt der Ethylen-Anteil im Produkt beim Rohstoff Ethan bei über 60 % und beim Naphtha nur bei 30 – 35 %. Daher werden in einigen Quellen differenzierte Angaben nach Rohstoffen gemacht (siehe z. B. IPTS 2003, S. 171). Andere Quellen beziehen den Energieverbrauch auf die höherwertigen Produkte (High Value Chemicals) (siehe z. B. Worrell et al. 2007, S. 40).

Bei bestehenden Anlagen hängt der Energieverbrauch von folgenden Faktoren ab: Zusammensetzung des Rohstoffes, Alter der Anlage, konstruktive Einzelheiten, mögliche Modernisierungen, Wärmeintegrationsgrad der Anlage und am Standort, gewünschte Reinheit des Ethylens und der Nebenprodukte usw. CEFIC gibt aus Benchmarkingstudien folgende Energieverbräuche für europäische Steam-Cracker an: auf Ethan-Basis 15 – 18 GJ/ t Ethylen, auf Naphtha-Basis 25 – 40 GJ/ t Ethylen und auf Gasöl-Basis 40 – 50 GJ/ t Ethylen. Wird der Energieverbrauch dagegen auf die höherwertigen Chemieprodukte (HVC) bezogen, liegen die Verbrauchswerte mit 12,5 – 21, 14 – 22 und 18 – 23 GJ/ t HVC nicht weit auseinander (nach Enviros Consulting 2006, S. 20). Neue Anlagen weisen noch bessere Werte auf. Für Naphtha werden durch Chemieanlagenbauunternehmen Verbrauchswerte zwischen 18,00 und 25,5 GJ/ t Ethylen genannt (Ren, Patel, Blok 2006). Dabei verbraucht der Pyrolyseabschnitt ca. 65 % der Energie. Der restliche Energieverbrauch findet in den anderen beiden Abschnitten statt (Ren, Patel, Blok 2006).

Die wichtigsten Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-9 zusammengefasst. Im Anhang dieses Kapitels werden in Tabelle 3-61 die Standorte und die Kapazitäten für Deutschland mitgeteilt.[26]

Tabelle 3-9: Wichtigste Parameter der Ethylen-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Ethylen (WZ-Nummer, 2414 11 300) Nebenprodukte: Propylen, C4-Schnittte, Aromaten usw.
Produktionsmenge 2007	Ethylen: 5.097,471 kt, Propylen: 3.491,991 kt (Statistisches Bundesamt 2008),
Prozesse	Steam-Cracking, 3 Modifikationen, hauptsächlich nach dem Einsatzstoff und den Trennstufen Einsatzstoffe: (16 Mio. t/a Kohlenwasserstoffe) · Gasförmige Kohlenwasserstoffe: 8 % (1.280 kt/a) · Naphtha: 76 % (12.160 kt/a), · Schwere Erdölfraktionen: 16 % (2.350 kt/a)

26 Weiteres zur Herstellung von Ethylen siehe z. B. (Arpe 2006, S. 63; Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 21; Worrell et al. 2007, S. 40; Kirk-Othmer 2004; Ullmann 2009).

Parameter	Wert/Beschreibung
Energieverbrauch 1, absolut (Naphtha)	Strom = 0,000 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 135,720 PJ/a, TFEU = 135,720 PJ/a, TPEU = 135,720 PJ/a
Energieverbrauch 1, spezifisch, aufs Ethylen bezogen (Naphtha)	Strom = 0,00 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 35,50 GJ/t, TFEU = 35,50 GJ/t, TPEU = 35,50 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Energieverbrauch 2, absolut, aufs Ethylen bezogen (gasförmige Kohlenwasserstoffe)	Strom = 0,000 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 7,136 PJ/a, TFEU = 7,136 PJ/a, TPEU = 7,136 PJ/a
Energieverbrauch 2, spezifisch, aufs Ethylen bezogen (gasförmige Kohlenwasserstoffe)	Strom = 0,000 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 17,50 GJ/t, TFEU = 17,50 GJ/t, TPEU = 17,50 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Energieverbrauch 3, absolut, aufs Ethylen bezogen (Gasöl)	Strom = 0,000 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 38,333 PJ/a, TFEU = 38,333 PJ/a, TPEU = 38,333 PJ/a
Energieverbrauch 3, spezifisch, aufs Ethylen bezogen (Gasöl)	Strom = 0,00 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 47,00 GJ/t, TFEU = 47,00 GJ/t, TPEU = 47,00 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs für alle Prozesse	Pyrolyseofen: 800 – 1.050 °C
Anzahl der Produzenten	8
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-61

3.2.1.5 Industrieruß

Herstellungsprozesse

Industrieruß wird hauptsächlich in der Gummiindustrie und für die Herstellung von Farben und Pigmenten verwendet. Das Hauptverwendungsgebiet ist dabei die Reifenherstellung. Für jede Verwendung wird eine andere Art von Industrieruß eingesetzt, die mit einem anderen Verfahren hergestellt wird.

Industrieruß wird durch Pyrolyse von gasförmigen bzw. flüssigen Rohstoffen aus der Erdgas-, Erdöl- oder Kohleindustrie, vor allem von aromatischen Verbindungen mit einem hohen C/H_2-Verhältnis, hergestellt. Dabei unterscheidet man zwei Verfahrensgruppen. Bei der partiellen Oxidation wird gezielt Luft zugeführt. Dadurch wird ein Teil des Einsatzstoffes oxidiert, um die notwendige Wärme für die Reaktion bei Temperaturen zwischen 1.200 und 1.900 °C bereitzustellen. Danach wird das Produkt gequencht und anschließend getrocknet. Bei der zweiten Verfahrensgruppe wird Wärme von außen zugeführt. Heute dominiert weltweit wegen seiner hohen Flexibilität das Furnaceruß-Verfahren aus der ersten Verfahrensgruppe mit einem Anteil von 95 %. Als Rohstoffe werden bei diesem Prozess hauptsächlich hocharomatische, viskose Rückstände aus Erdölraffinerien, Kokereien, katalytischen Crackanlagen und Steam-Crackern eingesetzt (Büchel, Moretto, Wodisch 1999, S. 541). In Deutschland wird außerdem zur Herstellung von Farbenruß das Gasruß-Verfahren eingesetzt.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Die Herstellung von Industrieruß gilt als sehr energieintensiv. Der Stromverbrauch liegt bei 1,55 – 2 GJ/t und der Brennstoffverbrauch bei 57,35 – 66,6 GJ/t (IPTS 2007c, S. 223). Die meisten Anlagen in Europa verfügen über KWK. Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-10 zusammengefasst.[27]

Tabelle 3-10: Wichtigste Parameter der Herstellung von Industrieruß in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Industrieruß (WZ-Nummer, 2413 11 300)
Produktionsmenge 2007	664,642 kt (Statistisches Bundesamt 2008)
Prozesse	Prozesse: partielle Oxidation und thermische Zersetzung Einsatzstoff: · Erdölbasierte Kohlenwasserstoffe: 89 % · Erdgas: 11 % (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 93)
Energieverbrauch, absolut	Strom = 1,183 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 43,035 PJ/a, TFEU = 44.219 PJ/a, TPEU = 45,942 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 1,78 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 64,75 GJ/t, TFEU = 66,53 GJ/t, TPEU = 69,12 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs	Pyrolyseofen: 1.200 – 1.800 °C
Anzahl der Produzenten	3

3.2.1.6 Methanol

Herstellungsprozesse

Analog zur Ammoniak-Herstellung wird Methanol in integrierten Anlagen, bestehend aus dem Synthesegas-Prozess und der Methanol-Synthese, hergestellt. Man benötigt dabei eine andere Zusammensetzung des Synthesegases als beim Ammoniak, jedoch sind die Prozesse für die Synthesegas-Herstellung einander ähnlich (siehe Kapitel 3.2.1.2). Bei der Methanol-Synthese unterscheidet man je nach Druck Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruck-Verfahren (250 – 350 bar, 100 – 250 bar bzw. 50 – 100 bar). Heute werden überwiegend die Niederdruck-Synthese mit Kupferoxid-Zinkoxid-Katalysatoren und die Mitteldruck-Synthese mit Kupferoxid-Zinkoxid-Chromoxid-

27 Weiteres zur Herstellung von Industrieruß siehe z. B. (Büchel, Moretto, Wodisch 1999, S. 539; Winnacker-Küchler 2005, S. 941; Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 74; IPTS 2007c, S. 203).

Katalysatoren eingesetzt. Die Reaktortemperaturen liegen zwischen 220 und 230 °C. Das erzeugte Methanol wird anschließend je nach Verwendung vom Wasser und anderen Verunreinigungen durch Rektifikation abgetrennt (vgl. Arpe 2006, S. 33).

In Deutschland werden mit 73 % (1.400 kt/a) erdölbasierte Kohlenwasserstoffe als Rohstoff verwendet, gefolgt von Erdgas mit 22 % und Klärschlamm und anderen Abfällen mit 5 %. Wenn Methanol aus Destillationsrückstand bzw. schwerem Heizöl hergestellt wird, stehen die Anlagen meistens an Raffineriestandorten. Das Methanol wird dann oft gleich zu MTBE weiterverarbeitet, das als Oktanzahlverbesserer dem Benzin beigemischt wird.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der Energieverbrauch für die Synthesegas-Herstellung wurde in Kapitel 3.2.1.2 im Zusammenhang mit der Ammoniak-Herstellung besprochen. Die Synthese von Methanol aus CO und H_2 ist eine exotherme Reaktion (ΔH = -90,77 kJ/mol). Analog zur Herstellung von Ammoniak wird der Wärmeüberschuss zur Erzeugung von Dampf verwendet (Arpe 2006, S. 33). Die Rektifikation des Rohmethanols gilt als ein energieintensiver Prozess. Der Energieverbrauch wird durch die Reinheit des Methanol-Produktes bestimmt.

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-11 zusammengefasst. Im Anhang dieses Kapitels werden in Tabelle 3-62 die Standorte und Kapazitäten von Methanol-Anlagen im Jahre 2007 dargestellt.[28]

Tabelle 3-11: Wichtigste Parameter der Methanol-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Methanol CH_3OH (WZ-Nummer, 2414 22 100)
Produktionsmenge 2007	2.024,928 kt (Statistisches Bundesamt 2008)
Prozesse	Integrierter Prozess: Synthesegas-Prozess und Methanol-Synthese 3 Synthesegas-Prozesse, 2 Methanol-Synthesen Einsatzstoffe: · Erdölbasierte Kohlenwasserstoffe: 73 % (1.478.197 t/a), · Erdgas: 22 % (445,484 kt/a), · Klärschlamm: 5 % (101,246 kt/a)
Energieverbrauch 1, absolut (Erdgas, Steam-Reforming)	Strom = 0,000 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 3,096 PJ/a, TFEU = 3,096 PJ/a, TPEU = 3,096 PJ/a

28 Weiteres zur Herstellung von Methanol siehe z. B. (Arpe 2006, S. 31; Gmehling, Onken 2005, Ullmann 2009).

Parameter	Wert/Beschreibung
Energieverbrauch 1, spezifisch (Erdgas, Steam-Reforming)	Strom = 0,00 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 6,95 GJ/t, TFEU = 6,95 GJ/t, TPEU = 6,95 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Temperaturniveau, Wärmebedarf, Steam-Reforming	Primärreformer: 800 ° C Sekundärreformer: 1.200 °C
Energieverbrauch 2, absolut (Destillationsrückstand, partielle Oxidation)	Strom = 0,961 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 25,455 PJ/a, TFEU = 26,416 PJ/a, TPEU = 27,806 PJ/a
Energieverbrauch 2, spezifisch (Destillationsrückstand, partielle Oxidation)	Strom = 0,65 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 17,22 GJ/t, TFEU = 17,87 GJ/t, TPEU = 18,82 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Temperaturniveau, Wärmebedarf, partielle Oxidation	Vergasungsreaktor: 1.200 -1.500 °C
Energieverbrauch 3, absolut (Klärschlamm, Vergasung)	Strom = 0,022 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 1,890 PJ/a, TFEU = 1,912 PJ/a, TPEU = 1,944 PJ/a
Energieverbrauch 3, spezifisch (Klärschlamm, Vergasung)	Strom = 0,22 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 18,67 GJ/t, TFEU = 18,97 GJ/t, TPEU = 19,21 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs, Vergasung	Vergasungsreaktor: 1.200 – 1.500 °C
Anzahl der Produzenten	5
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-62

3.2.1.7 Salpetersäure

Herstellungsprozesse

Salpetersäure wird aus Ammoniak nach dem Ostwald-Verfahren hergestellt, das aus drei Prozessstufen besteht: Oxidation des Ammoniaks, Oxidation des Stickmonoxids und Absorption des Stickoxids. Dabei werden je nach Druck in den Prozessstufen der Oxidation und Absorption Monodruck- und Polydruckanlagen unterschieden. Zur ersten Gruppe gehören N/N-, M/M- und H/H-Verfahren, während die zweite Gruppe folgende Kombinationen aufweist: N/M- und M/H-Verfahren (N (Normaldruck) > 1,7 bar; M (Mitteldruck) = 1,7 – 6,5 bar; H (Hochdruck = 6,5 – 13 bar). Am weitesten verbreitet in Deutschland sind die M/M- und M/H-Anlagen.

Salpetersäure-Anlagen erzeugen in der Regel eine 50- bis 70%ige Säure. Konzentrierte und hochkonzentrierte Salpetersäure > 70 % werden für technische Anwendungen benötigt und durch direkte Verfahren mit Hilfe von N_2O_4 oder indirekte Verfahren aus der Schwachsäure hergestellt. Dieser Prozessschritt gilt als sehr energieintensiv. Weltweit betrachtet machen die konzentrierte und hochkonzentrierte Säure nur etwa 10 % der Gesamtproduktion aus (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 10).

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Die Oxidation des Ammoniaks ist eine stark exotherme Reaktion (exotherme Gesamtreaktion: ΔH = -396 kJ/mol, exotherme Ammoniak-Oxidation: ΔH = -904 kJ/mol, Oxidation von NO: ΔH = -114 kJ/mol). In dieser Prozessstufe wird Dampf erzeugt, der teilweise im Prozess verbraucht wird, z. B. für die dampfgetriebenen Kompressoren und die Rektifizierkolonne. Der Rest wird eventuell in anderen Prozessen am Standort weitergenutzt. Die Verwendung des Dampfes für die Stromerzeugung ist nur dann wirtschaftlich, wenn keine thermische Verwendung am Standort vorhanden ist. Eine sinnvolle Verwendung des überschüssigen Dampfes ist dabei ein wichtiger Faktor für die Energieeffizienz einer Salpetersäure-Anlage. Diese sind also energieeffizienter, wenn sie an integrierten Standorten stehen.

Für eine Polydruck-Salpetersäureanlage wird der Energieüberschuss auf 1,7 GJ/t 100 % HNO_3 geschätzt. Dies beinhaltet die Dampferzeugung von 2,4 GJ/t 100 % HNO_3 bei 40 bar und den Stromverbrauch von 0,112 GJ/t 100 % HNO_3 (UBA 2001a, S. 36). Der Strom wird hauptsächlich für den Antrieb der Kompressoren und Pumpen benötigt. Dabei hängt der Stromverbrauch vom Typ der Anlage, ihrer Kapazität, der Art der Absorptionskolonne sowie der Verwendung einer NO_x-Abgasbehandlung ab. In Tabelle 3-12 werden typische Energieverbrauchswerte für Salpetersäure-Anlagen mit Dampfturbinen angegeben.

Tabelle 3-12: Typische Energieverbrauchswerte für Salpetersäure-Anlagen mit Dampfturbinen

Anlagentyp	**M/M**	**H/H**	**M/H**
Betriebsdruck (bar)	5,8	10,0	4,6/12,0
Strom (kWh/t 100 % HNO_3)	9,0 (0,0324 GJ/t 100 % HNO_3)	13,0 (0,036 GJ/t 100 % HNO_3)	8,5 (0,0306 GJ/t 100 % HNO_3)
Niederdruck-Dampf, 8 bar (t Dampf/t 100 % HNO_3)	0,05	0,2	0,05
Überschüssiger Hochdruckdampf, 40 bar, 450 °C (t Dampf/t 100 % HNO_3)	0,76	0,55	0,65

Quelle: Uhde 2004

Wie aus den obigen Ausführungen ersichtlich, entstehen THG-Emissionen nicht hauptsächlich durch den Energieverbrauch, sondern durch die N_2O-Emissionen, die von einer Anlage zur anderen abweichen, abhängig vom Betriebsdruck, den anderen Betriebsbedingungen, der Ammoniak-Verbrennung, dem Katalysator usw. Im Folgenden werden die N_2O-Emissionswerte für die drei üblichen Druckstufen ohne Abgasbehandlung angegeben (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 14):

- Niederdruck-Anlagen: 5 kg N_2O / t Salpetersäure, +/- 10 %,
- Mitteldruck-Anlagen (3 – 7 bar) : 7 kg N_2O / t Salpetersäure, +/- 20 %,
- Hochdruck-Anlagen (> 8 bar) : 9 kg N_2O / t Salpetersäure, +/- 40 %.

Verschiedene Maßnahmen wurden zur Verringerung der N_2O-Emissionen eingeführt (siehe Kapitel 3.3.2.7). Zusätzlich zur Effizienz dieser Maßnahmen spielen bei der Bildung der genannten Emissionen die An- und Abfahrvorgänge eine wichtige Rolle. Diese sind durch die regelmäßigen Revisionen der Anlagen bzw. durch die ungeplanten Stilllegungen erforderlich. Dabei stehen in der Regel keine redundanten Abgasreinigungsanlagen zur Verfügung. Dadurch unterliegen die N_2O-Emissionen analog zur Adipinsäure-Herstellung von Jahr zu Jahr starken Schwankungen (siehe Kapitel 3.2.1.1).

Für das Jahre 2007 hat das UNFCCC basierend auf den Angaben des UBA die N_2O-Emissionen aus der Salpetersäure-Herstellung in Deutschland mit 3.178,670 kt CO_2-eq. angegeben[29], dies entspricht 10,254 kt N_2O. Ältere Schätzungen gehen von einem Emissionsfaktor von 5,5 kg N_2O/ t HNO_3 aus. Dadurch kommt man zu wesentlich höheren Emissionswerten (vgl. UBA 2010, S. 271).

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-13 zusammengefasst.[30]

Tabelle 3-13: Wichtigste Parameter der Salpetersäure-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Salpetersäure HNO_3 (WZ-Nummer, 2415 10 500)
Produktionsmenge 2007	1.245,378 kt N (Statistisches Bundesamt 2008) , entspricht 5.604,201 kt 100 % HNO_3 (vgl. UBA 2010, S. 271)
Prozesse	Ostwald-Verfahren Ein Prozess mit verschiedenen Modifikationen, Monodruck- und Polydruckanlagen (Niederdruck, Mitteldruck und Hochdruck) Einsatzstoff: Ammoniak
Energieverbrauch, absolut	Strom = 0,112 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = -4,335 PJ/a, TFEU = -4,035 PJ/a, TPEU = -4,059 PJ/a (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 98)
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 0,002 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 0,072 GJ/t, TFEU = 0,070 GJ/t, TPEU = 0,067 GJ/t
THG-Emissionen 2007	N_2O: entspricht 3.178,670 kt CO_2-eq. t Unterliegt ab 2013 dem Emissionshandels
Anzahl der Produzenten	7

29 Vgl. www.unfccc.int/di/FlexibleQueries/Event.do?event=go, abgelesen am 17.9.2010.

30 Weiteres zur Salpetersäure-Herstellung siehe z. B. (Büchel, Moretto, Wodisch 1999; Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 6; EFMA 2000b).

3.2.1.8 Toluylendiisocyanat (TDI)

Herstellungsprozesse

TDI wird hauptsächlich für die Herstellung von Polyurethanen eingesetzt. Als Einsatzstoffe werden Toluol und Salpetersäure verwendet. Der Prozess umfasst folgende Produktionsschritte:

1. Nitrierung von Toluol mit einem Gemisch aus Salpetersäure, Schwefelsäure und Wasser,
2. Hydrierung des Zwischenproduktes Dinitrotoluol (DNT) und
3. Phosgenierung des entstehenden Toluylendiamins (TDA) in einem Lösemittel zu TDI.

Das dabei entstehende HCl wird abgetrennt und in Deutschland meistens in Anlagen für HCl-Elektrolyse in Wasserstoff und Chlor zerlegt, die in den Prozess zurückgeführt werden. TDI wird oft in integrierten Anlagen hergestellt, die auch die Phosgen-Herstellung enthalten.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der relativ hohe spezifische Energieverbrauch, vor allem an Wärme, resultiert aus einigen energieintensiven Prozessschritten, wie die Rektifikation des TDI, die Rückgewinnung der Schwefelsäure usw. Moderne Anlagen verfügen über hoch entwickelte Energierückgewinnungssysteme. So wird in der Hydrierungsstufe und bei der Abgasverbrennung Wärme zurückgewonnen und daraus Dampf erzeugt, der für den Antrieb der Kompressoren eingesetzt bzw. bei integrierten Standorten zu anderen Anlagen des Standortes exportiert wird.

Wichtige Parameter des Prozesses werden in Tabelle 3-14 zusammengefasst.

Tabelle 3-14: Wichtigste Parameter der TDI-Herstellung in Deutschland (Nitrierung, Hydrierung und Phosgenierung)

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Toluylendiisocyanat (WZ-Nummer, 2414 44 500)
Produktionsmenge 2007	400 kt (geschätzt)[31]
Prozesse	Integrierter Prozess aus der Nitrierung, Hydrierung und Phosgenierung Einsatzstoff: Toluol, Phosgen und Salpetersäure
Energieverbrauch, absolut	Strom = 1,104 PJ/a, Brennstoff + Dampf = 10,676 PJ/a, TFEU = 11,78 PJ/a, TPEU = 13,388 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch auf TDI bezogen	Strom = 2,76 GJ/t, Brennstoff + Dampf = 26,69 GJ/t, TFEU = 29,45 GJ/t, TPEU = 33,47 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 104)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs	Phosgenierung: 180 °C
Anzahl der Produzenten	2
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-63

In Tabelle 3-63 im Anhang dieses Kapitels werden die Standorte und die Kapazitäten für Deutschland mitgeteilt. Eine Anlage mit neuer Technologie ist durch Bayer Material Science für eine Kapazität von 300 kt/a am Standort Dormagen geplant. Sie soll die bestehenden Anlagen in Brunsbüttel und Dormagen 2014 ersetzen (www.finanzen.net, abgelesen am 1.3.2010).[32]

3.2.1.9 Zusammenfassung der Energieverbräuche und der THG-Emissionen für die organischen Grundstoffe

Die Energieverbräuche der organischen Grundstoffe werden in Tabelle 3-15 dargestellt.

31 Produktion 2007: 1.325,845 kt (alle Cyanate) (St. BA 2008), Kapazität: TDI = ca. 400 kt/a.

32 Weiteres zur Herstellung von Toluylendiisocyanat siehe z. B. (Arpe 2006, S. 421; IPTS 2003, S. 325).

Tabelle 3-15: Zusammenfassung der Energieverbräuche der organischen Grundstoffe

Prozesse	Produktions-menge 2007 (kt)	Spezifischer Stromver-brauch (GJ/t)	Absoluter Stromverbrauch 2007 (PJ)	Spezifischer Verbrauch an Brennstoff und Dampf (GJ/t)	Absoluter Ver-brauch an Brennstoff und Dampf 2007 (PJ)	Absoluter End-energie-verbrauch 2007 (PJ)	TPEU 2007 (PJ)*
Adipinsäure	543,665	1,44	0,783	26,91	14,630	15,413	16,540
Ammoniak, Destillations-rückstand	1.100,432	0,48	0,528	16,50	18,157	18,685	19,566
Ammoniak, Erdgas	2.234,211	0,48	1,072	8,70	19,438	20,510	21,873
Calciumcarbid	189,629	8,32	1,578	6,12	1,161	2,739	5,038
Ethylen, gasförmige KW	1.280,000	0,00	0,000	17,50	7,136	7,136	7,136
Ethylen, Gasöl	2.350,000	0,00	0,000	47,00	38,333	38,333	38,333
Ethylen, Naphtha	12.160,000	0,00	0,000	35,50	135,720	135,720	135,720
Industrieruß	664,642	1,78	1,183	64,75	43,035	44,218	45,942
Methanol, Klärschlamm	101,246	0,22	0,022	18,67	1,890	1,934	1,944
Methanol, Destillations-rückstand	1.478,197	0,96	0,961	17,22	25,455	26,416	27,806
Methanol, Erdgas	445,484	0,00	0,000	6,95	3,096	3,096	3,096
Salpetersäure 100 % HNO_3	5.604,201	0,002	0,112	0,072	- 0,403	- 0,291	- 0,128
TDI	400,00	2,76	1,104	26,69	10,676	11,780	13,388
Summe	28.551,707	-	7,343	-	318,324	325,667	336,254
* TPEU = absoluter Gesamt-Primärenergieverbrauch							

Die N_2O-Emissionen für das Basisjahr 2007 werden in Tabelle 3-16 dargestellt.

Tabelle 3-16: Zusammenfassung der N_2O-Emissionen 2007 bei den organischen Grundstoffen

Prozess	**N_2O-Emissionen 2007 (kt)**	**CO_2-Äquivalente 2007 (Mt)**
Adipinsäure	18,140	5,623.500
Salpetersäure	10,254	3,178.670
Summe	28,394	8,802.170

3.2.2 Anorganische Grundstoffe

3.2.2.1 Chlor

Herstellungsprozesse

Chlor wird mit Hilfe der Chloralkalielektrolyse aus Kochsalz (Natriumchlorid: $NaCl_2$) hergestellt. Als Nebenprodukte fallen Natronlauge und kleinere Mengen an Wasserstoff an. Drei Verfahren sind gebräuchlich: Amalgam-Verfahren, Diaphragma-Verfahren und Membran-Verfahren.

In Deutschland dominierte über lange Zeit das Amalgam-Verfahren, das jedoch immer mehr durch das Membran-Verfahren verdrängt wurde. Nach Umrüstung vieler Amalgam-Anlagen auf Membran-Technologie steht diese heute mit einem Anteil von mehr als 50 % an erster Stelle. Die Kapazität beträgt 2,748 kt/a. Ein Beispiel hierzu sind die drei Bayer-Anlagen, die nach und nach umgerüstet wurden (Uerdingen 1997, Dormagen 1999, Leverkusen 2002). Das Amalgam-Verfahren mit einer Kapazität von ca. 867 kt/a hat nur noch einen Anteil von weniger als 20 %. Dies hängt nicht nur mit dem höheren Energieverbrauch zusammen, sondern auch mit den Hg-Emissionen beim Amalgam-Verfahren. Die europäische Chlorindustrie hat sich daher freiwillig verpflichtet, bis 2020 alle Amalgam-Anlagen stillzulegen bzw. umzurüsten. In Deutschland erwartet man, dass etliche Amalgam-Anlagen schon vor diesem Termin umgerüstet werden. Nach dem Diaphragma-Verfahren werden zwei Anlagen mit einer Kapazität von etwas mehr als 1.160 kt/a betrieben.

Dabei hat jedes der drei Verfahren seine Vor- und Nachteile. Dies gilt vor allem für folgende Aspekte: spezifischer Energieverbrauch, benötigte Reinheit der Sole, Reinheit des Chlors, Reinheit der Natronlauge und Konzentration der Natronlauge. Zudem wird das Amalgam-Verfahren wegen der Quecksilber-Emissionen bzw. das Diaphragma-Verfahren wegen der Asbest-Emissionen kritisiert (vgl. auch IPTS 2001, S. 11).

Beim Membran-Verfahren weist die Natronlauge eine hohe Reinheit auf und fällt mit einer Konzentration von 33 % an. Ähnliches gilt für das Amalgam-Verfahren. Auch hier hat die Natronlauge eine hohe Reinheit und eine Konzentration von 50 %. Dagegen ist die Reinheit der Natronlauge beim Diaphragma-Verfahren gering und die Konzentration liegt bei 12 %. Eine Reinigung und Aufkonzentrierung könnte in diesem Fall notwendig sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anforderungen an die Reinheit der Natronlauge in den letzten Jahren gestiegen sind. Allerdings wird in manchen Anwendungen die Natronlauge mit der anfallenden Konzentration und Qualität weiterverarbeitet, wie dies bei der Herstellung von Propylenoxid nach dem Chlorhydrin-Verfahren bzw. für die Herstellung von Epichlorhydrin der Fall ist.

Chlor wird auch aus HCl durch Elektrolyse recycelt. Dies ist beispielsweise bei der Herstellung von TDI und TDM der Fall. Das zurückgewonnene Chlor wird dann in den Prozess zurückgeführt, und man vermeidet so eine Entsorgung des HCl (Winnacker-Küchler 2005, S. 574).

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der Energieverbrauch wird meistens auf das Chlor als Hauptprodukt bezogen. Manchmal dient aber die Natronlauge als Bezugsbasis. Entscheidend beim Vergleich des Energieverbrauchs der drei Verfahren ist der spezifische Energieverbrauch. Dieser setzt sich als Primärenergieverbrauch aus dem Strom- und Wärmeverbrauch, Letzteres für die Aufbereitung der Natronlauge, zusammen. Während er beim Membran-Verfahren bei 26,52 GJ/t Chlor liegt, beträgt er beim Amalgam-Verfahren 31,50 GJ/t und beim Diaphragma-Verfahren 35,98 GJ/t, vorausgesetzt dass die Natronlauge aufkonzentriert wird (vgl. Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103; IPTS 2001, S. 35ff). Wärme wird sowohl beim Diaphragma- als auch beim Membran-Verfahren benötigt, um die Natronlauge auf 50 % aufzukonzentrieren. Die genannte Konzentration der Natronlauge ist üblich für ihren Verkauf sowie für viele nachfolgende Anwendungen.

Ein Hauptgrund für den höheren Stromverbrauch beim Amalgam-Verfahren ist die um 20 % höhere Zellspannung. Außerdem hängt der Stromverbrauch von der Stromdichte ab: je höher die Stromdichte, desto höher der Verbrauch. Allerdings ist dann die Investition geringer. Es ist also ein klassisches Optimierungsproblem: kapitalabhängige Kosten versus Betriebskosten. In Deutschland liegt beim Membran-Verfahren die Stromdichte im Durchschnitt bei 5 kA/m2. Wenn das Chlor verflüssigt werden soll, benötigt man zusätzlich einen Stromverbrauch von ca. 0,72 GJ/t Chlor (IPTS 2001, S. 109). Der Energieverbrauch für die drei oben genannten Verfahren wird in Tabelle 3-17 dargestellt. In anderen Quellen findet man davon abweichende Angaben (siehe z. B. IEA 2009, S. 76). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Energieverbrauch regelmäßig verbessert wird.

Tabelle 3-17: Technologiespezifische Verbrauchswerte für Verfahren zur Chlor-Alkali-Elektrolyse

Prozess	Elektrolyse im engeren Sinne	Equipment	Elektrolyse im weiteren Sinne	Anmerkung
	[MWh/t Cl_2]			
Amalgam-Verfahren	3,36 (9,30 GJ/t)	0,20 (0,56 GJ/t)	3,56 (9,89 GJ/t)	Erfahrungswert
Diaphragma-Verfahren	2,72 (7,56 GJ/t)	0,25 (0,69 GJ/t)	2,97 (8,25 GJ/t)	Erfahrungswert
Membran-Verfahren	2,65 (7,36 GJ/t)	0,14 (0,39 GJ/t)	2,79 (7,75 GJ/t)	Erfahrungswert
HCl-Elektrolyse	2,43 (6,75 GJ/t)	0,20 (0,56 GJ/t)	2,63 (7,31 GJ/t)	Schätzung / Prognose

Quelle: Stein 2006,S. 265

Wichtige Parameter der Chloralkalielektrolyse werden in Tabelle 3-18 zusammengefasst. Im Anhang dieses Kapitels werden in Tabelle 3-64 die Standorte und die Kapazitäten für Chlor in Deutschland mitgeteilt.[33]

Tabelle 3-18: Wichtigste Parameter der Chlor-Herstellung in Deutschland

Parameter	Wert/Beschreibung
Zielprodukt	Chlor, Cl_2 (WZ-Nummer 2413 11 110) Nebenprodukte: Natronlauge sowie kleinere Mengen Wasserstoff (28 kg H_2 pro t Chlor)
Produktionsmenge 2007	5.082,913 kt Chlor (Statistisches Bundesamt 2008) und 5.727,575 kt Natronlauge Kapazitäten 2007: · Amalgam-Verfahren: 867 kt (16,9 %), · Diaphragma-Verfahren: 1.162 kt (22,7 %), · Membran-Verfahren: 2.748 kt (53,4 %), · HCl-Elektrolyse: 350 kt (6,8 %)(siehe Tabelle 3-64)
Prozesse	Chloralkalielektrolyse Drei Prozesse: Amalgam-Verfahren, Diaphragma-Verfahren, Membran-Verfahren Einsatzstoff für alle Prozesse: Kochsalz (Natriumchlorid)
Energieverbrauch 1, absolut, , aufs Chlor bezogen (Amalgam-Verfahren)	Strom = 11,013 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 0,000 PJ/a, TFEU = 11,013 PJ/a, TPEU = 27,058 PJ/a

33 Weiteres zur Chloralkalielektrolyse-Herstellung siehe z. B. (Büchel, Moretto, Wodisch 1999; IPTS 2001; Ullmann 2009; Winnacker-Küchler 2005).

Parameter	Wert/Beschreibung
Energieverbrauch 1, spezifisch, aufs Chlor bezogen (Amalgam-Verfahren)	Strom = 12,82 GJ/t, Brennstoffe und Dampf = 0,00 GJ/t, TFEU = 12,82 GJ/t, TPEU = 31,50 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Energieverbrauch 2, absolut, aufs Chlor bezogen (Diaphragma-Verfahren)	Strom = 12,334 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 0,00 PJ/a, TFEU = 12,334 PJ/a, TPEU = 30,305 PJ/a
Energieverbrauch 2, spezifisch, aufs Chlor bezogen (Diaphragma-Verfahren)	Strom = 10,69 GJ/t, Brennstoffe und Dampf = 0,00 GJ/t, TFEU = 10,69 GJ/t, TPEU = 26,26 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103), eigene Recherchen
Energieverbrauch 3, absolut, aufs Chlor bezogen (Membran-Verfahren)	Strom = 27,251 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 5,021 PJ/a, TFEU = 32,272 PJ/a, TPEU = 71,977 PJ/a
Energieverbrauch 3, spezifisch, aufs Chlor bezogen (Membran-Verfahren)	Strom = 10,04 GJ/t, Brennstoffe und Dampf = 1,85 GJ/t, TFEU = 11,90 GJ/t, TPEU = 26,52 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 103)
Anzahl der Produzenten	12
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-64

3.2.2.2 Sauerstoff

Herstellungsprozesse

Sauerstoff wird in großen Mengen hergestellt, sodass die Sauerstoff-Herstellung zu den größten Stromverbrauchern in Deutschland gehört. Er wird für die chemische Industrie zum überwiegenden Teil durch Tieftemperaturzerlegung der Luft gewonnen. Stickstoff fällt als Nebenprodukt an. Dieser hat in der chemischen Industrie begrenzte Verwendungsmöglichkeiten, z. B. als Inertgas. In tief verflüssigter Form hat er aber in der Lebensmittelindustrie zahlreiche Einsatzgebiete, z. B. für das Gefriertrocknen von Lebensmitteln.

Der Tieftemperaturzerlegungsprozess besteht aus folgenden Prozessschritten: Kompression und Kühlung, Reinigung der Luft sowie Rektifikation. Die Druckenergie der Luft aus der Rektifizierstufe wird für den Antrieb einer Turbine eingesetzt, mit der man elektrischen Strom gewinnen kann.

Sauerstoff und andere Industriegase werden oft durch Industriegashersteller produziert und an die chemische Industrie geliefert. Die Produktionsanlagen stehen dann am Standort der Abnehmer. Sauerstoff wird aber auch in anderen Industriebranchen benötigt, wie z. B. in der Stahlindustrie.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Die Tieftemperaturluftzerlegung ist ein energieintensiver Prozess, da die Luft auf fast minus 190 °C gekühlt und dabei verflüssigt wird. Für die Kompression der Luft wird überwiegend elektrische Energie eingesetzt. Der Energiebedarf hängt auch davon ab, ob die Gase in flüssiger oder gasförmiger Form benötigt werden.

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-19 zusammengefasst.[34]

Tabelle 3-19: Wichtigste Parameter der Herstellung von Sauerstoff in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Sauerstoff (WZ-Nummer: 2411 11 700) Nebenprodukt: Stickstoff
Produktionsmenge 2007	7.696,998 kt (Statistisches Bundesamt 2008)
Prozesse	Tieftemperaturluftzerlegung
Energieverbrauch, absolut	Strom = 7,312 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 0,000 PJ/a, TFEU = 7,312 PJ/a, TPEU = 17,965 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch auf den Sauerstoff bezogen	Strom = 0,95 GJ/t, Brennstoffe und Dampf = 0,00 GJ/t, TFEU = 0,95 GJ/t, TPEU = 2,33 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008)
Anzahl der Produzenten	14 (Statistisches Bundesamt 2008)
Standorte	Auf allen größeren und mittleren Standorten stehen Luftzerlegungsanlagen.

3.2.2.3 Soda

Herstellungsprozesse

Soda wird in Deutschland nach dem Solvay-Verfahren durch die Umsetzung von Natriumchlorid (Kochsalz) und Calciumcarbonat (Kalkstein) hergestellt. Als Nebenprodukt fällt $CaCl_2$ an. Dabei werden zwei Arten von Soda produziert: Schwer- und Leichtsoda. Sie unterscheiden sich durch ihre Dichte. Schwersoda gewinnt man aus Leichtsoda, indem letzteres zunächst in Natriumcarbonatmonohydrat umkristallisiert und anschließend durch Dehydration in Schwersoda umgewandelt wird. Schwersoda wird hauptsächlich in der Glasindustrie verwendet. Der Solvay-Prozess besteht aus folgenden Prozessschritten: Solereinigung, Brennung des Kalks, Kalkmilchaufbereitung, Herstellung des Natriumbicarbonats durch Einleitung von Kohlensäure und Ammoniak und seine Fällung, thermische Zersetzung des Natriumbicarbonats durch Calcinierung und

34 Weiteres zur Herstellung von Sauerstoff siehe z. B. (Häring 2008, S. 9; Ullmann 2009).

Ammoniak-Rückgewinnung aus dem Ammoniumchlorid mit Kalkmilch und seine Rückführung in den Prozess. Verschiedene Prozessvarianten sind im Einsatz.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der Solvay-Prozess gilt als sehr energieintensiv. Charakteristisch dafür ist der Bedarf an unterschiedlichen Arten von Energie: Strom, Brennstoffe und Dampf verschiedener Druckstufen. Dabei wird Energie in mehreren Prozessschritten benötigt: in der Aufbereitung der Sole, in der Calcinierung des Calciumcarbonats in Form von Brennstoff oder Dampf, in der Calcinierung des Rohbicarbonats und in der Ammoniak-Rückgewinnung. Der Energieverbrauch zum Brennen des Kalks wird durch seine Qualität bestimmt. Die Calcinierung des Rohbicarbonats inklusive der Trocknung des filterfeuchten Produktes erfordert insgesamt eine Wärmemenge von ca. 3,7 GJ je Tonne Soda. Für die Destillation zur NH_3-Rückgewinnung wird Niederdruckdampf (< 5 bar abs.) benötigt. Die Gaskompressoren können entweder durch elektrischen Strom oder mit Hilfe von Dampfturbinen angetrieben werden. Der Stromverbrauch liegt dann zwischen 0,18 und 0,468 GJ/t Soda (ESAPA, 2004, S. 37).

Jedoch fällt in anderen Prozessschritten Wärme an. Die der NH_3-Absorption sowie der Karbonisierung zugrunde liegenden Reaktionen sind stark exotherm. Bei der NH_3-Absorption müssen ca. 1,84 GJ/ t Soda und bei der Karbonisierung ca. 1,42 GJ/ t Soda abgeführt werden. Mit der abgeführten Wärme wird Dampf produziert, der zum Teil den Bedarf der Calcinierung abdeckt. Die bei Siedetemperatur anfallende Endlauge wird in Rheinberg zur Energierückgewinnung einer Vakuumentspannung zugeführt (UBA 2001c, S. 14).

Da ein Großteil der Energie auf einem niedrigen Temperaturniveau benötigt wird, bietet es sich an, mit dem Brennstoff eine KWK-Anlage zu betreiben. Zusätzlich zum Strom gewinnt man dann Dampf, der vollständig im Prozess eingesetzt wird, sodass ein Gesamtwirkungsgrad für die KWK von über 90 % erreicht wird (IPTS 2007c, S. 67). Der überschüssige Strom kann in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. In Staßfurt wird Dampf aus einer benachbarten Abfallverbrennungsanlage bezogen (Sodawerk Staßfurt 2007). In Tabelle 3-20 wird der Energieverbrauch für den Solvay-Prozess angegeben.

Durch das Brennen des Kalks entstehen große Mengen an CO_2. Jedoch wird ein Großteil in den Solvay-Prozess zurückgeführt. Abhängig vom Optimierungsstand der Anlage gelten 0,2 – 0,4 t CO_2/t Soda als BVT. Bei Anlagen mit integrierter Natriumbicarbonat-Herstellung ist das anfallende CO_2 geringer (IPTS 2007c, S. 83). Soda kann dabei nicht als CO_2-Senke betrachtet werden, da CO_2 in den Folgeprozessen, wie z. B. in der Glasindustrie, teilweise freigesetzt wird (IPTS 2007c, S. 82).

Tabelle 3-20: Energieverbrauch bei der Soda-Herstellung

Art der Energie	**Energieverbrauch GJ/t Schwersoda**
Brennstoff (Kalkofen)	2,2 – 2,8 (Durchschnitt 2,5)
Brennstoff (Soda) Strom (Soda)	7,5 – 10,8 (Durchschnitt 9,15) 0,18 – 0,47 (Durchschnitt 0,325 GJ/t)
Summe	Durchschnitt = 11,98 GJ/t

Quelle: ESAPA 2004, S. 75

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-21 zusammengefasst.

Tabelle 3-21: Wichtigste Parameter der Soda-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Soda (Na_2CO_3) (WZ-Nummer 2413) Nebenprodukte: Natriumbicarbonat (Natriumhydrogencarbonat) ($NaHCO_3$) und Calciumchlorid ($CaCl_2$)
Produktionsmenge 2007	1.415,455 kt[35]
Prozesse	Solvay-Prozess
Energieverbrauch, absolut	Strom = 0,467 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 16,037 PJ/a, TFEU 16,505 = PJ/a, TPEU = 17,184 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 0,33 GJ/t, Brennstoffe und Dampf = 11,33 GJ/t, TFEU 11,66 = GJ/t, TPEU = 12,14 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 104)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs	Brennen des Kalks: 900 °C Calcinierung des Rohbicarbonats: 160 °C
Anzahl der Produzenten	3
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-65

Im Anhang dieses Kapitels werden in Tabelle 3-65 die Standorte und die Kapazitäten für Deutschland mitgeteilt. Die angegebenen Daten zum Beginn der Produktion machen keine Aussage über das wirkliche Alter der Anlagen und ihren Zustand, da sie mehrmals modernisiert wurden. Zusätzlich wird Natriumbicarbonat in Rheinberg (50.000 t/a) und Staßfurt (45.000 t/a) gewonnen (ESAPA 2004, S. 47).[36]

35 Produktionsmenge Soda 2007 (in wässriger Lösung) und Natriumbicarbonat = 1.510,455 kt (St. BA 2008).

36 Weiteres zur Herstellung von Soda siehe z. B. (Büchel, Moretto, Wodisch 1999; Ecofys/ Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 59; ESAPA 2004; IPTS 2007c, S. 51ff; Ullmann 2009).

3.2.2.4 Titandioxid

Herstellungsprozesse

Titandioxid wird nach zwei Verfahren hergestellt: das Sulfat-Verfahren und das Chlorid-Verfahren. Als Rohstoff wird Ilmenit, Rutil oder Titanschlacke eingesetzt. In beiden Verfahren geht es um die Gewinnung des Titandioxids in reiner Form aus dem Rohstoff.

Beim Sulfat-Verfahren wird der gemahlene Rohstoff mit Schwefelsäure diskontinuierlich aufgeschlossen. Durch Hydrolyse wird das Titanoxidhydrat ausgefällt. Je nach Rohstoff werden 2,4 – 3,5 t konzentrierter H_2SO_4 pro Tonne TiO_2 benötigt. Die Schwefelsäure wird zum Teil als Sulfat, insbesondere Fe(II)-Sulfat, bzw. als freie Schwefelsäure in der Gebrauchtsäure aus dem Prozess freigesetzt. Insgesamt fallen ca. 6 – 9 t Gebrauchtsäure je Tonne Pigment an (UBA 2001b, S. 5). Lange Zeit war bei der Titandioxid-Herstellung nach dem Sulfat-Verfahren das Verklappen von Dünnsäure im Meer üblich. Dies wurde 1990 verboten. Die Rückgewinnung der Gebrauchtsäure stellt nun in Deutschland einen Teil des Prozesses dar.

Beim Chlorid-Verfahren wird der Rohstoff kontinuierlich mit Chlor in einem Wirbelbettreaktor chloriert, wobei Petrolkoks als Reduktionsmittel verwendet wird. Die Chlorierungstemperatur liegt bei 1.000 °C, die Reaktion ist exotherm. Anschließend wird das gebildete Titantetrachlorid im Plasma-Lichtbogenofen oder in einem durch Gas beheizten Ofen zu Titandioxid oxidiert. Das Chlor wird dann zurückgeführt.

Anschließend wird ein Großteil des Titandioxids aus beiden Prozessen einer organischen und anorganischen Nachbehandlung unterzogen, um ihm bessere Eigenschaften zu verleihen.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Alle Prozessschritte des Sulfat-Verfahrens sind energieintensiv. Das gilt vor allem für das Calcinieren des Hydrolysats, die Aufarbeitung der Gebrauchtsäure und die Nachbehandlung des Titandioxids.

Der Säureaufbereitungsschritt kann in zwei Prozessstufen gegliedert werden:

1. Rückgewinnung der freien Säure mit Hilfe von Tauchbrennern und durch Eindampfen.
2. Thermisches Spalten der Sulfate und H2SO4-Herstellung aus dem Schwefeldioxid: Die abgetrennten stark schwefelsäurehaltigen Sulfate werden auskristallisiert und in Fließbettreaktoren bei Temperaturen von 800 – 1.000 °C in Schwefeldioxid und Eisenoxid gespalten (Büchel, Moretto, Wodisch 1999, S. 580; UBA 2001b, S. 5).

Der Energiebedarf beim Sulfat-Verfahren wird in Tabelle 3-22 dargestellt. Eine große Energieschwankungsbreite ist auch von den gewünschten Produkteigenschaften abhängig. Da dieser Energieverbrauch mehr als zehn Jahre zurückliegt, kann man annehmen, dass der heutige Energieverbrauch um einige Prozente niedriger liegt. Ausführliche Angaben hierzu findet man in IPTS 2007c, S. 153.

Tabelle 3-22: Energieverbrauch beim Sulfat-Verfahren für deutsche Produktionsstandorte

Energieart	**TiO_2- Herstellung**	**Nachbehandlung**	**Säureaufkonzentration und Filtersalzspaltung**	**Summe**
Strom (GJ/t)	1,5 – 2,31	0,6 – 1,46	0,13 – 1,3	2,23 – 5,07
Dampf (GJ/t)	3,7 – 7,7	6,7 – 10,47	0 – 5,07	10,4 – 23,24
Gas (GJ/t)	7,3 – 11,85	2,37 – 4,22	0 – 0,1	9,67 – 16,1
Kohle u. a. (GJ/t)	5,8 – 8,5	–	–	5,8 – 8,5
Energie, gesamt (GJ/t)	12,6 – 20,5	9,9 – 14,3	5,93 – 15,17	28,43 – 49,97

Quelle: UBA 2001b, S. 12

Beim Chlorid-Verfahren sind der Chlorierungs-Prozessschritt und die Oxidierung des Titantetrachlorids im Plasma-Lichtbogenofen besonders energieintensiv. Der Energiebedarf beim Chlorid-Verfahren wird in Tabelle 3-23 dargestellt. Der Energieverbrauch liegt heute wahrscheinlich niedriger.

Tabelle 3-23: Energiebedarf des Chlorid-Verfahrens, Mittelwerte aus der Anlage in Leverkusen

Energieart	**TiO_2- Herstellung**	**Nachbehandlung**	**Summe**
Strom (GJ/t)	1,51	0,83	3,85
Dampf (GJ/t)	1,71	7,68	8,85
Gas (GJ/t)	2,86	4,22	7,08
Gesamte Energie (GJ/t)	6,1	12,7	18,8

Quelle: UBA 2001b, S. 19

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-24 zusammengefasst. Im Anhang dieses Kapitels werden in Tabelle 3-66 die Standorte und die Kapazitäten für Deutschland mitgeteilt.[37]

37 Weiteres zur Titandioxid-Herstellung siehe z. B. (AEA 2007; Büchel, Moretto, Wodisch 1999, S. 577; IPTS 2007c, S. 103; UBA 2001b; Ullmann 2009).

Tabelle 3-24: Wichtigste Parameter der Titandioxid-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Titandioxid TiO_2 (WZ-Nummer 2413 11 500)
Produktionsmenge 2007	460,141 kt (Statistisches Bundesamt 2008) (aufgeteilt nach der Kapazität: 351,103 kt nach dem Sulfat-Verfahren und 109,038 kt nach dem Chlorid-Verfahren)
Prozess 1: Sulfat-Verfahren	Rohstoffe: Ilmenit, Rutil oder Titanschlacke und Schwefelsäure[38]
Prozess 2: Chlorid-Verfahren	Rohstoffe: Ilmenit, Rutil oder Titanschlacke, Chlor und Koks[39]
Energieverbrauch 1, absolut (Sulfat-Verfahren)	Strom = 1,282 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 13,953 PJ/a, TFEU = 15,235 PJ/a, TPEU = 17,103 PJ/a
Energieverbrauch 1, spezifisch (Sulfat-Verfahren)	Strom = 3,65 GJ/t, Brennstoffe und Dampf = 39,74 GJ/t, TFEU = 43,39 GJ/t, TPEU = 48,71 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 104)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs, Sulfat-Verfahren	Rückgewinnung der freien Säure: > 1.000 °C Thermisches Spalten der Sulfate: 800 – 1.000 °C
Energieverbrauch 2, absolut (Chlorid-Verfahren)	Strom = 0,255 PJ/a, Brennstoffe und Dampf = 1,796 PJ/a, TFEU = 2,05 PJ/a, TPEU = 2,42 PJ/a
Energieverbrauch 2, spezifisch (Chlorid-Verfahren)	Strom = 2,34 GJ/t, Brennstoffe und Dampf = 16,47 GJ/t, TFEU = 18,81 GJ/t, TPEU = 22,22 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 104)
Temperaturniveau des Wärmebedarfs, Chlorid-Verfahren	Chlorierung im Wirbelschichtreaktor: 1.000 °C Oxidierung des Titantetrachlorids im Plasma-Lichtbogenofen: 1.000 °C
Anzahl der Produzenten	3
Standorte, Kapazitäten	Siehe Tabelle 3-66

3.2.2.5 Zusammenfassung der Energieverbräuche für die anorganischen Grundstoffe

Die Energieverbräuche der anorganischen Grundstoffe werden in Tabelle 3-25 dargestellt.

38 Energieverbrauch in Prozessen mit Neutralisation der Dünnsäure: 23 – 29 GJ/t TiO2 Pigment; Energieverbrauch in Prozessen mit Eindampfung der Dünnsäure: 33 – 41 GJ/t TiO2 Pigment in (IPTS 2007c, S. 10).

39 Energieverbrauch für das Chlorid-Verfahren: 17 – 25 GJ/t TiO_2 Pigment (IPTS 2007c, S.10).

Tabelle 3-25: Zusammenfassung der Energieverbräuche der anorganischen Grundstoffe

Prozesse	Produktionsmenge 2007 (kt)	Spezifischer Stromverbrauch (GJ/t)	Absoluter Stromverbrauch 2007 (PJ)	Spezifischer Verbrauch an Brennstoff und Dampf (GJ/t)	Absoluter Verbrauch an Brennstoff und Dampf 2007 (PJ)	Absoluter Endenergieverbrauch 2007 (PJ)	TPEU 2007 (PJ)*
Chlor, Diaphragma-Verfahren	1.162	10,69	12,422	0,00	0,00	12,422	30,520
Chlor, Amalgam-Verfahren	867	12,82	11,013	0,00	0,000	11,013	27,058
Chlor, Membran-Verfahren	2.748	10,04	27,589	1,85	5,084	32,673	72,870
Sauerstoff	7.696,998	0,95	7,312	0,00	0,000	7,312	17,965
Soda	1.415,455	0,33	0,467	11,33	16,037	16,504	17,184
Titandioxid, Sulfat-Verfahren	351,103	3,65	1,282	39,74	13,953	15,235	17,103
Titandioxid, Chlorid-Verfahren	109,038	2,34	0,255	16,47	1,796	2,051	2,420
Summe	14.349,59	-	60,870	-	36,870	97,210	185,120
* TPEU = absoluter Gesamt-Primärenergieverbrauch							

3.2.3 Polymere

3.2.3.1 Polycarbonate

Herstellungsprozesse

Polycarbonate gehören zu den technischen Kunststoffen. Das wichtigste Polycarbonat wird durch Umsetzung von Bisphenol-A mit Phosgen hergestellt. Die großtechnische Synthese erfolgt heute hauptsächlich durch die Phasengrenzflächenpolymerisation. Die Hauptprozessschritte sind neben der Polymerisationsstufe die Phasentrennung, die Waschstufe, die Polymerabtrennung durch Eindampfen und Fällen sowie die Granulierung. Auch wird das Umesterungsverfahren, das in den fünfziger Jahren eingeführt und später aufgegeben wurde, wieder verwendet, nachdem reinere Einsatzstoffe verfügbar wurden. Nach diesem Verfahren wird Bisphenol-A mit Diphenylcarbonat umgesetzt (Keim 2006, S. 182ff).

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Polycarbonate werden in einem mehrstufigen Prozess hergestellt, Je nach Prozess gibt es mehrere energieintensive Prozessschritte. Bei der Phasengrenzflächenpolymerisation sind es hauptsächlich die Polymerabtrennung und die Lösemittelaufarbeitung.

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-26 zusammengefasst.[40]

Tabelle 3-26: Wichtigste Parameter der Polycarbonat-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Polycarbonate (WZ = 2416 40 400)
Produktionsmenge 2007	455 kt/a (Statistisches Bundesamt 2008)
Prozesse	Mehrere Prozesse je nach Polycarbonat Einsatzstoff bei der Phasengrenzflächenpolymerisation: Bisphenol-A mit Phosgen
Energieverbrauch, absolut	Strom = 1,210 PJ/a, Brennstoff und Dampf = 5,851 PJ/a, TFEU = 7,061 PJ/a, TPEU = 8,823 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 2,66 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 12,86 GJ/t, TFEU = 15,52 GJ/t, TPEU = 19,39 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 104)
Anzahl der Produzenten	2

40 Weiteres zur Polycarbonat-Herstellung siehe z. B. (Keim 2006, S. 181; IPTS 2007a; Ullmann 2009).

3.2.3.2 Polyethylen

Herstellungsprozesse

Ethylen wird zu über 50 % zu Polyethylen verarbeitet. Dabei unterscheidet man verschiedene Arten des Polyethylens. Drei Arten haben sich mit ca. 90 % Anteil etabliert: HDPE, LDPE und LLDPE. Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Dichte, verbunden mit unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsgebieten. Sie werden mit Hilfe verschiedener Prozesse hergestellt. Die Reaktion läuft je nach Verfahren unter unterschiedlich hohen Drücken ab und ist exotherm.

HDPE hat bei weitem die größte Bedeutung. Es wird durch Suspensions- oder Gasphasenpolymerisation produziert. Dabei können unterschiedliche Reaktorarten verwendet werden: Rührkesselreaktor in Verbindung mit Suspensionspolymerisation, Schlaufenreaktor in Verbindung mit Suspensionspolymerisation, Wirbelschichtreaktor in Verbindung mit Gasphasenpolymerisation usw. Verschiedene Kühlungssysteme werden eingesetzt, die den Energieverbrauch beeinflussen können. Der Druck beim Rührkesselreaktor liegt bei 5 – 10 bar, beim Schlaufenreaktor bei 30 – 45 bar und beim Wirbelschichtreaktor bei 7 – 20 bar mit einer Temperatur von 85 – 105 °C. Dabei können drei Gruppen von Katalysatoren eingesetzt: Ziegler-Natta-, Philips- oder Metallocen-Katalysatoren.

LDPE wird in Rohr- oder in Rührkesselreaktoren hergestellt. Je nach Reaktor entstehen Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften. Der Energieverbrauch ist in beiden Prozessen ähnlich hoch. Die beiden Reaktoren unterscheiden sich dabei hauptsächlich durch den Reaktordruck, den Umsatz des Ethylens, die Wärmeabfuhr und die Initiatoren. Der Rührkesselreaktor wird adiabatisch betrieben, während beim Rohrreaktor die Wärme in einem Mantelkühler abgeführt wird. Für den Rohrreaktor werden als Initiatoren Sauerstoff und organische Peroxide und für den Rührkesselreaktor nur organische Peroxide verwendet. Das nicht umgesetzte Ethylen wird in den Reaktor zurückgeführt. Kolbenverdichter werden für die Erzeugung des Hochdrucks eingesetzt. Entscheidend für die Auswahl des Reaktors sind damit die gewünschten Produkte bzw. die Produktqualität. Abweichungen bis 10 % im Energieverbrauch sind möglich, je nach gewünschter Qualität (IPTS 2007a, S. 36).

LLPDE wird dagegen durch Gasphasen- bzw. Lösungspolymerisation hergestellt, wobei der Anteil des erstgenannten Prozesses in Europa überwiegt. Er wird vor allem eingesetzt, wenn Buten-1 als Co-Monomer verwendet wird. Die Wärme muss abgeführt werden. Dabei werden in diesem Reaktor Ziegler-Natta- oder Metallocen-Katalysatoren verwendet. Die Lösungspolymerisation läuft in der Regel in einem adiabatischen Reaktor oberhalb von 100 °C bei Drücken zwischen 30 – 200 bar ab. Die

Verwendung einer Reaktorkühlung trägt zur Reduktion des Energieverbrauchs bei (IPTS 2007a, S. 37). Die Gasphasenpolymerisation ist ähnlich der des HDPE. In Tabelle 3-27 werden einige wichtige Parameter für HDPE, LDPE und LLDPE zusammengefasst.

Tabelle 3-27: Wichtige Parameter für Polyethylen mit ihren Werten

Parameter	**HDPE**	**LDPE**	**LLDPE**
Polymerisation	Gasphasen- oder Suspensionspolymerisation	Radikalische Polymerisation	Gasphasen- oder Lösungspolymerisation
Reaktor	Rührkessel-, Schlaufen- oder Wirbelschichtreaktor	Rohr- oder Rührkesselreaktor	Rührkessel- oder Wirbelschichtreaktor
Temperatur des Reaktors (^{o} C)	85 – 105 oder 200 – 300	> 100	> 100 oder 200 – 300
Druck des Reaktors (bar)	5 – 10, 30 – 45 oder 7 – 20	1.500 – 3.500	30 – 200
Katalysator/ Initiator	Katalysatoren: Ziegler-Natta-, Philips- oder Metallocen-Katalysatoren	Initiatoren: Sauerstoff oder organische Peroxide	Katalysatoren: Ziegler-Natta- oder Metallocen-Katalysatoren

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der Energieverbrauch und die Art der benötigten Energie hängen stark vom Prozess ab. Wärme wird hauptsächlich in der Aufbereitung der Edukte und in der Trennung des Produktes verbraucht. Strom wird vornehmlich für die Kompression benötigt. In der Aufbereitungsstufe werden der Einsatzstoff und eventuell das Co-Monomer komprimiert. Dabei wird je nach Polyethylen mit verschiedenen Drücken gearbeitet, für die unterschiedliche Kompressoren verwendet werden. In der Trennstufe werden das restliche Monomer und eventuell das Lösemittel abgetrennt. Dabei wird das nicht umgesetzte Monomer in den Reaktor zurückgeführt. Das Lösemittel wird überwiegend durch Rektifikation gereinigt und wieder verwendet. In einem weiteren Schritt werden die Additive zugegeben. Die Reaktionswärme wird genutzt, um Niederdruckdampf zu erzeugen, der im Prozess oder am Standort eingesetzt wird.

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-28 zusammengefasst.[41]

41 Weiteres zur Polyethylen-Herstellung siehe z. B. (IPTS 2007a, S. 31ff; Keim S. 54;Ullmann 2009).

Tabelle 3-28: Wichtigste Parameter der Polyethylen-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Polyethylen: HDPE, LDPE, LLDPE (WZ = 2416 10 350/ 500/ 700)
Produktionsmenge 2007	Polyethylen gesamt: 2.846 kt, davon HDPE: 1.408 kt LDPE + LLDPE: 1.438 kt (Statistisches Bundesamt 2008)
Prozesse	3 Katalysatorgruppen bzw. 2 Initiatoren Mehrere Reaktortypen (siehe Tabelle 3-27) Einsatzstoff: Ethylen Co-Monomere möglich
Energieverbrauch, absolut	Strom = 5,806 PJ/a, Brennstoff und Dampf = 1,821 PJ/a, TFEU = 7,627 PJ/a, TPEU = 16,086 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 2,04 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 0,64 GJ/t, TFEU = 2,68 GJ/t, TPEU = 5,65 GJ/t (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 104)
Wichtige Standorte	Frankfurt/M/Hoechst Gelsenkirchen Gendorf Köln/ Dormagen Oberhausen Schkopau Wesseling

3.2.3.3 Polypropylen

Herstellungsprozesse

Polypropylen wird durch die Polymerisation des Propylens gewonnen. Dabei werden zwei Gruppen von Katalysatoren eingesetzt: die Ziegler-Natta- und die Metallocen-Katalysatoren. Die Ziegler-Natta-Katalysatoren, inzwischen in der vierten Generation, sind die älteren, aber mit ca. 90 % immer noch dominierend. Die neueren Entwicklungen der Ziegler-Natta-Katalysatoren erlauben die Herstellung von kleinen, kugelförmigen Polymerpartikeln, die durch Abdampfen der Monomere leicht abgetrennt werden können. Dadurch spart man sich die weiteren Schritte der Extrusion und der Granulierung und damit auch Energie. Die Metallocene führen dagegen zu einheitlicher, enger Massenverteilung. Für die Herstellung von Polypropylen werden ähnliche Reaktoren verwendet, wie bei HDPE: Gasphasenreaktoren und Suspensionsreaktoren.

Energieverbrauch und THG-Emissionen

In den Suspensionsreaktoren herrschen Drücke von 20 – 50 bar und Temperaturen zwischen 60 – 80 °C und in den Gasphasenreaktoren von 20 – 40 bar und 70 – 90 °C. Wegen der relativ moderaten Betriebsbedingungen im Vergleich zum Polyethylen ist der spezifische Stromverbrauch wesentlich geringer. Der Wärmeverbrauch liegt in der gleichen Größenordnung wie bei Polyethylen.

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-29 zusammengefasst.[42]

Tabelle 3-29: Wichtigste Parameter der Polypropylen-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Polypropylen (WZ = 2416 51 300)
Produktionsmenge 2007	1.928,257 kt/a (Statistisches Bundesamt 2008)
Prozesse	Zwei Katalysatorgruppen: Ziegler-Natta- oder Metallocen-Katalysatoren Zwei Reaktortypen Prozesse: Gasphasenpolymerisation, Suspensionspolymerisation, Massenpolymerisation
Energieverbrauch, absolut	Strom = 2,217 PJ/a, Brennstoff und Dampf = 1,543 PJ/a, TFEU = 3,76 PJ/a, TPEU = 6,990 PJ/a
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 1,15 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 0,80 GJ/t, TFEU = 1,95 GJ/t, TPEU = 3,63 GJ/t (Neelis et al. 2008)
Anzahl der Produzenten	4
Standorte	Gelsenkirchen Gendorf Schkopau Wesseling

3.2.3.4 Polysulfone und Polysulfide

Herstellungsprozesse

Die Polysulfone werden hier exemplarisch als Vertreter dieser Polymergruppe behandelt. Sie zählen zu den Hochleistungsthermoplasten und umfassen das Polyethersulfon (PES), das Polysulfon (PSU) und das Polyphenylsulfon (PPSU). Sie werden durch

42 Weiteres zur Polypropylen-Herstellung siehe z. B. (IPTS 2007a; Ullmann 2009; Karian 2003; Keim 2006, S. 84).

Mehrstufen-Polykondensation von Bisphenol-A mit 4,4'-Dichlordiphenylsulfon bzw. von Arylether mit Sulfonylchloriden unter Wirkung von Katalysatoren hergestellt (Keim 2006, S. 225).

Energieverbrauch und THG-Emissionen

Die Reaktion der ersten oben genannten Syntheserouten verläuft in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird wässrige Natronlauge oder Kalilauge mit Bisphenol-A-Lösung vermischt. Überschüssiges Wasser wird durch azeotrope Destillation bei 120 – 140 °C entfernt. Eine Lösung von Dichlorphenylsulfonen wird dann zugegeben. Die Polymerisation findet dann bei 130 – 160 °C unter inerter Atmosphäre statt, um eine Oxidation des Bisphenats zu vermeiden. Der hohe Energieverbrauch, vor allem an Dampf und Kältemittel, ist durch die Mehrstufigkeit und die mehrfachen Trennoperationen bedingt.

Wichtige Parameter zum Prozess werden in Tabelle 3-30 zusammengefasst.[43]

Tabelle 3-30: Wichtigste Parameter der Polysulfon-Herstellung in Deutschland

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Zielprodukt	Polysulfone (WZ = 2626 58 200)
Produktionsmenge 2007	Polysulfone und Polysulfide: 340,438 kt (Statistisches Bundesamt 2008)
Prozesse der Polysulfone	Produktabhängige Prozesse, Mehrstufen-Polykondensation Einsatzstoff: Bisphenol-A mit 4,4'-Dichlordiphenylsulfon und andere Edukte, je nach Produkt
Energieverbrauch, absolut	Strom = 1,042 PJ/a, Brennstoff und Dampf = 8,336 PJ/a, TFEU = 8,336 PJ/a, TPEU = 10,896 PJ/a (Saygın, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. 98)
Energieverbrauch, spezifisch	Strom = 3,06 GJ/t, Brennstoff und Dampf = 24,486 GJ/t, TFEU = 27,55 GJ/t, TPEU = 32,01 GJ/t

3.2.3.5 Zusammenfassung der Energieverbräuche für die Polymere

Die Energieverbräuche der Polymere werden in Tabelle 3-31 dargestellt.

43 Weiteres zur Polysulfon-Herstellung siehe z. B. (Keim 2006, S. 223; Ullmann 2009).

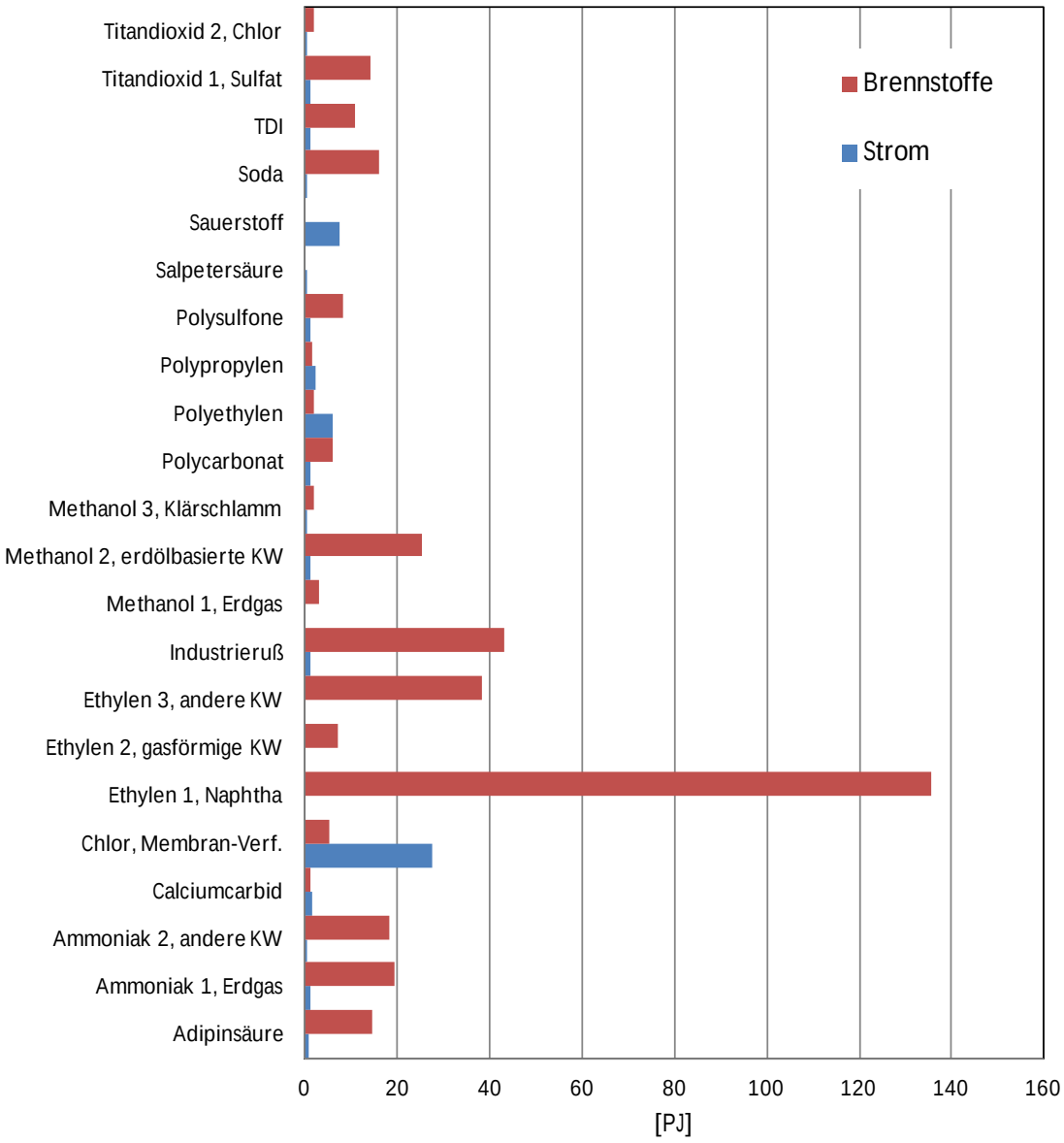
Tabelle 3-31: Zusammenfassung der Energieverbräuche der Polymere

Prozesse	Produktions-menge 2007 (kt)	Spezifischer Stromver-brauch (GJ/t)	Absoluter Strom-verbrauch 2007 (PJ)	Spezifischer Ver-brauch, Dampf und Brennstoff (GJ/t)	Absoluter Ver-brauch, Dampf und Brennstoff 2007 (PJ)	Absoluter End-energieverbrauch 2007 (PJ)	TPEU 2007 (PJ)*
Polycarbonate	455,000	2,66	1,210	12,86	5,851	7,061	8,823
Polyethylen	2.846,000	2,04	5,806	0,64	1,821	7,627	16,086
Polypropylen	1.928,257	1,15	2,217	0,80	1,543	3,76	6,990
Polysulfone und Polysulfide	340,438	3,06	1,042	24,52	8,336	9,378	10,896
Summe	5.569,695	-	10,275	-	17,551	27,826	42,795
* TPEU = absoluter Gesamt-Primärenergieverbrauch							

3.2.4 Zusammenfassung: THG-Emissionen und Energieverbrauch

Der Endenergieverbrauch aller betrachteten Prozesse liegt bei 444,892 PJ/a (Stromverbrauch = 78,248 PJ/a und Verbrauch an Brennstoff und Dampf = 371,971 PJ/a) und der TPEU bei 561,071 PJ/a. Der Strom- und Wärmeverbrauch der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007 wird in Abbildung 3-3 für jeden Prozess gesondert graphisch dargestellt.

Abbildung 3-3: Strom- und Wärmeverbrauch der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Der Energieverbrauch für alle Prozesse der Grundstoffchemie wird mit Hilfe eines Zuschlagfaktors ermittelt, der aus den Ergebnissen der Studie von Saygın, Patel und Marscheider-Weidemann berechnet wird (2008). Die Autoren haben für Deutschland ausgerechnet, dass die 16 in der laufenden Studie untersuchten Prozesse ca. 83 % des Stroms und ca. 87 % des Dampfes und der Brennstoffe für sich beanspruchen. Der Energieverbrauch der nicht untersuchten Prozesse wird aus der Asymptote graphisch bestimmt. Für die Prozesse der gesamten Grundstoffchemie kommt man dann auf einen Stromverbrauch von 94,275 PJ/a und einen Wärmeverbrauch (Brennstoff und Dampf) von 427,553 PJ/a. Der Gesamtendenergieverbrauch beträgt dann 521,828 PJ/a und der primäre Endenergieverbrauch (TPEU) 659,187 PJ/a.

Der ermittelte Energieverbrauch für die ausgewählten Prozesse bzw. für alle Prozesse der Grundstoffchemie wird mit dem Gesamtenergieverbrauch der Grundstoffchemie nach der Top-down-Analyse verglichen. Der Stromverbrauch für die ausgewählten Prozesse liegt 2007 bei 78,248 PJ und für alle Prozesse der Grundstoffchemie bei 94,275, während er nach der Top-down-Analyse 162,097 PJ beträgt. Die Differenz ist dann gleich -83,849 PJ bzw. -67,822 PJ (Tabelle 3-32).

Tabelle 3-32: Vergleich der Bottom-up- mit der Top-down-Analyse für 2007

	Bottom-up-Analyse	**Top-down-Analyse (AGEB 2007; Statistisches Bundesamt 2009b)**	**Differenz zwischen Bottom-up und Top-down-Analyse (Wert Bottom-up-/Wert Top-down-Analyse in %)**
Strom für die ausgewählten Prozesse (PJ)	78,248	162,097	- 83,849 (48,27 %)
Brennstoff und Dampf, inkl. Fernwärme für die ausgewählten Prozesse (PJ)	371,971	298,01	73,961 (124,62 %)
Strom für alle Prozesse der Grundstoffchemie (PJ)	94,275	162,097	- 67,822 (58,16 %)
Brennstoff und Dampf, inkl. Fernwärme für alle Prozesse der Grundstoffchemie (PJ)	427,553	298,01	129,54 (143,47 %)

Der Stromverbrauch aller Prozesse nach der Bottom-up-Analyse liegt bei 58,16 % der Top-down-Analyse. Diese kommt hauptsächlich durch den Stromverbrauch der Nebenanlagen zustande, die in der Bottom-up-Analyse nicht berücksichtigt werden. Die Nebenanlagen in der chemischen Industrie sind die Anlagen für Kühl- und Prozesswasserverteilung, Abwasserreinigung, Abfallverbrennung, Druckluft sowie die Umwelt- und Sicherheitseinrichtungen, die Straßen- und Gebäudebeleuchtung, die Beheizung von Tanks, die Werkskantine usw. Teilweise wird die Kälte zentral erzeugt und gehört

damit zu den Nebenanlagen (Querschnittstechnologien). Eine Abschätzung des Stromverbrauchs in den Nebenanlagen erfolgt im Folgenden exemplarisch:

- Die Druckluftanlagen verbrauchen in der Grundstoffchemie ca. 4 % des Stromes, oder ca. 6,5 PJ (vgl. Fraunhofer ISI/Enerdata/TU Vienna/Wuppertal Inst. 2009, S. 215; www.druckluft-energieeffizienz.de/page/index.php?9470, abgelesen am 17.9.2010).
- Die zentrale Kälteerzeugung verbraucht in der Grundstoffchemie ebenfalls ca. 4 % des Stromes oder ca. 6,5 PJ (vgl. Fraunhofer ISI/Enerdata/TU Vienna/Wuppertal Inst. 2009, S. 215). Dabei sind große Energieeinsparpotenziale bei Kältesystemen vorhanden (vgl. Österreichische Energieagentur 2007b; S. 4).
- In den Nebenanlagen werden zahlreiche Pumpen eingesetzt, wie z. B. zur in den betriebseigenen Kraftwerken, in den Abwasserreinigungsanlagen, zur Förderung von Kühlwasser usw. Diese verbrauchen einen wichtigen Teil der elektrischen Energie.

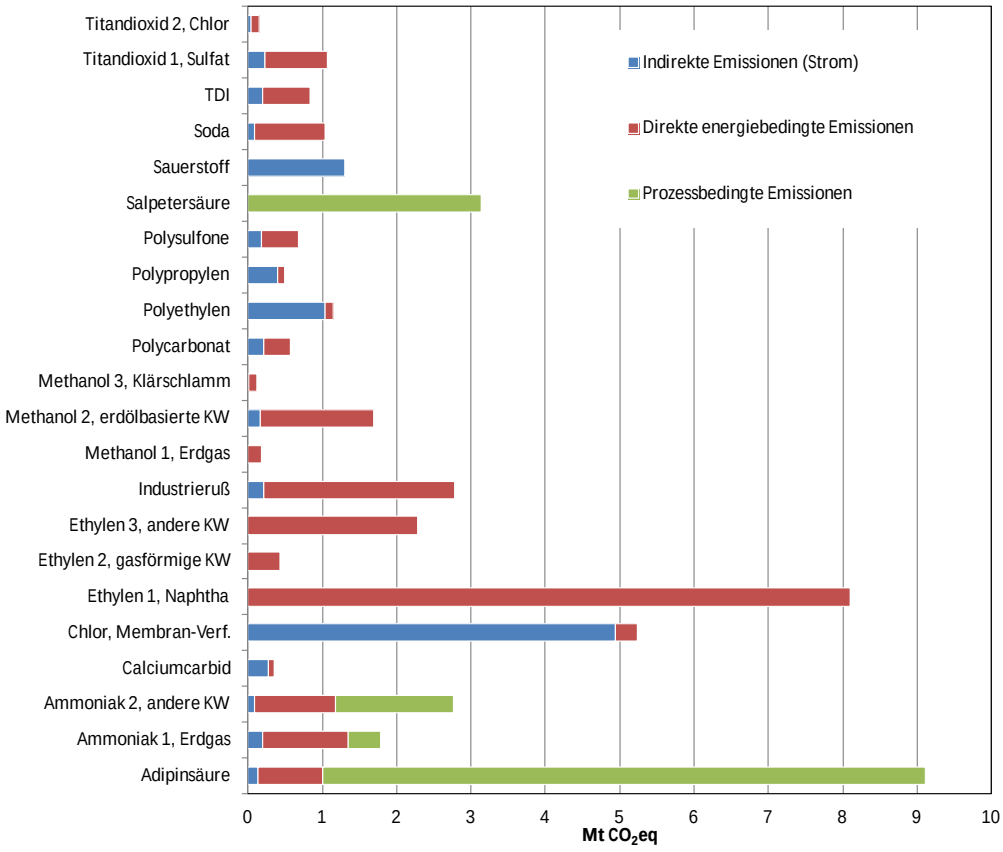
Der Verbrauch an Brennstoffen und Dampf aller Prozesse nach der Bottom-up-Analyse liegt bei 143,47 % der Top-down-Analyse (vgl. Tabelle 3-32). Zu ähnlich großen Abweichungen kommen auch Saygın, Patel und Marscheider-Weidemann (2008, S. 95). Diese Abweichung lässt sich auf unterschiedliche Gründe zurückführen:

- Es werden in den Datenquellen unterschiedliche Systemgrenzen für den energetischen und nicht-energetischen Verbrauch bei den beiden Betrachtungsweisen verwendet. Auf diese Problematik haben bereits Weis, Neelis und Patel hingewiesen (2006, S. 1).
- Unterschiedliche Abgrenzungen für Prozesse der Grundstoffchemie wurden für die Ermittlung des Energieverbrauchs verwendet.
- In Deutschland ist eine starke Standortwärmeintegration vorhanden. Dies gilt vor allem für die großen Standorte, wo ein Großteil der Grundstoffchemie angesiedelt ist. Nach VCI-Angaben wäre der Energieverbrauch an einem der großen, stark integrierten Standorten ohne die Standortintegration um 60 % höher (VCI 2008b, S. 7).
- Viele der verwendeten Daten zum Energieverbrauch der Prozesse sind nicht mehr ganz aktuell. Durch die Modernisierungsmaßnahmen in der chemischen Industrie kann man annehmen, dass der Energieverbrauch bei vielen Prozessen in den letzten Jahren zurückgegangen ist. Genaue Statistiken des heutigen Energieverbrauchs sind nicht erhältlich.
- Einige Chemieprodukte werden in Raffinerien gewonnen und daher statistisch dem Raffineriewesen zugeordnet, wie z. B. Teile der Aromaten (ca. 20 % des Benzols), Teile des Propylens (ca. 30 %) und Teile des Methanols.
- Weitere Chemieprodukte werden bei der Kohleverkokung aus dem Kohleteer gewonnen, wie z. B. Teile des Benzols und des Phenols.

· Die Erfassung des Sektorenenergieverbrauchs erfolgt nach Wirtschaftzweigen. Dieser kann von der Summe des Energieverbrauchs der Prozesse abweichen. Als Beispiel sei hier der Stromverbrauch für die Chlor-Herstellung erwähnt, der eventuell bei nachfolgenden Produkten, wie PVC, deklariert ist.

Der ermittelte Energieverbrauch wird in CO_2-Äquivalante umgerechnet. Die Treibhausgasemissionen aus den direkten und indirekten Emissionen im Jahr 2007 werden für die ausgewählten Prozesse in Abbildung 3-4 für jeden Prozess gesondert graphisch dargestellt.

Abbildung 3-4: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die CO_2-Emissionen der ausgewählten Prozesse betragen für das Basisjahr 2007 bei Strom 13,91 Mt und bei Brennstoff und Dampf 21,99 Mt. Zusammen mit dem Prozess-CO_2 und den CO_2-Äquivalenten für die THG-Emissionen liegen die Gesamt-CO_2-Emissionen bei 46,68 Mt (siehe Tabelle 3-34).

Tabelle 3-33: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO_2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Adipinsäure	0,78	14,63	8,10	0,14	0,87
Ammoniak 1, Erdgas	1,07	19,44	0,43	0,19	1,16
Ammoniak 2, andere KW	0,53	18,16	1,58	0,09	1,08
Calciumcarbid	1,58	1,16	0,00	0,28	0,07
Chlor, Membran-Verf.	27,59	5,08	0,00	4,94	0,30
Ethylen 1, Naphtha	0,00	135,72	0,00	0,00	8,10
Ethylen 2, gasförmige KW	0,00	7,14	0,00	0,00	0,43
Ethylen 3, andere KW	0,00	38,33	0,00	0,00	2,29
Industrieruß	1,18	43,04	0,00	0,21	2,57
Methanol 1, Erdgas	0,00	3,10	0,00	0,00	0,18
Methanol 2, erdölbasierte KW	0,96	25,45	0,00	0,17	1,52
Methanol 3, Klärschlamm	0,02	1,89	0,00	0,00	0,11
Polycarbonat	1,21	5,85	0,00	0,22	0,35
Polyethylen	5,81	1,82	0,00	1,04	0,11
Polypropylen	2,21	1,53	0,00	0,40	0,09
Polysulfone	1,04	8,34	0,00	0,19	0,50
Salpetersäure	0,01	-0,40	3,14	0,00	-0,02
Sauerstoff	7,31	0,00	0,00	1,31	0,00
Soda	0,47	16,04	0,00	0,08	0,96
TDI	1,10	10,68	0,00	0,20	0,64
Titandioxid 1, Sulfat	1,28	13,95	0,00	0,23	0,83
Titandioxid 2, Chlor	0,26	1,80	0,00	0,05	0,11

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 3-34: CO_2-Äquivalente der ausgewählten Prozesse für der Basisjahr 2007

Quelle der CO_2-Emissionen	**CO_2-Äquivalante (Mt)**
Direkte prozessbedingte Emissionen	13,3
Strom (indirekte Emissionen)	14,0
Dampf und Brennstoff (direkte Emissionen)	22,3
Summe	49,5

Frühere Studien sind zu vergleichbaren Ergebnissen gekommen. In McKinsey 2006 werden für die gesamten Emissionen aus der chemischen Industrie 62 Mt CO_2-Äquivalente für das Jahr 2004 angegeben. Davon sind 42 Mt CO_2-Äquivalente der direkten und indirekten Emissionen, die aus der Nutzung von Energie resultieren. Der größte Anteil an den Prozessemissionen hatte nach der Studie von McKinsey das N_2O mit 39 %. Diese waren im Jahr 2007 wesentlich geringer. Weitere 15 % der Emissionen stammen nach der genannten Studie als Prozess-CO_2 aus der Ammoniak-Synthese (McKinsey 2006, S. 57).

3.2.5 Energierelevante Anlagenkomponenten

3.2.5.1 Einführung

Obwohl die Prozesse für die Herstellung der chemischen Grundstoffe sehr unterschiedlich und komplex sind, basieren sie auf der Kombination von einigen wenigen naturwissenschaftlichen und technischen Grundprinzipien, Apparaten und Maschinen usw. Diese werden sowohl in den Prozessen als auch in den Nebenanlagen verwendet. Die Behandlung dieser Prinzipien soll zum Verständnis der Einsparpotenziale im Zusammenhang mit den untersuchten Prozessen beitragen.

Ein Teil der genannten Prinzipien gehört streng genommen zu den Querschnittstechnologien, die auch in anderen Branchen eingesetzt werden. Im Folgenden werden nur die chemiespezifischen Aspekte untersucht.

Für die betrachteten Anlagenkomponenten und Verfahrensstufen wird der Stand der Technik besprochen. Von den vielen möglichen Apparaten und Maschinen werden nur diejenigen herangezogen, die am meisten zur Energieeffizienz beitragen können.

3.2.5.2 Reaktoren

Der Reaktor bildet das Herzstück jedes chemischen Prozesses. Er besitzt das größte Potenzial für Ressourceneinsparungen. Verschiedene Parameter können modifiziert werden, um das Energieoptimum zu erreichen:

1. Reaktortyp: Bestimmte Reaktortypen sind energieeffizienter als andere. Als Beispiel sei hier der Flugstrom- und der Wirbelstromreaktor genannt.
2. Konstruktive Gestaltung von Reaktoren: Reaktoren können konstruktiv so gestaltet werden, dass die Energieeffizienz gesteigert wird. Dazu gehören Maßnahmen für einen besseren Stoff- und Wärmeaustausch.
3. Katalysatoren: Das größte Potenzial steckt in den Katalysatoren. Die Katalysatorforschung hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz können beispielsweise sein:
   - Einsatz von homogenen Katalysatoren,
   - Einsatz von Katalysatoren mit besserer Aktivität und Selektivität und
   - Einsatz von Katalysatoren mit einer höheren Lebensdauer, sodass An- und Abfahroperationen minimiert werden.
4. Energierelevante Reaktionsparameter: Temperatur- und Druckverlauf sowie die Zusammensetzung der Einsatzstoffe können die Ressourceneffizienz wesentlich beeinflussen. Sie werden zum Erreichen einer höheren Energieeffizienz durch Simulation oder mit Hilfe von Experimenten optimiert.

3.2.5.3 Stofftrennapparate

Neben den Reaktoren stellen die Stofftrennapparate die zweitwichtigste Gruppe von Anlagenkomponenten zur Beeinflussung der Energieeffizienz dar. Dabei sind folgende Parameter von Bedeutung:

- Auswahl der Stofftrennapparate: Die Rektifikation ist die am meisten eingesetzte Grundoperation für die Trennung von Stoffen in der chemischen Grundstoffindustrie. Sie gilt aber als energieintensiv wegen der Aufheizung des zu trennenden Gemisches mit anschließender Kondensation der einzelnen Bestandteile. Für bestimmte Gemische kann man alternative Trennprozesse, wie z. B. Extraktion, Reaktivdestillation, Membrantrennprozesse, Trennwandkolonnen, chromatographische Verfahren usw. einsetzen. Man muss von Fall zu Fall prüfen, welcher der Trennprozesse bei definierter Qualität des Produktes verwendet werden kann.
- Energieeffiziente Auslegung: Die Prinzipien der energieeffizienten Auslegung hängen von dem Stofftrennapparat ab. Bei der Rektifikation können es die Auswahl des Kolonnentyps, die Optimierung des Abstands zwischen den Böden bei Bodenkolonnen, die Auswahl der optimalen Füllkörper bei Füllkörperkolonnen, die Optimierung des Kondensators und des Verdampfers usw. sein.

3.2.5.4 Stoffförderung und Antriebe

In großen Chemieanlagen werden regelmäßig zahlreiche Pumpen für die Flüssigkeitsförderung eingesetzt. Bei Hochdrucksynthesen, die typisch für viele Prozesse der Grundstoffchemie sind, verbrauchen Kompressoren den größten Teil der elektrischen Energie. Energieeffizienz kann bei der Stoffförderung auf zwei Ebenen angegangen werden: Ebene der Antriebmaschinen und Ebene der Stoffördermaschinen.

Drehzahlgeregelte Pumpen und Kompressoren und der Einsatz hocheffizienter Elektromotoren stellen heute den Stand der Technik dar und sind energieeffizienter als die klassischen Antriebe. Außerdem kann man bei Kompressoren Dampfturbinen bzw. Gasturbinen für den Antrieb einsetzen. Bei großen Durchsätzen und hohen Drücken sind sie den elektrischen Antrieben wirtschaftlich überlegen. Je nach Betrieb kann bis zu 50 % der Energie eingespart werden (vgl. Österreichische Energieagentur 2007a, S. 5). Die Auswahl der Antriebe muss individuell entschieden werden. Bei großen Antrieben kann sich auch die Rückgewinnung der Wärme lohnen. Bei kleineren oder gelegentlich laufenden Pumpen und Kompressoren sind drehzahlgeregelte Antriebe nicht unbedingt wirtschaftlich (Weiteres hierzu siehe z. B. Allplan 2005). Diese Technologie wird bei großen Pumpen eingesetzt, wenn sie oft bei geringer Auslastung gefahren werden müssen. Ihr Einsatz ist in der chemischen Industrie noch immer begrenzt.

Auch die Antriebe für Rührer, Ventilatoren usw. sind bedeutende Energieverbraucher und sollten daher optimiert werden. Für die Auswahl der Antriebe muss eine Lebenszyklus-Rechnung durchgeführt werden. Es ist bekannt, dass bei Zugrundelegung der heutigen Energiepreise die Energiekosten fast 90 % der Lebenszykluskosten ausmachen (ACHEMA 2009). Daher würde es sich in vielen Fällen lohnen, bei Nachrüstungen die Antriebe zu modernisieren (Weiteres hierzu siehe z. B. IPTS 2008; Neelis, Worrell, Masanet 2008, S. 65).

Auch Stoffördermaschinen können so optimiert werden, dass sie zur Energieeffizienz wesentlich beitragen (zu Pumpen siehe Österreichische Energieagentur o.J. a; Neelis, Worrell, Masanet 2008, S. 70 und zu Ventilatoren Österreichische Energieagentur o.J. b). Auch Kompressoren wurden in den letzten Jahrzehnten regelmäßig optimiert und erreichen heute hohe Wirkungsgrade. Großes Energieeinsparpotenzial besteht vor allem bei der Druckluft (siehe hierzu Österreichische Energieagentur 2007c; Kreisel, Jochem 1996). Der Energieverbrauch bei Pumpen kann durch Auswahl des geeigneten Pumpentyps und durch konstruktive Gestaltung optimiert werden.

3.2.5.5 Stoffheizung und -kühlung

Das Aufheizen und das Abkühlen von Stoffströmen ist einer der größten Wärme- bzw. Kühlwasserverbraucher in der chemischen Industrie. Potenzial ist hier durch die Verwendung von energieeffizienten Wärmetauschern, durch ihre Reinigung usw. vorhanden (Weiteres hierzu siehe z. B. IPTS 2008). Die Reinigung von Wärmetauschern in definierten Abständen führt zur Reduktion des Energieverbrauchs. Man muss aber berücksichtigen, dass man dabei eventuell die gesamte Anlage abschalten muss. Auch die Verwendung von fouling-resistenten Werkstoffen kann zur Senkung des Energieverbrauchs beitragen.

Die Dampfnetze sind eine weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung. Bestehende Dampfnetze sollten auf Anzahl und Niveau der Druckstufen überprüft werden.

3.2.5.6 Wärmedämmung

Energieeffiziente Wärmedämmung kann die Wärme- und Kälteverluste wesentlich reduzieren. Wärme- und Kältedämmung wurde in der chemischen Industrie sehr früh angewandt. Die Auswahl der Dämmstoffe und die Berechnung einer wirtschaftlichen Dämmstärke wurden dabei angegangen. Beide Parameter sind stark vom Energiepreis abhängig (siehe VDI 2055, Blatt 1, Stand September 2008). Die Gesamtkosten werden aus den kapitalabhängigen Kosten für die Dämmstoffe und den Kosten für die Energieverluste errechnet. Die BASF gibt beispielsweise am Standort Ludwigshafen jährlich 30 Mio. € für die Verbesserung der Wärmedämmung aus (Langner 2009).

3.2.5.7 Prozessleittechnik

In der modernen Prozessleittechnik stecken ungeahnte Potenziale für die Ressourceneffizienz. Chemieanlagen können dann an genau definierten Betriebspunkten gefahren werden. Moderne Prozessleitsysteme ermöglichen außerdem eine Aufnahme der Energieverbräuche und ihr Monitoring. Dadurch wird eine höhere Transparenz erreicht. Dies ist durch die moderne Sensortechnik sowie die Datenübertragung und -verarbeitung möglich geworden. Eine weitere Möglichkeit moderner Prozessleittechnik ist die Online-Messung des Energieverbrauchs auf der Ebene der einzelnen Aggregate.

Neu zu errichtende Chemieanlagen werden in der Regel mit moderner Prozessleittechnik ausgestattet. Auch ist es oft möglich, bestehende Anlagen im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen mit einer effizienteren Prozessleittechnik auszustatten. Dies ist der Fall bei vielen älteren Anlagen in Deutschland, wie z. B. Steam-Crackern. Allerdings muss man jedes Mal die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen und die technischen Hemmnisse überprüfen (vgl. beispielsweise White 2009).

3.2.6 Prozesssynthese in der Grundstoffchemie

Die Wärmeintegration und die Wärmerückgewinnung wurden bereits nach der ersten Erdölkrise für Großsynthesen angegangen. Mit Hilfe der Pinch-Methode konnte mit relativ geringem Aufwand eine Wärmeintegrationsanalyse mit dem Ziel der Bildung von Wärmetauschernetzwerken durchgeführt werden. Heute ist die Wärmeintegration Stand der Technik.

Zur Wärmerückgewinnung können verschiedene Techniken eingesetzt werden, wie z. B. Wärmepumpen, Brüdendampfverdichtung und Absorptionskältemaschinen. Ein spezieller Fall dabei ist die Vorwärmung der Einsatzströme durch Produktströme.

In den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts fing man in der Praxis an, die Synthese von Stofftrennapparaten zu realisieren. Dadurch konnte man ebenfalls den Energieverbrauch bei Chemieanlagen mit Mehrkomponentengemischen reduzieren. Diese Technologie ist inzwischen ebenfalls Stand der Technik.

Folgende Maßnahmen der Wärmeintegration tragen zur Steigerung der Energieeffizienz bei:

- Aufwärmen von Rohstoffströmen und Luft, wenn eine hohe Temperatur in der Prozesseinheit gefordert wird,
- Vermeidung von Druckreduktion, ohne die Energie der Dampfentspannung zu nutzen,
- Verwendung überschüssiger Wärme möglichst am Standort,

- Erzeugung von Strom aus Dampf nur, wenn keine thermische Verwendung für den Dampf am Standort vorhanden ist.

3.2.7 Verwendung von Prozess-Kohlendioxid

Neben dem Anfall von CO_2 bei der Erzeugung von Strom und Dampf sowie beim Verbrennen von Brennstoffen für Heizzwecke fallen in einigen Prozessen nicht geringe Mengen an Prozess-CO_2 an. Ein Beispiel hierzu ist die Herstellung von Synthesegas und die Herstellung von Soda. Bei der Synthesegas-Herstellung entsteht CO_2 durch die Konvertierung von CO. Bei integrierten Harnstoffanlagen wird der größte Teil des CO_2 verbraucht. Kleinere Mengen des überschüssigen CO_2 werden gereinigt und in der Getränkeindustrie verwendet (vgl. Kapitel 3.2.2.3). Bei der Soda-Herstellung wird das CO_2 zum größten Teil im Prozess wieder verwendet, vor allem wenn Natriumbicarbonat produziert wird (vgl. Kapitel 3.2.2.3).

Die Reduktion des Prozess-CO_2 bzw. seine Wiederverwendung ist eine Möglichkeit zur Reduktion von THG-Emissionen. Im Folgenden werden einige Möglichkeiten hierzu vorgestellt:

- Trockenes Reforming zur Herstellung von Methanol (siehe z. B. Olah, Geoppert, Prakash 2006): Dieser Prozess setzt CO_2 mit Methan um und wäre nur dann sinnvoll, wenn Wärme aus regenerativen Quellen preiswert zur Verfügung stünde. Eine Alternative wäre die Umsetzung von CO_2 mit H_2 ebenfalls aus regenerativen Quellen. Würde man H_2 aus fossilen Stoffen einsetzen, wäre der Prozess durch das entstehende CO_2 belastet. Damit ist diese Technologie praktisch noch nicht verfügbar.
- Herstellung von Chemikalien: Es ist theoretisch möglich, auch weitere Chemikalien auf Basis von CO_2 herzustellen. Dazu gehören verschiedene Produkte der C_1-Chemie sowie Polycarbonate. Auch kann die Verwendung von CO_2 als Lösemittel intensiviert werden. Allerdings sind die erforderlichen Mengen an CO_2 relativ begrenzt.
- Algenzüchtung und künstliche Photosynthese: Ziel ist die Herstellung von Biomasse. Die Algenzüchtung hat in den letzten Jahre große Fortschritte gemacht und wird in Deutschland intensiv durch den Staat gefördert. Jedoch ist der Wirkungsgrad noch sehr gering und die Kosten sehr hoch. Es ist noch nicht absehbar, wann diese Technologie zum Durchbruch kommt. Voraussetzungen dafür wären ein wesentlich höherer Wirkungsgrad und niedrigere Kosten. Ähnliches gilt für die künstliche Photosynthese, die in einem noch früheren Stadium als die Algenzüchtung ist.

Die oben dargestellte Sichtweise gilt nicht für potenzielle Innovationsleistungen auf dem Gebiet der Synthesen mit CO_2 als Reaktionspartner und auch nicht für die möglichen Potenziale bei neuen Produkten, die heute noch fern erscheinen (Ausfelder,

Bazzanella 2008, S. 16). Ein Positionspapier hierzu wurde durch die DECHEMA und den VCI erstellt (VCI/DECHEMA 2009).

Die Abscheidung und Speicherung von CO_2 (CCS) ist eine weitere Möglichkeit zur Reduktion des Prozess-CO_2. CCS eignet sich besonders gut für das Prozess-CO_2 aus der Synthesegas-Herstellung, da CO_2 in relativ reiner Form anfällt. Die Mengen sind aber sehr klein (siehe Kapitel 3.2.1.2). Außerdem ist diese Technologie noch in einem frühen Stadium der Entwicklung. Der Energieaufwand für die Abscheidung und Speicherung ist noch sehr hoch. Es ist auch umstritten, inwieweit sie jemals effektiv eingesetzt werden kann (siehe beispielsweise Ausfelder, Bazzanella 2008).

3.3 Analyse der Einsparoptionen

3.3.1 Einführung

Die in Kapitel 3.1.2 dargestellten Prozesse werden in diesem Kapitel auf technische und wirtschaftliche Einsparoptionen und -potenziale untersucht. In einem ersten Schritt wird die zukünftige Produktion in Deutschland bis 2035 abgeschätzt. Eine mögliche Prozess- bzw. Rohstoffsubstitution wird dabei untersucht. In einem zweiten Schritt wird die BVT ermittelt. Dann werden die Energieeinsparpotenziale sowie die Verringerung der THG-Emissionen bestimmt. Anschließend werden die produkt- und prozessspezifischen Hemmnisse diskutiert.

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Die Entwicklung der Produktion bis 2035 wird in Schritten von jeweils fünf Jahren abgeschätzt. Zunächst wird der Bedarf aus Daten der letzten Jahre extrapoliert. Basierend auf vorhandenen Untersuchungen bzw. Analyse der Anwendungen und ihrer zukünftigen Entwicklung wird dann eine Aussage über die Entwicklung des Bedarfs gemacht. Dabei wird eine mögliche Produktsubstitution berücksichtigt. Zur Ermittlung der Produktionsentwicklung muss außerdem die Entwicklung der Importe und Exporte mit einbezogen werden. Diese wird zur Korrektur der extrapolierten Werte verwendet. Die genannte Abschätzung muss als eine grobe Aussage verstanden werden. Sie berücksichtigt keine heute unbekannten möglichen Anwendungen des Produktes oder noch unbekannte Substitutionsmöglichkeiten. Auch ist es kaum möglich, eine Aussage über die Entwicklung des internationalen Handels mit seinen Konsequenzen für die Produktionsentwicklung zu machen. Diese Vereinfachungen und der lange Zeithorizont von 25 Jahren führen zu großen Unsicherheiten bei der Schätzung (siehe hierzu Kapitel 3.4.1).

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Die Prozesssubstitution gilt in der Regel für neue Anlagen und nur in Ausnahmefällen für bestehende Anlagen. Dagegen kann die Rohstoffsubstitution in einigen speziellen Fällen auch für bestehende Anlagen angewandt werden. Mögliche alternative Prozesse werden kurz beschrieben, auch wenn sie noch nicht wirtschaftlich sinnvoll erscheinen.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale:

Das technische Einsparpotenzial gibt an, welche Effizienzsteigerung möglich wäre, wenn wirtschaftliche Überlegungen völlig außer Acht gelassen würden (siehe Kapitel 1 und IPTS 2006). Die BVT wird in der Fachliteratur oft im Zusammenhang mit der Reduktion von Emissionen diskutiert. In dieser Untersuchung wird nur die BVT besprochen, die für die Steigerung der Energieeffizienz relevant ist (vgl. IPPC 2008, S. 271ff). Sie muss außerdem wirtschaftlich sinnvoll sein. Dabei berücksichtigt die BVT standortspezifische, geographische, ökologische und technische Bedingungen.

Aufbauend auf der BVT werden die wirtschaftlichen Einsparpotenziale ermittelt. Sie werden sowohl im Zusammenhang mit neuen Anlagen als auch mit Modernisierungen und Modifikationen bestehender Anlagen besprochen. Energieeinsparungen sind auf verschiedenen Ebenen wie folgt möglich:

1) Produktsubstitution

Die Produktsubstitution kann in Betracht gezogen werden, wenn das Ersatzprodukt bei geringerem Energieverbrauch bzw. geringeren THG-Emissionen die gleiche Funktion wie das ursprüngliche erfüllen kann.

2) Steigerung der Energieeffizienz durch Errichtung einer neuen Anlage

In diesem Fall wird ein modernisierter Prozess oder eine neue Syntheseroute verwendet, eventuell mit anderen Rohstoffen oder anderen Energien. Denkbar ist dabei der Einsatz von Biomasse und erneuerbaren Energien. Ein klassischer Prozess kann eventuell stark modifiziert werden, um eine höhere Ressourceneffizienz zu erzielen. In diesem Zusammenhang ist die Prozessintensivierung zu nennen, die zur Erhöhung der Energieeffizienz beitragen kann.

Um die „Economies of Scale“ (Skaleneffekt) auszunutzen, wird die neue Anlage oft mit einer größeren Kapazität errichtet. Die Stilllegung älterer Anlagen und Bündelung der Produktion in einer neuen Anlage mit World-Scale-Format führt in vielen Fällen zu einer Steigerung der Energieeffizienz.

Der Kapitalbedarf ist am höchsten bei der Errichtung von neuen Anlagen, aber auch die Einsparpotenziale sind am größten. Neue Anlagen werden relativ selten errichtet. Dies gilt vor allem für die klassischen Industrieländer.

Die Substitution von Rohstoffen und Energieträgern kann sowohl bei der Modifikation eines bestehenden Prozesses als auch bei der Einführung eines neuen Prozesses erfolgen. Beispiele dafür sind die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen oder Erdgas. Dadurch können die CO_2-Emissionen reduziert werden. Die Verwendung von Biomasse als Rohstoff führt zu einer günstigeren CO_2-Bilanz, da ein Teil des Kohlenstoffs in dem Produkt verbleibt.

3) Steigerung der Energieeffizienz durch signifikante Veränderungen der bestehenden Anlage

Dazu gehören alle größeren Umbauten und konstruktiven Maßnahmen, die unter den Bezeichnungen „retrofits“ und „revamps“ bekannt sind. Sie werden in dieser Untersuchung auch als Modernisierungsmaßnahmen bezeichnet.

Das können kleinere Änderungen an Apparaten und Maschinen sein, wie z. B. eine Substitution von Pumpen und Kompressoren oder die Verwendung neuer oder verbesserter Katalysatoren. Es können aber auch größere Umbauten, wie z. B. der Ersatz von ganzen Prozessstufen, der Austausch eines Reaktors, eines Trennapparates, die Prozesswärmeintegration oder apparatetechnische Verbesserungen, sein. Regelmäßig werden modernere Prozessleitsysteme eingeführt. Auch die Substitution von Energieträgern und die Standortwärmeintegration gehören dazu.

Die Umbauten werden im Rahmen von regelmäßigen Revisionen (Maintenance Shutdowns) vorgenommen. Das Ziel solcher Maßnahmen ist nur in seltenen Fällen eine Steigerung der Energieeffizienz. Oft stecken andere wirtschaftliche Motive, wie z. B. Kapazitätserweiterungen durch Debottlenecking und Beseitigung von technischen Engpässen, Ressourceneffizienz, Qualitätsverbesserung, Erfüllung von neueren Sicherheits- und Umweltvorschriften usw. dahinter.

Der Kapitalbedarf ist abhängig von der geplanten Maßnahme. Er kann bei der Substitution von ganzen Prozessstufen relativ hoch sein. Das Energieeinsparpotenzial entspricht dann dem Umfang der Umbaumaßnahme, hängt aber stark von ihrem Ziel ab. Solche Maßnahmen werden in Deutschland regelmäßig durchgeführt.

4) Steigerung der Energieeffizienz im Rahmen der bestehenden Anlage ohne wesentliche Umbauten

Mögliche Maßnahmen sind dabei:

- operative Änderungen: z. B. Fahren einer Chemieanlage oder einer Rektifizierkolonne am Energieoptimum,
- „good housekeeping“,
- energieeffiziente Instandhaltung: z. B. die energieoptimale Reinigung von Wärmetauschern usw.

Der Kapitalbedarf ist bei diesen Maßnahmen gering, aber auch die Einsparpotenziale. Diese Maßnahmen werden häufiger eingesetzt. Sie stellen die einfachsten Maßnahmen dar, um Energie einzusparen.

Um die wirtschaftlichen Einsparpotenziale unter 2) und 3) zu identifizieren, benötigt man folgende Daten: Investitions- und Betriebskosten, reale Lebensdauer der neuen Anlage bzw. der neuen Prozessstufe und den Energieverbrauch. Diese werden eingesetzt, um die Kosten der Einsparpotenziale, bestehend aus kapitalabhängigen und Betriebskosten zu ermitteln. Die Kosten werden dann mit den Kosten vor Einführung der neuen Anlagen bzw. der Maßnahme verglichen, wobei die Einsparung an Energie in die Rechnung eingeht. Bewertungskennziffern für die Investition, wie Rentabilität und Amortisationszeit, werden dann berechnet. Vom ökologischen Standpunkt aus muss der Ressourcenverbrauch für die Errichtung der neuen Anlage bzw. für die Umrüstung in den Vergleich mit einbezogen werden.

Die reale Lebensdauer einer Anlage bzw. einer Prozessstufe ist sehr schwer zu schätzen, da sie von vielen Unsicherheitsfaktoren abhängig ist, wie beispielsweise von der zukünftigen Entwicklung des Absatzes. Eine Entscheidung für den Bau einer Ersatzanlage kann eventuell negativ ausfallen bzw. verschoben werden, obwohl eine monetäre Wirtschaftlichkeitsrechnung dafür spricht. Diese vergleicht die Herstellkosten der bestehenden und denen der neuen Anlage. Während bei der bestehenden Anlage die Material- und Energiekosten sowie die Instandhaltungskosten höher liegen, müssen bei einer neuen Anlage die kapitalabhängigen Kosten in der Rechnung berücksichtigt werden.

Wie oben erwähnt, stellt die Verfügbarkeit der Kostendaten ein großes Problem dar. Dies hängt damit zusammen, dass Kostendaten oft vertraulich behandelt werden. Bei neueren Energieeinsparmaßnahmen kommt dazu, dass man in vielen Fällen auf ungenaue Schätzungen angewiesen ist, wenn die Technologie noch nicht realisiert wurde.

Eine Möglichkeit dennoch einigermaßen realistische Werte zu erhalten, ist die Abschätzung von Kosten über typische Amortisationszeiten. Die spezifischen Investitionskosten können unter Zugrundelegung der Energieeinsparung aus der typischen Amortisationszeit unter Annahme eines Energiepreisens ausgerechnet werden (Methode der „Anlegbaren Investitionskosten“). Auch die Information, ob Einsparoptionen wirtschaftlich sind oder (derzeit noch) unwirtschaftlich, kann eventuell ermittelt werden und gibt Aufschluss über die Höhe der Kosten.

Im Falle der Verfügbarkeit von Kostendaten, z. B. von Anlagenbauunternehmen, sind diese in der Regel pauschal und berücksichtigen keineswegs die Rahmenbedingungen des Prozesses und des Standortes. Dabei ist jede Chemieanlage ein Unikat. Zudem sind meistens Einzelheiten weder der bestehenden Anlagen noch der Standorte bekannt. In diesem Fall muss man mit vereinfachenden Annahmen und Durchschnittswerten arbeiten.

Die geplante Einführung des Emissionshandels für die chemische Industrie der EU wird dazu führen, die THG-Emissionen unter einem anderen Blickwinkel zu betrachten und ihre Reduktion in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einzubeziehen. Dies gilt vor allem für die Adipinsäure- und Salpetersäureherstellung, bei denen N_2O emittiert wird.

Bei der Untersuchung der Einsparpotenziale werden sowohl vorhandene als auch Zukunftstechnologien besprochen. Die letzteren müssen mindestens in der Phase der Diffusion sein. Damit ist eine größere Wahrscheinlichkeit für die Markteinführung vorhanden. Für Maßnahmen, die sich noch in der Phase der Forschung und Entwicklung befinden, sind nicht genug Daten vorhanden, um eine einigermaßen zuverlässige Aussage über die Erfolgswahrscheinlichkeit und die Kosten zu machen.

Anschließend werden drei Szenarien für die Diffusion der Einsparpotenziale untersucht: Marktdiffusion, wirtschaftliche Diffusion und technische Diffusion (zur Definition der Begriffe siehe Kapitel 1).

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Produktspezifische Hemmnisse stehen der Diffusion von Energieeinsparmaßnahmen aufgrund von Absatzunsicherheiten des Produktes entgegen. Dazu gehören die Aufnahmefähigkeit des Marktes, die Konkurrenzsituation, aber auch die negative Beeinflussung der Eigenschaften des Produktes durch Energieeinsparmaßnahmen.

Prozessspezifische Hemmnisse berücksichtigen dagegen die Eigenschaften des Prozesses, wie beispielsweise die technischen Grenzen für die Einführung von Energieeinsparmaßnahmen bei bestehenden Anlagen.

Die Hemmnisse bei der Diffusion der Energieeinsparmaßnahmen werden sowohl für die Errichtung neuer Anlagen als auch für die Modernisierung bestehender Anlagen untersucht. Branchenspezifische Hemmnisse, die für alle Prozesse gelten, werden in Kapitel 3.5 besprochen.

3.3.2 Einsparpotenziale bei den organischen Prozessen

3.3.2.1 Adipinsäure

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Nylon 6.6 ist mit 80 % der Weltproduktion an Adipinsäure das Hauptfolgeprodukt und wird hauptsächlich im Fasersektor eingesetzt. Es steht zwar in Konkurrenz zu verschiedenen natürlichen und synthetischen Fasern, ist jedoch wegen seiner Eigenschaften und/oder seines Preises für bestimmte Anwendungen überlegen. Eine totale Produktsubstitution wäre daher nicht sinnvoll. Es ist zu erwarten, dass der Bedarf leicht ansteigt. Adipinsäure wird auch in kleineren Mengen zur Herstellung von Polyurethanen verwendet. In den letzten Jahren hat sich der Absatz für die Adipinsäure positiv entwickelt. Importe werden nur dann eine wichtige Rolle spielen, wenn Anlagen in Deutschland stillgelegt werden. Daher kann man davon ausgehen, dass die Produktion ebenfalls leicht wachsen wird.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Eine Prozess- oder Rohstoffsubstitution ist für Deutschland nicht in Sicht. Es wurden zwar in anderen Wirtschaftsregionen Alternativverfahren entwickelt. Diese sind aber den in Deutschland gebräuchlichen Verfahren nicht überlegen. Direkte Oxidationsverfahren bis zur Säurestufe konnten sich bis jetzt wegen der schlechten Selektivität großtechnisch nicht durchsetzen (Arpe 2006, S. 264). Damit ist eine Verfahrens- bzw. Rohstoffsubstitution demnächst nicht zu erwarten.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Wie in Kapitel 3.2.1.1 erwähnt, spielt der Energieverbrauch bei der Bildung von CO_2-Emissionen eine untergeordnete Rolle. Um so mehr tragen N_2O-Emissionen zu den THG-Emissionen bei. Seit 1994 werden die Abgase in Deutschland gereinigt, sodass die THG-Emissionen bei der Produktion von Adipinsäure wesentlich reduziert werden konnten.

Im Basisjahr 2007 war trotzdem noch immer Potenzial für die Reduktion der THG-Emissionen vorhanden. Die THG-Emissionen für 2007 in Deutschland werden auf

18,140 kt N_2O geschätzt. Dies entspricht 5,623.500 Mt CO_2-eq. (siehe auch Kapitel 3.2.1.1).

In den letzten Jahren haben die Hersteller von Adipinsäure in Deutschland Maßnahmen ergriffen, um die N_2O-Emissionen noch weiter zu reduzieren:

- Lanxess hat 2009 die Abgasreinigungsanlage erweitert. Das N_2O wird bei 1.000 °C in Stickstoff und Sauerstoff zerlegt. Die entstehende Wärme wird zur Dampferzeugung verwendet (siehe Geschäftsbericht Lanxess 2009). Dadurch wird eine N_2O-Reduktion von 99,98 % erreicht. Umgerechnet entspricht dies 1,5 Mt CO_2-eq./a (siehe Wiesmann 2008).
- Die BASF installierte eine katalytische Abgasbehandlungsanlage, die ebenfalls das N_2O in Stickstoff und Sauerstoff zerlegt. Nach eigenen Angaben werden dadurch die N_2O-Emissionen ab 2010 um 2 Mt CO_2-eq. verringert (Henig 2009).
- Die BASF errichtete 2010 eine Anlage zur Herstellung von 30,000 kt/a Cyclododecanon, in der N_2O aus der Adipinsäure-Herstellung als Rohstoff genutzt wird. Sie arbeitet nach einem neuen dreistufigen Verfahren, bei dem das N_2O als Oxidationsmittel zum Einsatz kommt (Jopp 2010). Die dadurch zurückgewonnene Menge an N_2O ist nicht bekannt.

Durch die Maßnahmen von Lanxess und BASF wird die Reduktion der THG-Emissionen, ohne die dritte oben genannte Maßnahme, auf mindestens 3,5 Mt CO_2-eq. geschätzt. Allerdings entstehen weiterhin N_2O-Emissionen durch die An- und Abfahrvorgänge sowie der geplanten und ungeplanten Stilllegungen der Abgasbehandlungsanlagen. Für diese Emissionen sind redundante Abgasbehandlungsanlagen geplant (vgl. Kapitel 3.2.1.1).

Eine 85- bis 90%ige Abscheidung des N_2O durch thermische oder katalytische Abgasbehandlungsverfahren gilt als BVT (AGE 2010, S. 9). Dabei ist der Energieverbrauch für die Abgasbehandlung sehr hoch. Außerdem trägt eine optimale Laufzeit der Katalysatoren zur Verminderung der N_2O-Emissionen bei, da bekanntlich mit zunehmender Betriebsdauer der Katalysatoren mehr N_2O emittiert wird.

In IPTS 2003, S. 44, wird eine Investitionssumme von 12,8 Mio. € für eine Abgasbehandlungsanlage mit einer Verarbeitungskapazität von 58,000 kt N_2O/a und einem Wirkungsgrad von 95 % genannt. Die jährlichen Kosten liegen bei 1,3 Mio. €, wenn ein Zinssatz von 4 % und eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen werden. Dies entspricht 44 €/t N_2O bzw. 0,1 €/t CO_2-eq.. Die Daten gelten für das Jahr 1990. Bei einer Aktualisierung auf 2010 betragen die Kosten ca. 66 € pro t N_2O bzw. 0,15 €/t CO_2-eq. Diese Daten berücksichtigen mögliche redundante Abgasreinigungsanlagen nicht, die notwendig sind, um die N_2O-Emissionen soweit zu reduzieren, dass man die Benchmark für den Emissionshandel näherungsweise erreichen kann.

Ab 2013 werden auch Adipinsäure-Anlagen in den Emissionshandel einbezogen. Eine weitere wesentliche Reduktion der THG-Emissionen ist dann eine wirtschaftliche Notwendigkeit. Das wirtschaftliche Verringerungspotenzial der THG-Emissionen wird von der Festlegung der Benchmark sowie dem Preis für die CO_2-Zertifikate abhängen. Während Experten 5,6 t CO_2/t Adipinsäure für die Benchmark vorgeschlagen hatten, hat der CEFIC einen Gegenvorschlag von 8,37 t CO_2/t Adipinsäure unterbreitet (Öko-Institut 2009, S. 46). Legt man den Expertenvorschlag als Grundlage für die Berechnung zugrunde und nimmt für 2013 eine Produktion von 557,5 kt an, so liegen die N_2O-Emissionen bei 3.122 t. Gegenüber 2007 ist die Ersparnis gleich 15.018 t N_2O. Dies entspricht 4,655.580 Mt CO_2-eq./a (12,95 t CO_2-eq./t Adipinsäure).

Die durch die Nachrüstung mit Abgasbehandlungsanlagen entstehenden kapitalabhängigen und Betriebskosten sind bis zu einem bestimmten Emissionsniveau wirtschaftlich gerechtfertigt, da der Kauf von CO_2-Zertifikaten in diesem Falle nicht mehr in dem Umfang notwendig wäre. Über diese Grenze herrschen unterschiedliche Meinungen.

Der Bau einer neuen Anlage wird zurzeit nicht erwartet. Adipinsäure-Anlagen können eine reale Lebensdauer von 40 – 50 Jahren haben. Unter Bedingungen der technischen Diffusion ist der Bau einer neuen Anlage möglich.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Adipinsäure-Herstellung werden in Tabelle 3-35 zusammengefasst.

Tabelle 3-35: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen und die THG-Emissionen für Adipinsäure

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Leichtes Wachstum
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Produktsubstitution möglich, aber schlecht abschätzbar Neue Einsatzgebiete möglich
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Nicht übersehbar
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Nicht erwartet
Mögliche Brennstoffsubstitution	Bei der Abgasbehandlung: keine
BVT für den Prozess heute	Abgasbehandlung
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	35 Jahre
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	40 – 50 Jahre, Entwertung aufgrund von Konkurrenzprodukten oder –verfahren möglich

Parameter	Wert/Beschreibung
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Noch vor Ende des Untersuchungszeitraumes möglich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Thermische oder katalytische Abgasbehandlung für die Reduktion des N_2O bis 2013
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Hoch Hoch
Potenzial für die Verringerung der THG-Emissionen	1. Möglichkeit: Reduktion des N_2O bis zu der technisch möglichen Grenze von 85 – 90 % 2. Möglichkeit: durch Experten vorgeschlagene Benchmark von 5,6 t CO_2/t Adipinsäure

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Eine weitere Reduktion der N_2O-Emissionen wird in der chemischen Industrie diskutiert, vor allem vor dem Hintergrund der baldigen Einführung des Emissionshandels. Eine wesentliche Reduktion kann zusätzlich zu den oben genannten Maßnahmen durch die Errichtung von redundanten Abgasreinigungsanlagen erreicht werden. Folgende prozessspezifische Hemmnisse stehen der Implementierung dieser Maßnahmen entgegen:

- Die Entwicklung des Emissionshandels für Adipinsäure und der Preis für die CO_2-Zertifikate führen zu Unsicherheiten bei den zukünftig entstehenden Kosten (Diese Aussage stammt aus dem Jahr 2007 und dürfte heute nicht mehr gelten). Dadurch werden Entscheidungen zurückgestellt. Es können auch Wettbewerbsverzerrungen dadurch entstehen, dass Standorte außerhalb der EU weiterhin ohne Abgasbehandlung bzw. mit begrenzter Abgasbehandlung betrieben werden (Carbon Leakage).
- Die Unsicherheit wird durch die aufwändige und teure Technologie noch größer. Außerdem ist sie in der Hand von wenigen Anbietern. Zudem ist der Energieverbrauch für die Abgasbehandlung sehr hoch.

3.3.2.2 Ammoniak

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Ammoniak wird in Deutschland zu ca. 80 % für die Herstellung von Düngemitteln verwendet (IPTS 2007b, S. 35). Direkte Folgeprodukte aus dem Düngemittelsektor sind Harnstoff und verschiedene Nitrate. Außerdem wird das Folgeprodukt Salpetersäure für die Herstellung von Stickstoffdüngern und für den Aufschluss von Rohphosphaten eingesetzt. Damit ist die Entwicklung des Ammoniak-Bedarfs stark von der Entwicklung

des Düngemittelmarktes abhängig. Da die Bodendüngung immer effektiver wird und man aus Umweltüberlegungen Düngemittel sparsamer einsetzt, geht der Bedarf an Dünger zurück. So wurden im Jahre 2008/09 1.550 kt N-Dünger (bezogen auf Stickstoff) gegenüber 1.780 kt N im Jahre 2004/05 abgesetzt (www.iva.de, abgelesen am 12.8.2010). Diese Entwicklung dürfte sich in Zukunft fortsetzen. Bestenfalls wird der Bedarf stagnieren. Bei technischen Anwendungen ist ein Wachstum ähnlich dem des Wirtschaftswachstums zu erwarten. Zu den technischen Folgeprodukten gehören Melamin, Kunststoffe, Fasern, Hydrazin, Amide, Amine usw. Aus Salpetersäure und Harnstoff als Folgeprodukte des Ammoniaks werden ebenfalls zahlreiche technische Produkte hergestellt.

Eine Substitution des Ammoniaks sowohl für die Düngemittelherstellung als auch für technische Anwendungen ist nicht zu erwarten. Damit wird der Bedarf kaum durch eine Produktsubstitution beeinflusst. Der Gesamtbedarf an Ammoniak wird daher stagnieren oder zurückgehen.

Die Ammoniak-Produktion ist in den letzten 10 Jahren bis zum Basisjahr 2007 um ca. 7 % gestiegen (VCI 2008a, S. 17). Dies ist hauptsächlich auf die zunehmende Salpetersäure-Produktion zurückzuführen. Die Ammoniak-Importe haben sich während dieses Zeitraumes auf 420 kt N fast verdreifacht. Gleichzeitig sind die Exporte von 298 kt N auf 210 kt N zurückgegangen (IVA 2009, S. 15). Die Export-Import-Bilanz könnte sich weiter negativ entwickeln. Die Düngemittelimporte aus den rohstoffreichen Ländern, wie Russland und den nahöstlichen Ländern, könnten abhängig von den Rahmenbedingungen zunehmen.

Wegen des oben genannten Rückgangs des Verbrauchs an Düngemitteln und der möglichen Importe ist eine Steigerung der Produktion kaum möglich. Eher ist anzunehmen, dass die Ammoniak-Produktion bestenfalls stagnieren wird. Die Höhe der Produktion in den nächsten 25 Jahren wird dabei von vielen Faktoren abhängen, wie z. B. den Rohstoffpreisen, der internationalen Handelspolitik und der Entwicklung der Ammoniak-Produktion in den anderen EU-Ländern.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Die beiden zur Herstellung von Synthesegas dominierenden Prozesse des Steam-Reformings und der partiellen Oxidation gelten als ausgereift. Eine Prozesssubstitution ist daher nicht zu erwarten. Eher werden die Prozesse mit dem Ziel modifiziert und optimiert, die Ressourceneffizienz zu erhöhen. Das Gleiche gilt auch für das Haber-Bosch-Verfahren.

Als eine Weiterentwicklung gilt die autotherme, katalytische partielle Oxidation. Im Vergleich zu den anderen Synthesegas-Verfahren läuft sie unter einem höheren Druck ab und weist einen geringeren Energieverbrauch auf. Dieses Verfahrensprinzip wird beispielsweise in der MegaAmmonia von Lurgi eingesetzt, die aber nur für Anlagen mit einer Kapazität größer als 3.000 t/d geeignet ist (siehe beispielsweise Winnacker-Küchler 2005, S. 258).

Eine Rohstoffsubstitution ist dagegen bei der Errichtung von neuen Anlagen denkbar. Wie in Kapitel 3.2.1.2 aufgezeigt, hängt der Energieverbrauch bei der Synthesegas-Herstellung stark von dem eingesetzten Rohstoff ab. Jedoch spielen neben dem Energieverbrauch die Verfügbarkeit des Rohstoffes und sein Preis eine sehr wichtige Rolle. Erdgas weist zwar einen günstigen Energieverbrauch auf und emittiert weniger Treibhausgase, ist aber bezogen auf den Heizwert teurer.

Dafür stehen schwere Rückstände aus der Erdölraffination oft zu günstigeren Preisen zur Verfügung, die zur Herstellung von Synthesegas durch partielle Oxidation eingesetzt werden können. Daraus kann man Ammoniak, Methanol usw. gewinnen. Wasserstoff, der in großen Mengen in Erdölraffinerien benötigt wird, wird ebenfalls aus Destillationsrückstand gewonnen. Werden die genannten Rückstände nicht für diesen Zweck eingesetzt, müssten sie anderweitig verwertet werden. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass bei einer Gesamtbetrachtung das Problem der Reststoffe aus der Erdölraffination berücksichtigt werden soll (siehe hierzu auch IPTS 2007b, S. 49ff; UBA 2001a, S. 8).

Ein weiterer Rohstoff für die Herstellung von Synthesegas stellt das schwere Heizöl dar, das in Europa lange Zeit preisgünstig zur Verfügung stand. Durch die zunehmende Motorisierung wird es immer mehr zur Herstellung von Benzin- und Dieseltreibstoffen durch thermisches Cracking verwendet. Außerdem sind sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten höher. Damit kommt es als Rohstoff für neue Anlagen nicht in Frage (siehe Tabelle 3-5).

Die Vergasung von Biomasse für die Herstellung von Synthesegas wird ebenfalls diskutiert. Dabei können ähnliche Verfahren wie zur Kohlevergasung eingesetzt werden. Sie sind noch im Stadium von Pilotanlagen. Bis heute ist die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben. Die Investitionskosten sind höher als bei der Verwendung von Erdgas bzw. Destillationsrückstand als Rohstoff. Auch die Rohstoffkosten liegen höher. Der Transport der Biomasse zu den Vergasungsanlagen belastet zusätzlich die Herstellkosten. Eine weitere Optimierung dieser Verfahren und die Verwendung von Abfällen aus der Land- und Fortwirtschaft könnten zu einem wirtschaftlichen Durchbruch führen. Im Falle des Einsatzes von Biomasse muss man eine ökologische Bewertung durchführen, in

der auch die bei der Erzeugung von Biomasse entstehenden CO_2-Emissionen berücksichtigt werden.

Eine weitere auf erneuerbarer Energie basierende Technologie zur Herstellung von Wasserstoff und damit von Ammoniak ist die Photokatalyse. Allerdings ist sie noch im Stadium der Grundlagenforschung, sodass der Zeitpunkt eines Durchbruchs noch nicht absehbar ist.

Die Kohlevergasung zur Gewinnung von Synthesegas war in Deutschland vor dem zweiten Weltkrieg dominierend. Diese Option wird zurzeit bei steigenden Erdöl- und Erdgaspreisen wieder in Betracht gezogen (siehe z. B. Machhammer 2006). Jedoch muss man dabei berücksichtigen, dass für Westeuropa diese Alternative unter den heutigen Rahmenbedingungen wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten nicht wirtschaftlich ist. Zudem sind der spezifische Energieverbrauch und damit die CO_2-Emissionen wesentlich höher als bei den anderen Rohstoffen.

Die Auswahl des Prozesses für die Synthesegas-Herstellung ist damit stark von der Auswahl des Rohstoffes abhängig. D. h., zunächst wird der Rohstoff festgelegt und dann der Prozess.

Für das Haber-Bosch-Verfahren gibt es heute keinen Ersatz, und es wird für absehbare Zeit so bleiben.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Für die Synthesegas-Herstellung stellen sowohl das Steam-Reforming als auch die partielle Oxidation in der modernen Variante die BVT für den jeweiligen Rohstoff dar.

Zunächst wird das Steam-Reforming besprochen. Der Energieverbrauch bei der Synthesegas-Herstellung hängt neben dem eingesetzten Rohstoff in erster Linie vom angestrebten CO/H_2-Verhältnis ab. Beim Zielprodukt Ammoniak steht das Mol-Verhältnis von 3 Wasserstoff zu 1 Stickstoff fest. Weitere Einflussfaktoren sind Druck, Temperatur, Katalysatorart, konstruktive Einzelheiten des Reaktors usw.

Die ACP kann theoretisch sowohl für neue als auch für bestehende Anlagen verwendet werden (siehe Kapitel 3.2.1.2). Da neuere Anlagen eher effizientere Reforming-Technologien einsetzen, ist das ACP besser für die Modernisierung von konventionellen Reforming-Anlagen geeignet. Die RPR ist für neu zu errichtende Anlagen sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch überlegen. Für Umrüstung bestehender Anlagen bringt es keine wirtschaftlichen Vorteile (UBA 2001a; S. 16; IPTS 2007b, S. 58ff). Das HPR-Konzept verursacht zwar geringere NO_x-Emissionen, jedoch ist der Energieverbrauch höher. Berücksichtigt man die Tatsache, dass die Ammoniak-Herstellung in Deutsch-

land eher unter dem Gesichtspunkt des Energieverbrauchs als der NO_x-Emissionen zu betrachten ist, ist das RPR-Konzept für neue Anlagen zu bevorzugen (UBA 2001a, S. 17).

Bei der partiellen Oxidation ist das Hauptziel der Optimierung die Reduktion des Ressourcenverbrauchs. Ein wichtiger Unterschied zum Steam-Reforming ist die Abtrennung und Rückführung des im Vergasungsreaktor gebildeten Rußes.

Das Haber-Bosch-Verfahren gilt in seiner modernen Version als die BVT. Maßnahmen zur Erreichung des Energieoptimums werden unten angegeben.

Unabhängig von den oben erwähnten Verfahrenskonzepten werden in der Fachliteratur verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen, die seit vielen Jahren zur Reduktion des Ressourceneinsatzes als BVT gelten (Büchel, Moretto, Wodisch 1999, S. 31ff; IPTS 2007b, S. iv; EFMA 2000a, S. 10). Zum wesentlichen Teil gehören sie bereits bei der Errichtung von neuen Anlagen zum Standard. Inwieweit sie für die Umrüstung von bereits bestehenden Anlagen geeignet sind (Add-On-Technologie), muss von Fall zu Fall entschieden werden. Für Steam-Reforming gilt folgendes (IPTS 2007b, S. 60ff):

- Tieftemperatur-Entschweflung: Dadurch kann man Niederdruckdampf für das Erhitzen des Einsatzgases verwenden,
- Vorerhitzen des Rohstoff/Dampf-Gemisches und der Luft durch die Abwärme aus dem Primär- bzw. Sekundärreformer,
- Verringerung des Dampf/Kohlenstoff-Verhältnisses,
- Einführung einer modernen Gasturbine für die Luftkompression, deren Abgas in den Primärreformer eingeführt wird (gilt eher für neue Anlagen),
- Optimierung des Ofenbrenners, um eine optimale Verteilung des Abgases aus der Gasturbine über den Brenner zu gewährleisten,
- Einschalten eines katalytischen adiabatischen Pre-Reformers in Kombination mit einem geeigneten Dampfmanagementsystem,
- isotherme CO-Konvertierung (gilt hauptsächlich für neu zu errichtende Anlagen),
- Optimierung der CO_2-Abscheidung durch Verwendung effektiverer Absorptionsmedien,
- Membran-Trennung des Methans in der Methanisierungsstufe,
- Verwendung einer Flüssig-Stickstoff-Wäsche für die Feinreinigung des Synthesegases,

Speziell für die partielle Oxidation gelten folgende Maßnahmen als BVT (IPTS 2007b, S. 82ff):

- Verwendung von schwefelresistenten Katalysatoren für die CO-Konvertierung,
- Verwendung einer Flüssig-Stickstoff-Wäsche für die Feinreinigung des Synthesegases.

Für die Ammoniak-Synthese werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen (IPTS 2007b, S. 60ff):

- indirekte Kühlung des Ammoniaksynthesereaktors,
- Rückgewinnung von Wasserstoff aus dem Purge-Gasstrom durch Kühlung oder Membrantechnologie,
- Verwendung von kleinkörnigen Katalysatoren im Ammoniak-Reaktor,
- Verwendung einer Niederdruck- oder Mitteldruck-Ammoniak-Synthese,
- Verwendung eines modernen Prozessleitsystems, um optimale Betriebspunkte fahren zu können,
- Rückgewinnung des NH_3 aus dem Prozesskondensat, z. B. durch Stripping,
- Verwendung von Turboverdichtern in Verbindung mit Dampfturbinen.

Die meisten Ammoniak-Anlagen in Deutschland wurden in den 70er und 80er Jahren errichtet. Ihr durchschnittliches Alter liegt heute bei ca. 35 Jahren (siehe Kapitel 3.2.1.2). Der überwiegende Teil kann noch viele Jahre betrieben werden. Dabei wird die reale Lebensdauer von Ammoniak-Anlagen auf 40 – 60 Jahren geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung. Jedoch können mit zunehmendem Alter und den damit zusammenhängenden steigenden Instandhaltungskosten bestehende Anlagen nicht mehr mit neuen modernen Anlagen konkurrieren und müssen dann aus wirtschaftlichen Gründen stillgelegt werden. Im Vergleich zu modernen Anlagen mit einer Kapazität von mehr als 800 kt/a sind sie eindeutig benachteiligt. Der Zeitpunkt der Stilllegung hängt von technischen Faktoren ab, wie z. B. früheren Modernisierungsmaßnahmen, dem Wärmeintegrationsstand am Standort, aber auch von wirtschaftlichen Faktoren, wie beispielsweise der Liquidität des Betreibers, der Entwicklung des Düngemittelsektors und den Energiepreisen. Dabei sind Anlagen an großen integrierten Standorten im Vorteil gegenüber Anlagen auf kleineren, weniger integrierten Standorten. Auch Anlagen, die preiswerten Destillationsrückstand verwerten, sind im Vorteil gegenüber Erdgas-Anlagen, obwohl sie einen höheren Ressourcenverbrauch aufweisen. Bei dieser Betrachtung ist eine zusätzliche Belastung durch den Emissionshandels nicht berücksichtigt. Damit ist während des Betrachtungszeitraumes ein Ersatz unter günstigen Rahmenbedingungen möglich.

Der Ressourcenverbrauch für BVT-Anlagen nach dem Steam-Reforming liegt in der EU bei 27,6 – 31,8 GJ/t Ammoniak, der Durchschnittswert der bestehenden Anlagen bei 35,7 GJ/t Ammoniak (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 36). Worrell et al. geben für den Ressourcenverbrauch 28 GJ/t Ammoniak als international besten Wert an (2007, S. 38).

Wesentliche Energieeinsparpotenziale bestehen im Ersatz von älteren Anlagen durch neue mit RPR-Technologie auf Basis von Erdgas. Der Energieverbrauch beträgt dann bei gut integrierten Anlagen 4 GJ/ t Ammoniak und im Durchschnitt 6 GJ/ t Ammoniak (IPTS 2007b, S. 50). Nimmt man an, dass eine Anlage mit einer Kapazität von 800 kt/a und einem Energieverbrauch von 5 GJ/ t Ammoniak ältere Anlagen ersetzt, kann man 2,96 PJ/a einsparen.

Realistischer ist das Szenario einer Modernisierung der bestehenden Anlagen. Ammoniak-Anlagen in Deutschland werden regelmäßig modernisiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für Modernisierungsmaßnahmen technische und wirtschaftliche Grenzen gelten, sodass modernisierte Anlagen noch immer einen höheren Energieverbrauch als neue Anlagen aufweisen (siehe Kapitel 3.2.1.2). Durch eine Anzahl von Maßnahmen kann man bei Anlagen auf Erdgasbasis bis 4 GJ/t einsparen (IPTS 2007b, S. 50). In unterschiedlichem Maße wurden die oben beschriebenen BVT-Maßnahmen bereits realisiert. Eine Abschätzung des Anteils jeder Maßnahme ist aus Mangel an veröffentlichten Informationen kaum möglich. Ein Durchschnittswert des Energieeinsparpotenzials, einschließlich des bereits umgesetzten Teils, dürfte bei ca. 2,3 GJ/t Ammoniak liegen.

Das Prozess-CO_2 wird zum größten Teil bei der Herstellung von Harnstoff sowie in anderen Anwendungen verbraucht. Eine Intensivierung der Anwendung ist möglich. Dies gilt vor allem für die Getränke- und Lebensmittelindustrie. Außerdem wurden für die Verwendung des restlichen Prozess-CO_2 unterschiedliche Vorschläge gemacht, z. B. der mögliche Einsatz bei der Soda-Herstellung. Dadurch könnte man die gebrannte Kalkmenge reduzieren. Solche Überlegungen kommen aber nur dann in Frage, wenn beide Produktionsanlagen an einem gemeinsamen Standort stehen. Dies ist aber in Deutschland derzeit nicht der Fall.

Damit ist im Szenario Marktdiffusion die Errichtung von neuen Anlagen möglich, aber bedingt durch die unten aufgeführten Hemmnisse weniger wahrscheinlich. Im Szenario technische Diffusion würde mindestens eine neue Anlage errichtet, wenn im Jahre 2025 das Durchschnittsalter der bestehenden Anlagen die Grenze von 50 Jahren überschritten hat. Diese Anlage würde mit BVT errichtet.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Ammoniak-Herstellung werden in Tabelle 3-36 zusammengefasst.

Tabelle 3-36: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Ammoniak

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierende bzw. rückläufige Produktion
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Unbedeutend Nicht absehbar
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Unbedeutend
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Rohstoffsubstitution für bestehende Anlagen nicht möglich
Mögliche Brennstoffsubstitution	Steam-Reforming: keine Partielle Oxidation: keine
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	Steam-Reforming: 36 Jahre Partielle Oxidation: 34 Jahre
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	40 – 60 Jahre, je nach Modernisierungsmaßnahmen
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes möglich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Die Entwicklung der Stickstoff-Düngemittelindustrie in Deutschland ist mit einigen Unsicherheiten behaftet. Der Düngemittelmarkt ist in Westeuropa, bedingt durch den rückläufigen Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft, eher stagnierend. Die technischen Anwendungen des Ammoniaks können dies nur zum Teil kompensieren. Außerdem wurden in den letzten 20 – 30 Jahren große Kapazitäten für die Erzeugung von Stickstoff-Düngemitteln in den rohstoffreichen Ländern errichtet, die mittelfristig eine Konkurrenz für die Stickstoff-Düngemittelindustrie in Westeuropa darstellen.
- Auch besteht eine Unsicherheit hinsichtlich des EU-Emissionshandels im Zusammenhang mit der Bildung von Prozess-CO_2 (siehe hierzu Pellervo Economic Research Institute 2008).

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen wirken folgende Hemmnisse entgegen:

- Es bestehen technische Grenzen für die Modernisierung von älteren Anlagen. Beispielsweise sind RPR-Technologie und der Einbau einer zusätzlichen Gasturbine neuen Anlagen vorbehalten.
- Auf kleineren, weniger integrierten Standorten sind die Potenziale für Standortwärmeintegration begrenzt.

3.3.2.3 Calciumcarbid

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Calciumcarbid hat in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung verloren. Heute wird es hauptsächlich für die Herstellung des Düngemittels Calciumcyanamid sowie von Acetylen für Schweißzwecke eingesetzt. Wegen der Dominanz der Ethylen-Chemie spielt das Acetylen in der organischen industriellen Chemie kaum noch eine Rolle. Zudem fallen kleinere Mengen an Acetylen beim Steam-Cracking an, das als preiswertes Nebenprodukt gilt. Andere Anwendungen des Calciumcarbids, wie z. B. für die Entschwefelung in der Metallurgie, haben mit Konkurrenzprodukten zu kämpfen. Dabei ist das Calciumcarbid durch den hohen Energieverbrauch gegenüber den Konkurrenzprodukten benachteiligt. Die Entschweflung in der Stahlindustrie mit Calciumcarbid weist aber gewisse Vorteile gegenüber den Konkurrenzprodukten auf. Wenn man die Bedarfsentwicklung der letzten Jahre extrapoliert und die oben genannten Marktbedingungen berücksichtigt, kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass der Bedarf stagnieren bzw. zurückgehen wird.

Die Verlagerung der Produktion in andere westeuropäische Länder ist unwahrscheinlich, da ähnliche Energiepreise gelten. Mit der Verlagerung in die rohstoffreichen Länder ist ebenfalls kaum zu rechnen. Damit wird die Produktion von Calciumcarbid je nach Rahmenbedingungen stagnieren bzw. zurückgehen.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Wegen der weltweit rückläufigen Bedeutung des Produktes sind kaum große Fortschritte beim Prozess zu erwarten. Auch Alternativprozesse sind nicht in Sicht. Damit wird auch die Rohstoffbasis unverändert bleiben.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Folgende Maßnahmen gelten bei der Herstellung von Calciumcarbid als BVT:

- Das Konzept des geschlossenen Ofens führt nicht nur zur Verringerung der Emissionen, sondern auch zur Erhöhung der Energieeffizienz.

- Das CO-reiche Abgas aus dem Ofen wird nach einer Reinigung, z. B. im Kalkofen, thermisch genutzt.
- Der Lichtbogenofen wurde immer wieder im Sinne der Energieeffizienz optimiert. Jedoch führen Energierückgewinnungsmaßnahmen zur Verringerung der Carbidausbeute (Winnacker-Küchler 2005, S. 941).

Wegen der oben dargestellten Situation ist es unwahrscheinlich, dass in absehbarer Zeit neue Anlagen errichtet bzw. die bestehenden Anlagen ersetzt werden. Die reale Lebensdauer von Calciumcarbid-Anlagen wird auf 40 – 60 Jahre, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung, geschätzt.

Die Anlagen in Deutschland wurden immer wieder modernisiert. Die oben genannten BVT-Maßnahmen wurden bereits zum großen Teil realisiert. Z. B. wird das CO-reiche Abgas aus dem Ofen thermisch genutzt. Man kann annehmen, dass der Anteil der bereits realisierten BVT-Maßnahmen bei 70 % liegt. Einsparpotenziale bestehen hauptsächlich bei weiterer thermischer Nutzung des Abgases am Standort, bei der Rückgewinnung der fühlbaren Wärme aus dem Carbid und bei weiterer Optimierung des Lichtbogenofens und des Brennens des Kalks.

Daher ist kaum zu erwarten, dass im Szenario Marktdiffusion neue Anlagen errichtet bzw. bestehende Anlagen ersetzt werden. Dafür werden aber die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen fortgesetzt. Auch im Szenario technische Diffusion ist es wegen des stagnierenden Bedarfs unwahrscheinlich, dass neue Anlagen errichtet werden.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Calciumcarbid-Herstellung werden in Tabelle 3-37 zusammengefasst.

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Der stagnierende bzw. zurückgehende Bedarf an Calciumcarbid führt zu Unsicherheiten, die die Errichtung neuer Anlagen unwahrscheinlich machen.

Der Modernisierung von bestehenden Calciumcarbid-Anlagen stehen oft technische Gründe entgegen:

- Die Standortwärmeintegration ist an kleineren, isolierten Standorten schwierig zu realisieren. Damit bestehen Grenzen für die Ausnutzung der Abgaswärme.

Tabelle 3-37: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Calciumcarbid

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierende bzw. rückläufige Produktion
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Keine Keine
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Rohstoffsubstitution für bestehende Anlagen nicht möglich
Mögliche Brennstoffsubstitution	Kaum möglich
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	-
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	Über 50 – 60 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes unwahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Verbesserung der Wärmerückgewinnung
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Hoch Begrenzt

3.3.2.4 Ethylen

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Über 68 % des Ethylens wird für die Herstellung der Massenkunststoffe Polyethylen und PVC verwendet (VCI 2008a, S. 73). Der Rest wird zu Industriechemikalien, Spezialitäten und Feinchemikalien weiterverarbeitet. Propylen wird zu ca. 50 % zu Polypropylen verarbeitet, der Rest zu verschiedenen Kunststoffen und Industriechemikalien (VCI 2008a, S. 73). Auch Butadien wird zum größten Teil für die Herstellung von synthetischem Kautschuk und anderen Kunststoffen eingesetzt.

Die oben genannten Produkte der Steam-Cracker bilden die Hauptbausteine der modernen chemischen Industrie und sind, solange Ethan, Flüssiggas und Erdölderivate preiswert zur Verfügung stehen, kaum durch andere Bausteine zu ersetzen. Die Acetylen-Chemie auf Kohlebasis, die in Europa bis zum 2. Weltkrieg dominierte, ist der Ethylen-Propylen-Chemie auf Erdöl- und Erdgasbasis eindeutig unterlegen.

Die Bioraffination auf Biomassebasis ist als Lieferant von Chemiegrundstoffen für die chemische Industrie noch in den Anfängen ihrer Entwicklung. Es ist noch nicht absehbar, wann der Durchbruch für die Bioraffination gelingt. Dies hängt von zahlreichen

Faktoren ab, wie z. B. der Entwicklungsgeschwindigkeit der Technologie zur Marktreife, der Verfügbarkeit der Biomasse zu akzeptablen Preisen, dem Anstieg der Erdölpreise usw. Die Gewinnung von Ethylen aus Biomasse über Ethanol ist zwar eine erprobte Route, jedoch ist sie nur bei sehr niedrigen Kosten der Biomasse konkurrenzfähig. Es ist daher wahrscheinlicher, dass die Produkte der Bioraffination sowie andere Produkte auf Biomasse-Basis erst sukzessiv zur Verfügung stehen und im Betrachtungszeitrum dieser Studie keine starke Konkurrenz zu den Produkten aus den Steam-Crackern darstellen werden.

Aus diesen Gründen wird der Bedarf für kurzkettige Olefine, Aromaten und C4-Schnitte, abhängig von der wirtschaftlichen Entwicklung, leicht ansteigen. Dabei ist der Anstieg des Bedarfs an Propylen stärker als an Ethylen.

Die Steam-Cracker-Produktion stagnierte in den letzten 10 Jahren, nach einem Anstieg in den 90er Jahren (VCI 2008a, S. 15), wobei Spielraum für eine Vollauslastung noch vorhanden ist. Der letzte Steam-Cracker wurde in Leuna vor ca. 15 Jahren errichtet. Der steigende Bedarf wurde durch Kapazitätserweiterungen befriedigt.

Für die Zukunft bestehen jedoch einige Unsicherheiten für die Steam-Cracker in Deutschland. Diese hängen überwiegend mit der Entwicklung des internationalen Marktes für die Folgeprodukte zusammen. Wahrscheinlich werden die Exporte von Chemiegrundstoffen und vielen ihrer direkten Folgeprodukte in außerwesteuropäische Länder abnehmen und Importe zunehmen (siehe hierzu Kapitel 3.2.1.4). Daher wird die Cracker-Produktion in Deutschland abhängig von den Rahmenbedingungen stagnieren bzw. nur leicht ansteigen. Für die nächsten zehn Jahre ist auf jeden Fall wenig Änderung zu erwarten, da keine neuen Cracker bzw. Schließungen angekündigt wurden. Analysten vermuten, dass einige der Steam-Cracker in Europa stillgelegt werden, vor allem ältere Anlagen an ungünstigen Standorten und mit kleiner Kapazität. Wie sich das auf den Standort Deutschland auswirkt, ist offen, da man nicht weiß, welche Anlagen zuerst schließen werden. Die Schließung von europäischen Standorten außerhalb von Deutschland kann aber auch eine Entlastung für deutsche Standorte bedeuten.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Alternativtechnologien zu Steam-Cracking sind nicht in der Lage, die gewünschte Produktpalette zu liefern, bzw. nicht konkurrenzfähig. „On the purpose“-Prozesse, wie z. B. Gas-to-Olefins (GTO), Olefin-Metathese oder Propan-Dehydrierung, sind nur bei Verfügbarkeit von preiswerten Rohstoffen wirtschaftlich. Dies trifft aber nur in Ausnahmefällen für Westeuropa zu, z. B. um den steigenden Bedarf an Propylen zu befriedigen; denn in Steam-Crackern ist das Verhältnis Ethylen zu Propylen nur begrenzt variierbar. Eine Alternative zu den „On the purpose“-Prozessen ist die Steigerung der Propylen-

Produktion in den Raffinerien. Eine Zusammenfassung neuerer Entwicklungen findet man z. B. in Enviros Consulting 2006, S. 13 und Jones 2009. Trotz der intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es nicht zu einem allgemeinen Technologiewechsel gekommen. Ein Ersatz für das Steam-Cracking ist also nicht zu erwarten.

Die Rohstoffe sind hinsichtlich des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen ein wichtiger Faktor. Beide nehmen in folgender Reihenfolge der Rohstoffe ab: Gasöl, Naphtha, Flüssiggas und Ethan. Die Rohstoffe sind aber nicht beliebig substituierbar, da je nach Rohstoff eine andere Produktpalette entsteht. Die Entscheidung für einen bestimmten Rohstoff ist somit von den Zielprodukten und der Rohstoffverfügbarkeit abhängig. Dadurch ist es nicht möglich, einen Rohstoff im Sinne der BVT zu nennen (siehe auch IPTS 2003, S. xi und S. 188). In Deutschland hat sich Naphtha als Rohstoff nicht nur aus historischen Gründen und wegen der Verfügbarkeit des Naphthas etabliert, sondern auch wegen der gewünschten Nebenprodukte. Jedoch werden auch andere Rohstoffe eingesetzt, wie Flüssiggas und Gasöl. Im Falle des Ethans ist Ethylen mit über 60 % Anteil eindeutig das Hauptprodukt. Bei Gasöl bekommt man eine zu Naphtha analoge Produktzusammensetzung, allerdings mit Verschiebung zu C_4- und C_5-Schnitten. Die Zielprodukte müssen also auf jeden Fall beim Vergleich konkurrierender Prozesse berücksichtigt werden. Die oben angestellten Überlegungen gelten für neu zu errichtende Anlagen. Jedoch sind moderne Anlagen bis zu einem gewissen Maße flexibel hinsichtlich des Rohstoffeinsatzes (siehe unten).

Nach Festlegung der Zielprodukte ist der Ressourcenverbrauch (energetischer und nicht-energetischer Verbrauch) das wichtigste Kriterium beim Vergleich von Steam-Cracking-Prozessvarianten, da er die Wirtschaftlichkeit des Prozesses entscheidend bestimmt.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Das Steam-Cracking gilt unabhängig vom Rohstoff als die BVT für die Herstellung von kurzkettigen Olefinen und von anderen Produkten. Dabei wurde in den letzten Jahren eine Anzahl von BVT-Maßnahmen zur Reduktion des Ressourceneinsatzes eingeführt (IPTS 2003, S. 186ff; Bowen 2007):

- Sehr hohe Standards sowohl für die Wärmerückgewinnung als auch für die Wärmeintegration der Rektifizierkolonnen gelten heute als BVT. Moderne Öfen besitzen Wärmewirkungsgrade von 92 bis 95 %.
- Als BVT gilt die Verwendung von nachweislich zuverlässigen Apparaturen für die Verwertung der früher abgefackelten Stoffe, mit dem Ziel die entsorgte Menge zu minimieren.

- Betriebsmanagementsysteme, die optimale Betriebspunkte fahren können, wurden entwickelt und konsequent umgesetzt.
- Analog werden Instandhaltungsstrategien entwickelt, die zum Ziel haben, die Herstellkosten zu minimieren. Steam-Cracker können mehrere Jahre ohne Unterbrechung betrieben werden. Durch Verringerung der An- und Abfahrvorgänge werden die Ressourcen minimiert.
- Moderne Steam-Cracker werden mit anspruchsvollen Prozessleitsystemen ausgestattet, bestehende ältere Anlagen werden nachgerüstet. Dadurch kann nicht nur die Sicherheit verbessert werden, sondern auch die Energieeffizienz (zum Einfluss eines modernen Prozessleitsystems siehe White 2009). Zu einem BVT-Prozessleitsystem gehören beispielsweise Online-Optimierungsmodule, multivariable Regelungstechniken, Visualisierungsmodule usw.
- Die Kälteerzeugung wird durch mehrstufige Kältemaschinen verbessert.
- Moderne Kompressoren mit geringen internen Druckverlusten und hohem Wirkungsgrad tragen auch zur Energieeffizienz bei. Ähnliches gilt für Dampfturbinen.

Weitere Maßnahmen wurden vorgeschlagen, sind aber noch nicht als BVT anerkannt, z. B.:

- Die Integration einer Gasturbine hat den Vorteil, dass sowohl Strom als auch Wärme auf hohem Temperaturniveau bereitgestellt werden. Die Abgase aus der Turbine werden für die Aufwärmung des Einsatzstoffes eingesetzt. Die Energieersparnis soll bei 3 GJ/t Ethylen liegen. Diese Technologie hat noch keine breite Anwendung gefunden. (Worrell et al. 2007, S. 43; Bowen 2007).

Die oben genannten Maßnahmen haben unterschiedliche Energieeinsparpotenziale mit jeweils verschiedenen Kosten pro eingesparter Energieeinheit im Jahr. Die Wärmerückgewinnung gilt als die kostengünstigste Maßnahme mit einem relativ hohen Energieeinsparpotenzial. Sie wird regelmäßig als erstes in Angriff genommen. Die Wärmeintegration der Rektifizierkolonnen erfordert eine wesentlich höhere Investition, die Energieeinsparpotenziale sind aber auch wesentlich höher. Moderne Prozessleitsysteme folgen hinsichtlich Kosten und Energieeinsparpotenziale. Die Integration einer Gasturbine hat die höchsten Kosten und das höchste Energieeinsparpotenzial unter den genannten Maßnahmen (vgl. Arroyo Curras 2010, S. 36ff). Die Implementierung dieser Maßnahmen in bestehende Anlagen hängt von vielen Faktoren ab, wie beispielsweise von der Platzverfügbarkeit, den Design-Merkmalen der Anlage usw. Arroyo Curras gibt konkrete Zahlen für die Kosten und die Einsparpotenziale an. Danach kann man 0,1 – 0,3 GJ/t Ethylen durch Wärmerückgewinnung, 0,15 GJ/t Ethylen durch Wärmeintegration der Rektifizierkolonnen und 3 – 4 GJ/t Ethylen durch die Integration einer Gasturbine einsparen (Arroyo Curras 2010, S. 38). Diese Angaben sind als grobe Nä-

herung zu betrachten, da sie nicht die Rahmenbedingungen für die Anlage und den Standort berücksichtigen.

In der Fachliteratur wird über die weltweit besten Werte für den Energieverbrauch berichtet. Danach lag bei Naphtha-Crackern der Verbrauch an Brennstoff und Dampf im Jahre 1999 bei 10,0 GJ/t HVC (33,3 GJ/ t Ethylen) und bei Ethan-Crackern bei 11,5 GJ/t HVC (13,0 GJ/ t Ethylen) (Worrell et al. 2007, S. 41). Diese Werte lagen damals sehr dicht bei den BVT-Werten, da sie von neu errichteten Anlagen stammen dürften. Sie liegen heute wegen der Weiterentwicklung der Technologie niedriger. In anderen Quellen werden noch niedrigere Werte genannt, so z. B. 18 – 25 GJ /t Ethylen für neue Cracker-Anlagen auf Naphtha-Basis (Ren, Patel, Blok 2006, S. 9).

Die oben dargestellte unsichere Situation für die Folgeprodukte der kurzkettigen Olefine, der C4-Schnitte und der Aromaten führen dazu, dass zurzeit die Errichtung von neuen Steam-Crackern in Deutschland als unwahrscheinlich erscheint. Sollte aus Altersgründen doch ein Ersatz notwendig sein, wird sich die Frage des Standortes für ganz Westeuropa stellen. Da die großen Chemiestandorte durch ein Pipelinenetzwerk miteinander verbunden sind, bietet sich an, eine World-Scale-Anlage mit höchster möglicher Ressourceneffizienz an einem europäischen Standort zu errichten und die überschüssigen Produkte durch das Pipelinenetz zu anderen Standorten zu transportieren. Dieser Standort muss aber nicht unbedingt in Deutschland sein. Die Frage des Ersatzes für einen bestehenden Steam-Cracker stellt sich dann, wenn die Anlage durch die höheren Instandhaltungskosten und den schlechteren Wirkungsgrad nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden kann.

Der Stand der Steam-Cracker in Deutschland ist hinsichtlich Alter, Kapazität und eingesetzter Technologie und damit des spezifischen Energieverbrauchs sehr unterschiedlich (siehe Kapitel 3.2.1.4). Die meisten von ihnen wurden in den 70er und 80er Jahren errichtet. Der Altersdurchschnitt dürfte bei ca. 35 Jahren liegen. Einige von ihnen sind bereits 50 Jahre alt. Die reale Anlagenlebensdauer von Steam-Crackern wird auf 50 –70 Jahre geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung.

CEFIC hat Informationen zum Ressourcenverbrauch der bestehenden Steam-Cracker von ihren Mitgliedern eingeholt, die eine anonymisierte Analyse der gesamten Ethylen-Herstellung erlaubt. Ein Vergleich der einzelnen Anlagen miteinander ist aber wegen der verschiedenen Rohstoffe, der unterschiedlichen Wärmeintegrationsgrade sowie der unterschiedlichen Kapazitäten und des Alters der Anlagen problematisch. Es kommt dazu, dass bei einem Vergleich auch alle eingesetzten Brennstoffe, der Dampfimport

bzw. -export und der Stromverbrauch bzw. die -erzeugung berücksichtigt werden müssen (IPTS 2003, S. 170).

Steam-Cracker in Deutschland werden immer wieder modernisiert. Meistens waren die Ziele der Modernisierung eine Kapazitätserweiterung, die Flexibilisierung der Anlagen hinsichtlich des Einsatzstoffes sowie eine Verbesserung der Sicherheit und des Umweltschutzes. Beispiele für die Flexibilisierung der Anlagen ist der Einsatz von C3–C4-Gemischen anstelle von C2-Einsatzstoffen. Nur in wenigen Fällen ist das Ziel der Modernisierung die Steigerung der Energieeffizienz. Die Anlagen wurden außerdem mit modernen Prozessleitsystemen ausgestattet (IPTS 2003, S. xi). Auch Verschleißteile müssen oft ausgetauscht werden. Dabei ist die Lebensdauer der verschiedenen Anlagensektoren unterschiedlich. Der Bereich des Pyrolyseofens unterliegt schweren Betriebsbedingungen. Öfen haben oft eine Lebensdauer von 20 – 30 Jahren. Auch die Kompressoren werden ausgetauscht bzw. modernisiert. Dagegen weist der größte Teil des Trennsektors eine hohe Lebensdauer von bis zu 50 Jahren auf (IPTS 2003, S. 149).

Dadurch ist die Energieeffizienz gegenüber dem ursprünglichen Zustand wesentlich gestiegen. Man schätzt, dass modernisierte Anlagen einen bis zu 30 % besseren Wirkungsgrad aufweisen als 30 Jahre alte Anlagen. Neue, moderne Anlagen haben jedoch einen noch besseren Wirkungsgrad, der um 50 % höher liegen dürfte als der von nicht modernisierten Anlagen aus den 70er Jahren (vgl. Bowen 2007). Ältere noch nicht intensiv modernisierte Anlagen sowie Anlagen an Standorten mit geringer Wärmeintegration besitzen dabei bedeutende Energieeinsparpotenziale.

Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen kaum zu erwarten. Dafür werden aber die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würde mindestens eine Anlage in Westeuropa errichtet, die bestehende Anlagen ersetzt, wenn das Durchschnittsalter im Jahre 2025 die Grenze von 60 Jahren überschritten hat.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Ethylen-Herstellung werden in Tabelle 3-38 zusammengefasst.

Tabelle 3-38: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Ethylen

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierend bzw. leicht ansteigend
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Begrenzt Möglich
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Unbedeutend
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Steigender Anteil der gasförmigen Kohlenwasserstoffe
Mögliche Brennstoffsubstitution	In bestimmten Fällen möglich
BVT für den Prozess heute	Steam-Cracker, aktuelle Generation
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	Für Naphtha, gasförmige Kohlenwasserstoffe und Gasöl: 17 – 50 Jahre, Durchschnitt 35 Jahre
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	50 – 70 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Bis Ende des Untersuchungszeitraumes möglich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Bei der Errichtung neuer Steam-Cracker gibt es folgende Hemmnisse:

- Unsicherheiten bestehen hinsichtlich der Zukunft der Folgeprodukte von Steam-Crackern in Deutschland. Die internationale Konkurrenz wird bei Massenkunststoffen immer größer. Erdöl- und erdgasproduzierende Länder sind im Vorteil bedingt durch den Zugang zu billigen Rohstoffen. Dies gilt vor allem für die Herstellung von kurzkettigen Olefinen auf Basis von gasförmigen Kohlenwasserstoffen.
- Die Errichtung von neuen Anlagen ist wegen der sehr hohen Investitionen mit großen Risiken verbunden. Man ist nur dann bereit in einen neuen Steam-Cracker zu investieren, wenn der Absatz mit großer Wahrscheinlichkeit gesichert ist.

Der Modernisierung von bestehenden Steam-Cracker stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Zu den technischen Grenzen gehört beispielsweise der enge Raum in den Anlagen, der keine großen Modifikationen erlaubt.
- Maßnahmen zur Einsatzstoff-Flexibilität und Minderung der Emissionen führen nicht unbedingt zur Steigerung der Energieeffizienz.

3.3.2.5 Industrieruß

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Die Herstellung von Industrieruß hängt stark von der Automobilindustrie ab, da weltweit ca. 65 % davon in die Reifenherstellung gehen. Weitere 30 % werden für andere Gummiprodukte verwendet (IPTS 2007c, S. 203).

Man bemüht sich den Industrieruß bei der Reifenherstellung durch andere effektivere Materialien zu ersetzen. Als Beispiel hierzu ist Siliziumdioxid zu erwähnen, das zu einem geringeren Treibstoffverbrauch durch Verringerung der Reibung beitragen kann und unter der Bezeichnung „grüne Reifen“ läuft. Die Material- und Verarbeitungskosten liegen noch immer wesentlich höher als bei Industrieruß (IEA 2007, S. 78). Es wird trotzdem darüber berichtet, dass die „grünen Reifen“ inzwischen Marktanteile von bis zu 25 % erreicht haben (Enviros Consulting 2006, S. 8). Wann der Industrieruß für die Reifenindustrie und ob überhaupt durch Konkurrenzprodukte verdrängt wird, ist noch offen. Die Gewinnung von Industrieruß aus recycelten Reifen wird auch diskutiert. Sollte sie im großen Stil umgesetzt werden, wird der Bedarf an Industrieruß bedeutend sinken. Im Idealfall wird die Entwicklung des Bedarfs an Industrieruß in Deutschland analog zur Autoproduktion verlaufen. Da der Automarkt gesättigt ist, die Haltbarkeit der Reifen ständig verbessert wird und der öffentliche Verkehr wahrscheinlich zunehmen wird, ist eine Stagnation beim Bedarf anzunehmen.

Gleichzeitig wächst die internationale Konkurrenz, vor allem beim Reifenruß. Industrieruß wird zwar in der Regel in der Nähe der verbrauchenden Reifenindustrie platziert, da er in Silofahrzeugen transportiert werden muss, wodurch relativ hohe Transportkosten entstehen. Jedoch ist es denkbar, dass Industrieruß in Zukunft nach Westeuropa exportiert wird.

Kleinere Mengen (ca. 10 %) hochwertigen Industrierußes werden in der Farben- und Lackindustrie eingesetzt. Diese Anwendung wird konkurrenzlos bleiben. Der Verbrauch an Farbenruß wird mit dem wirtschaftlichen Wachstum ansteigen. Ein Produktersatz dafür ist nicht in Sicht. Beim Druckerruß ist ein ähnliches Wachstum zu erwarten. Dies gilt trotz der zunehmenden Digitalisierung.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Mit einer Prozesssubstitution für den Reifenruß ist kaum zu rechnen. Eine Verlagerung von einem Rohstoff auf den anderen, abhängig von Rohstoffpreis und -verfügbarkeit, ist jedoch denkbar. Das Gleiche gilt für Farben- und Druckerruß. Die Verwendung ei-

nes Plasmaofens für die Pyrolyse wird immer wieder vorgeschlagen, hat sich aber nicht durchgesetzt.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Als BVT gelten folgende Maßnahmen zur Herstellung von Industrieruß (IPTS 2007c, S. 225ff):

- Das Abgas aus dem Ofen, das noch Methan, Kohlenmonoxid, Wasserstoff usw. enthält, wird thermisch verwertet. Die Abwärme wird beispielsweise für die Trocknung des Produktes, für das Aufwärmen der Einsatzstoffe und der Luft und/oder für die Erzeugung von Dampf ausgenutzt. Dabei ist der Wärmegehalt des Abgases vom Rohstoff abhängig. In einigen Fällen ist das Wärmeäquivalent des Abgases begrenzt. Überschüssige Energie kann an andere Anlagen am Standort abgegeben werden.
- Eine KWK kann mit dem Abgas aus dem Ofen betrieben werden. Dies setzt allerdings ein hohes Wärmeäquivalent des Abgases voraus. Der überschüssige Strom wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist.
- Moderne Prozessleitsysteme helfen dabei, die Betriebsbedingungen im Ofen konstant einzustellen.
- Die Verwendung von Gewebefilter kann den Energieverbrauch in der Ruß-Trenneinheit reduzieren.

Der Ersatz von bestehenden Anlagen für Reifenruß ist aufgrund möglicher Alternativprodukte zurzeit unwahrscheinlich. Für die anderen Gummiprodukte sowie für die Farben- und Druckindustrie ist ein Anlagenersatz denkbar, hängt aber, vor allem bei anderen Gummiprodukten, von der internationalen Wirtschaftsentwicklung ab. Dabei wird die reale Lebensdauer von Industrieruß-Anlagen auf 40 bis 60 Jahre geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung.

Die Industrieruß-Anlagen in Deutschland wurden regelmäßig modernisiert. Ziele der Modernisierungsmaßnahmen sind in der Regel, die Qualität zu verbessern, neue Produkte herzustellen sowie die Emissionen und den Energieverbrauch weiter zu reduzieren. So verfügen alle drei Anlagen über KWK auf Basis des Restgases und liefern Strom und Wärme an externe Abnehmer. Ein Wirkungsgrad der KWK von bis 80 % kann erreicht werden. Die Standorte Hürth-Kalscheuren und Dortmund verfügen zusätzlich über eine Abgasverbrennung (IPTS 2007c, S. 223 und S. 237). Außerdem wird die in den Ofen eingeführte Luft durch das Produkt vorgewärmt. Die Reduktion von Emissionen, z. B. von NO_x und SO_x, ist aber mit zusätzlichem Energieverbrauch verbunden.

Der Realisierungsanteil der oben genannten BVT-Maßnahmen wird heute als sehr hoch geschätzt. Damit sind die Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz begrenzt. Im Szenario Marktdiffusion aber auch im Szenario technische Diffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen für Reifenruß kaum zu erwarten.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Herstellung von Industrieruß werden in Tabelle 3-39 zusammengefasst.

Tabelle 3-39: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Industrieruß

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierend bei Reifenruß Wachstum bei Industrieruß für andere Gummianwendungen sowie für Farben und Lacke
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Ersatz bei Reifenruß durch alternative Stoffe Kaum
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Kaum
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Begrenzt
Mögliche Brennstoffsubstitution	Bei allothermen Prozessen möglich
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	-
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	40 – 60 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes möglich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Weitere Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Hoch Hoch

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Der Errichtung von neuen Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Aus den oben genannten Gründen besteht eine Unsicherheit über die Zukunft des Reifenrußes, sodass die Errichtung von neuen Anlagen bzw. ein Anlagenersatz für diesen Zweck zunächst als unwahrscheinlich erscheint.

Bei bestehenden Anlagen gibt es folgende Hemmnisse bei der Umsetzung der Energieeinsparmaßnahmen:

- Die Reduktion von Emissionen, z. B. von NO_x und SO_x, ist ein wichtiges Ziel bei der Herstellung von Industrieruß, sie ist jedoch mit zusätzlichem Energieverbrauch ver-

bunden. Die Reduktion der Emissionen kann außerdem eine noch bessere Ausnutzung der Abwärme im Abgas verhindern.

- Die Qualität der Produkte steht im Vordergrund. Dadurch ergeben sich Grenzen für die Energieeffizienz.
- Standortwärmeintegration ist an kleineren, isolierten Standorten schwieriger zu realisieren. Damit bestehen Grenzen für die Ausnutzung der Abgaswärme.

3.3.2.6 Methanol

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Methanol wird überwiegend zu Formaldehyd, MTBE, Essigsäure, Methylmethacrylat und Dimethylterephthalat weiterverarbeitet. Formaldehyd mit einem stabilen Bedarf und mit fast einem Drittel des Verbrauchs ist das Hauptfolgeprodukt. MTBE, der dem Benzin als Oktanzahlverbesserer zugesetzt wird, wird mit steigender Produktion des Ethanols auf Biomassebasis durch ETBE teilweise ersetzt. In Deutschland soll durch das Biokraftstoffquotengesetz (BioKraftQuG) der Anteil des Biokraftstoffes bis 2015 auf 8 % steigen. Die Diskussion über das Verbot von MTBE als Oktanzahlverbesserer in den USA hat allerdings in Europa kaum Auswirkungen gezeigt. Der Bedarf für die anderen Folgeprodukte des Methanols wird wahrscheinlich im selben Maße wie die wirtschaftliche Entwicklung wachsen. Insgesamt wird also der Bedarf an den Folgeprodukten konstant bleiben bzw. bei einer positiven Entwicklung der chemischen Industrie leicht ansteigen. In den 10 Jahren vor dem Basisjahr 2007 ist die Methanol-Produktion um ca. 8 % gestiegen (VCI 2008a, S. 15). Eine Extrapolation dieser Entwicklung in die Zukunft bestätigt die Annahme eines leicht ansteigenden Bedarfs.

Diese Prognose kann sich jedoch ändern, wenn, wie vielfach vorgeschlagen wurde, Methanol als Energieträger verwendet wird (siehe z. B. Olah, Geoppert, Prakash 2006; Forschungszentrum Jülich 2003). In diesem Fall könnte Methanol in Deutschland aus Biomasse oder Kohle hergestellt werden (siehe unten). Versuche, Methanol dem Benzin beizumischen, sind bis heute ohne großen Erfolg geblieben. Eine größere Chance gilt aber für die Verwendung in Brennstoffzellen. Methanol hat den Vorteil gegenüber Erdgas, dass es sich besser transportieren und lagern lässt. Außerdem könnte Methanol in Dimethylether umgewandelt werden, das als Treibstoff für Gasturbinen bzw. für Diesel-Motoren eingesetzt wird. Ferner kann Methanol in Olefine (Gas To Olefins: GTO) bzw. in Treibstoffe (Gas To Liquids: GTL bzw. Methanol To Gasolin, MTG) umgewandelt werden. Die letztgenannten Prozesse sind aber heute unter deutschen Rahmenbedingungen unwirtschaftlich.

Jedoch ist die internationale Konkurrenz bei der Methanol-Herstellung sehr stark. Methanol wird an erdgasreichen Standorten in größeren Mengen hergestellt. Es kann in Spezialtankern auch über größere Distanzen preiswert transportiert werden. Diese Tatsachen führen zu Unsicherheiten über die Zukunft der Methanol-Industrie in Deutschland. Ein wichtiger Vorteil für die Methanol-Produktion in Deutschland stellt aber die Tatsache dar, dass fast zwei Drittel der Produktion auf Destillationsrückstand basieren, der aufgrund seines niedrigen Preises die Herstellkosten weniger belastet. Außerdem ist er besser dafür geeignet, das gewünschte Verhältnis von H_2 zu CO zu erzielen. Dagegen werden erdgasbasierte Anlagen bei steigenden Erdgaspreisen mittelfristig benachteiligt sein. Für die deutschen Standorte spricht generell die hohe Prozess- und Standortwärmeintegration.

Eine weitere Unsicherheit liegt in der Einführung einer Benchmark für Methanol-Anlagen, die die Rohstoffbasis nicht berücksichtigt. In diesem Fall wären die Methanol-Anlagen auf Basis von schweren Erdölen und Destillationsrückstand stark benachteiligt. Wenn die oben genannten neueren Anwendungen nicht eintreten, ist aus den oben genannten Gründen mit einer Stagnation bzw. einem Rückgang der Methanol-Produktion zu rechnen

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Die Herstellungsprozesse für Methanol sind etabliert. Die Synthesegas-Herstellung wurde im Zusammenhang mit dem Ammoniak besprochen. Bei der Methanol-Synthese haben sich in den letzten Jahren die Niederdruck- und die Mitteldruck-Synthese immer mehr durchgesetzt.

Als innovatives Verfahren gilt die von Lurgi entwickelte MegaMethanol-Technologie mit autothermem Reforming und hoher Wärmeintegration. Sie ist im Ressourcenverbrauch eindeutig überlegen, jedoch nur für große Kapazitäten > 5.000 t/d wirtschaftlich (siehe Lurgi 2006). Langfristig könnten kleinere, ältere Anlagen geschlossen und durch eine größere mit effizienterer Technologie ersetzt werden.

Über den Bau von Methanol-Anlagen auf Kohlebasis wird in Europa immer wieder diskutiert. Der Energieverbrauch ist auch bei modernen Anlagen mit 35 GJ/t (IEA 2007, S. 73) noch relativ hoch. Das Haupthindernis in Europa ist aber zurzeit die geringe Wirtschaftlichkeit gegenüber anderen Rohstoffen. Die Investitions- und Betriebskosten sind höher, bedingt durch die aufwändige Aufbereitung der Kohle und die Nachbehandlung des Synthesegases. Die CO_2-Bilanz ist auch schlechter als bei Konkurrenzrohstoffen.

Außerdem wurde Biomasse als Rohstoff vorgeschlagen. Sie kann aber noch nicht mit Erdgas und Raffinierückstand konkurrieren. Dabei gelten ähnliche Überlegungen wie bei der Herstellung von Ammoniak (siehe Kapitel 3.3.2.2).

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Bei der Herstellung von Synthesegas gelten ähnliche Überlegungen wie bei der Herstellung von Ammoniak mit dem Unterschied, dass das Synthesegas eine andere Zusammensetzung haben muss (siehe Kapitel 3.2.1.2).

Bei der Methanol-Synthese gelten heute die Niederdruck- und Mitteldruck-Synthesen mit folgenden Energieeffizienz-Steigerungsmaßnahmen als BVT:

1. Einsatz verbesserter Katalysatoren
2. Höhere Wärmeintegration
3. Einsatz von dampfgetriebenen Kompressoren.

Es ist aber zurzeit wegen der oben beschriebenen Unsicherheiten ungewiss, wann und ob eine Methanol-Anlage in Deutschland errichtet wird. Dabei wird die reale Lebensdauer von Methanol-Anlagen auf 40 – 60 Jahren geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung.

Der BVT-Gesamtenergieverbrauch auf Erdgasbasis (energetisch und nicht-energetischer Verbrauch) liegt bei 28,5 GJ/t Methanol (IEA 2007; Lurgi 2006).

Die meisten Methanol-Anlagen in Deutschland sind älter als 30 Jahre. Sie wurden immer wieder modernisiert und weisen bereits einen hohen Wärmeintegrationsgrad auf. Außerdem sind sie oft am Standort integriert. Man kann erwarten, dass die bestehenden Anlagen, soweit es technisch möglich ist, weiter modernisiert werden. Die Methanol-Anlage auf Basis von Klärschlamm wurde erst vor 14 Jahren errichtet und gilt als modern. Größere Maßnahmen zur Energieeffizienz werden demnächst bei dieser Anlage nicht erwartet.

Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen kaum zu erwarten. Dafür werden aber die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen fortgesetzt. Auch im Szenario technische Diffusion ist die Errichtung einer neuen Anlage unwahrscheinlich.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Methanol-Herstellung werden in Tabelle 3-40 zusammengefasst.

Tabelle 3-40: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Methanol

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierende bzw. rückläufige Produktion, wenn keine neuen Anwendungen zustande kämen.
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Begrenzte Produktsubstitution: ETBE statt MTBE Möglicher Einsatz als Energieträger bzw. Treibstoff
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Trend zu größeren Anlagen, z. B. Mega-Methanol
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Biomasse und Kohle
Mögliche Brennstoffsubstitution	Steam-Reforming: keine Partielle Oxidation: Verwendung von leichteren KW
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	Steam-Reforming: 36 Jahre Partielle Oxidation: 33 Jahre Vergasung von Klärschlamm: 14 Jahre
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	40 – 60 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes möglich, wenn neue Anwendungen zustande kämen.
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Der Errichtung neuer Methanol-Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Es herrscht durch starke internationale Konkurrenz eine große Unsicherheit über die Zukunft der Methanol-Produktion in Deutschland. In den rohstoffreichen Ländern haben Produzenten Zugang zu billigen Rohstoffen, vor allem Erdgas. Ob neuere Anwendungen zum Zuge kommen, ist noch ungewiss.

Der Modernisierung von bestehenden Methanol-Anlagen stehen oft technische Gründe entgegen:

- Auf kleineren, weniger integrierten Standorten sind die Potenziale für Standortwärmeintegration begrenzt.
- Unsicherheit besteht durch die mögliche Einführung einer Benchmark für Methanol-Anlagen, die die Rohstoffbasis nicht berücksichtigt. In diesem Fall würden die Methanol-Anlagen auf Basis von schweren Erdölen und Destillationsrückstand benachteiligt.

· Es bestehen analog zur Herstellung von Ammoniak technische Grenzen beim Synthesegas-Prozessabschnitt.

3.3.2.7 Salpetersäure

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Salpetersäure wird zu mehr als 80 % im Düngemittelsektor, vor allem für die Herstellung von Ammoniumnitrat und Kalkammonsalpeter sowie für den Aufschluss von Rohphosphaten zur Herstellung von NP- bzw. NPK-Düngern, eingesetzt (Winnacker-Küchler 2005, S. 251). Dabei gilt Kalkammonsalpeter als das wichtigste N-Düngemittel in Deutschland. Die Entwicklung des N-Düngemittelsektors wurde bereits in Kapitel 3.3.2.2 besprochen. Die wichtigsten technischen Anwendungen der Salpetersäure sind die Herstellung von Adipinsäure, von Explosivstoffen und von organischen Zwischenprodukten, wie Caprolactam.

Sowohl Ammoniumnitrat und Kalkammonsalpeter als auch NPK-Dünger sind in Deutschland etabliert, und es ist nicht zu erwarten, dass sie durch andere Produkte zum wesentlichen Teil ersetzt werden. Der Einsatz von Harnstoff wächst jedoch auf Kosten anderer N-Dünger und hat auf N bezogen im Jahre 2008/09 einen Anteil von 27 % erreicht. Dieser Anteil könnte in den nächsten Jahren wegen des hohen N-Gehalts und der einfacheren Handhabung weiter wachsen. Insgesamt ist aber der Bedarf an N-Dünger rückläufig. Auch die P-Dünger gehen zurück. So hat sich ihr Absatz in wenigen Jahren fast halbiert, der im Jahre 2008/09 174 kt (bezogen auf P_2O_5) erreicht hat (www.iva.de, abgelesen am 11.8.2010; IVA 2009). Daher wird der Absatz von Salpetersäure für die Herstellung von Düngemitteln stagnieren bzw. zurückgehen.

Bei den technischen Anwendungen ist dagegen ein Wachstum zu erwarten. Die Entwicklung der Adipinsäure wird in Kapitel 3.3.2.1 besprochen. Andere technische Entwicklungen sind ähnlich zu beurteilen.

Die Salpetersäure-Produktion ist in den fünf Jahren vor dem Basisjahr 2007 deutlich gestiegen (IVA 2009, S. 15). Wegen des geringen Wertes der Salpetersäure und des schwierigen Transportes sind Importe aus rohstoffreichen Ländern kaum zu erwarten. Jedoch werden wahrscheinlich mehr Düngemittel importiert. Insgesamt wird der Bedarf an Salpetersäure und damit die Produktion in Deutschland, abhängig von den Rahmenbedingungen, stagnieren oder zurückgehen.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Eine Alternative zum Ostwald-Prozess ist nicht vorhanden. Damit bleibt Ammoniak als Rohstoff für die Salpetersäure-Produktion erhalten.

Der Trend geht aber weltweit zu M/H- und H/H-Anlagen, um das Problem der NO_x-Emissionen zu lösen. Jedoch ist ein höherer Druck mit einer geringeren Ausbeute verbunden. Um dies zu kompensieren, arbeitet man dann bei höheren Temperaturen. Diese Anlagen sind aber mit einem höheren Energieverbrauch und höheren Verlusten der Platin-Katalysatoren verbunden. Außerdem steigt der N_2O-Anteil leicht an. In Deutschland arbeiten inzwischen viele Anlagen im M/M-, M/H- und H/H-Druckbereich. N/N-Anlagen existieren kaum noch. Die meisten wurden inzwischen umgerüstet.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Der Ostwald-Prozess gilt hinsichtlich des Energieverbrauchs als BVT. Die Energieeffizienz ist besonders hoch, wenn der überschüssige Dampf anderweitig am Standort Verwendung findet. Dabei ist der Energieüberschuss vom Zustand der Anlage abhängig (siehe Tabelle 3-41 sowie Kapitel 3.2.1.7).

Tabelle 3-41: Energieverbrauch bei Salpetersäure-Anlagen

Anlage	**Energieüberschuss für 100%ige HNO_3 (GJ/t)**
Moderne M/H-Anlage	2,4 als Hochdruckdampf
Durchschnittlicher Energieüberschuss in europäischen Anlagen	1,6
Beste Anlagen vor 30 Jahren	1,1

Quelle: IPTS 2007b, S. 99; Wiesenberger 2001

Der Ostwald-Prozess gilt auch als BVT im Bezug auf die THG-Emissionen, wenn er mit Maßnahmen zur Reduktion der N_2O-Emissionen kombiniert wird, sodass die gewünschten Emissionswerte erreicht werden können. Dabei können die Maßnahmen zur Reduktion der N_2O-Emissionen in primäre, sekundäre und tertiäre Maßnahmen unterteilt werden (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 13; Wiesenberger 2001, S. 12):

1. Bei den primären Maßnahmen handelt es sich um Modifikationen in der Ammoniak-Oxidationsstufe mit dem Ziel, die N_2O-Bildung zu reduzieren. Dadurch kann eine Verminderung von 30 – 40 % erreicht werden (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 13). Die alleinige Anwendung dieser Modifikationen gilt nicht als BVT, da sie die N_2O-Emissionen nur auf ca. 3 kg N_2O pro t HNO_3 senken kann (Entec 2008, S. 12). Zu dieser Gruppe gehören beispielsweise folgende Maßnahmen:
   - eine ausreichende Versorgung mit Luft bei den Oxidationsstufen und bei dem Absorber (UBA 2001a, S. 34). Dadurch erreicht man eine Optimierung des Luft/Ammoniak-Verhältnisses,

- Verbesserung des Reaktors und Festlegung eines optimalen Austauschzyklus für den Katalysator.

2. Bei den sekundären Maßnahmen handelt es sich um die Entfernung des bereits gebildeten N_2O-Gases nach der Ammoniak-Oxidation. Zwei Methoden sind gebräuchlich: die homogene Zersetzung und die hochtemperatur-katalytische Reduktion. Bei der ersten Methode wird die N_2O-Reduktion durch eine Verlängerung der Verbrennungskammer zwischen dem Katalysator und dem Wärmetauscher erreicht. N_2O-Emissionen von 2 – 3 kg N_2O pro t HNO_3 sind möglich. Sie eignet sich besser für neu zu errichtende Anlagen. Die Investitionskosten sind dann relativ gering. Für bestehende Anlagen sind die Kosten für den Umbau unverhältnismäßig hoch (siehe auch Entec 2008, S. 13; IPTS 2007b, S. 121). Bei der zweiten Methode wird das N_2O durch einen selektiven Sekundärkatalysator zersetzt, der direkt hinter dem Platinnetz angebracht ist. Dadurch können die N_2O-Emissionen unter 2,5 kg N_2O/ t HNO_3 reduziert werden. Verschiedene Anlagenhersteller und Technologieentwickler bieten Lösungen hierzu an (siehe Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 13; IPTS 2007b, S. 123). Die oben genannten Werte liegen noch immer höher als der Grenzwert in der TA Luft vom 24. Juli 2002 für bestehende Anlagen von maximal 1,85 kg N_2O pro t HNO_3. Diese Vorschrift tritt im Jahre 2010 in Kraft. Einige europäische Betreiber von Salpetersäure-Anlagen geben niedrigere Emissionswerte an, die sie durch den Einsatz von sekundären Maßnahmen erreichen konnten (vgl. Entec 2008, S. 9). Damit muss von Fall zu Fall überprüft werden, ob die sekundären Maßnahmen alleine die oben genannten Grenzwerte erfüllen können.

3. Bei den tertiären Maßnahmen wird das N_2O im Abgas durch selektive oder nichtselektive Verfahren (SCR bzw. NSCR) zersetzt (IPTS 2007b, S. 123ff). Das NSCR-Verfahren, das ursprünglich für die Reduktion der NO_x-Emissionen entwickelt wurde, hat als positiven Nebeneffekt die Verringerung der N_2O-Emissionen. Es hat einen hohen Energieverbrauch. Außerdem sind die Methan-Emissionen beachtlich. Daher wird es nicht als BVT anerkannt (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 18). Das SCR-Verfahren gilt dagegen als BVT. Es erfordert eine Abgastemperatur von über 400 °C. Der Abgasstrom muss eventuell aufgeheizt werden. Es eignet sich wegen des Druckabfalls nicht für N/N-Anlagen. Außerdem steht bei bestehenden Anlagen eventuell nicht genug Platz für die Abgasbehandlung zur Verfügung. Zudem kann die Energiebilanz negativ beeinflusst werden, sodass nicht mehr genug Antriebsenergie für die Kompressoren vorhanden ist (Entec 2008, S. 16). Die Entwicklung von Katalysatoren, die auch bei niedrigeren Temperaturen aktiv sind, könnte bei vielen Anlagen die Kosten der Abgasbehandlung wesentlich reduzieren.

   Zu diesen Technologien gehört auch die kombinierte Behandlung des NO_x und N_2O. Mit der EnviNOx® von Uhde, die zu den tertiären Maßnahmen gehört, kann nach Angaben des Anbieters bis zu 99 % der N_2O-Emissionen entfernt werden (siehe Uhde 2004; Uhde 2009b).

Zusätzlich zu den oben genannten konstruktiven Maßnahmen kann die Betriebsoptimierung zur Verminderung von N_2O-Emissionen beitragen (IPTS 2007b, S. 110ff; UBA 2001a, S. 34):

- Betrieb bei optimaler Auslastung (Durchsatz),
- Verringerung der N_2O-Emissionen bei An- und Abfahrvorgängen sowie bei ungeplanter Stilllegung,
- optimaler Austausch-Zyklus des Katalysators.

Die Kosten für die oben genannten Maßnahmen können sehr unterschiedlich sein. Sie sind bei neu zu errichtenden Anlagen deutlich geringer. In Tabelle 3-42 stehen einige Kostendaten zu den sekundären und tertiären Maßnahmen.

Tabelle 3-42: Kostendaten für sekundäre und tertiäre Maßnahmen für eine 1.000 t/d Salpetersäure-Anlage

Maßnahmen-Gruppe	**Kostenarten**	**Kosten (€/t HNO_3)**	**Bemerkungen**
Sekundäre katalytische Maßnahmen	Kapitalabhängige Kosten[44]	0,25	Einschließlich Katalysator und Umbau
	Betriebskosten	1,00	Betriebskosten für den Katalysatorersatz, das Recycling der verbrauchten Katalysatoren und den Produktionsausfall wegen technischer Probleme im Zusammenhang mit dem Katalysator
	Gesamtkosten	1,25	
Tertiäre katalytische Maßnahmen	Kapitalabhängige Kosten	0,50	Kapitalabhängige Kosten für den Katalysator und für den Produktionsausfall während der Errichtung der Abgasbehandlungsanlage
	Betriebskosten	0,50	Betriebskosten für den Katalysatorersatz und den Produktionsausfall während des Austauschs des Katalysators
	Gesamtkosten	1,00	

Quelle: Entec 2008, S. 22

Höhere Kosten werden in anderen Quellen mitgeteilt. Beispielsweise werden folgende Gesamtkosten für die sekundären Maßnahmen bzw. tertiären Maßnahmen genannt: 1,5 bis 2 €/t bzw. 5 €/t HNO_3 (Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 13) bzw. 1 –

44 Es werden eine Lebensdauer von 15 Jahren und ein Zinssatz von 4 % angenommen.

5 €/t HNO_3 (Jenssen 2007). Die Kosten können je nach Art der Anlage, Alter, Druckstufe und angestrebtem Wert der Emissionen stark variieren.

Die angestrebte Energieersparnis hängt also von der Höhe der Benchmark und dem Preis für die CO_2-Zertifikate ab. Als Beispiel wird hier der Grenzwert für die TA Luft und ein Preis für die CO_2-Zertifikate von 20 €/t CO_2-eq. zugrunde gelegt. Für diese Annahmen sind die genannten Maßnahmen auf jeden Fall wirtschaftlich (vgl. auch Entec 2008, S. 33ff).

Die Errichtung von neuen Salpetersäure-Anlagen ist zurzeit unwahrscheinlich. Ältere Niederdruck-Anlagen müssen eventuell mit der Einführung des Emissionshandels ersetzt werden, da sie für tertiäre Maßnahmen nicht zugänglich sind. Die TA-Luft vom 24. Juli 2002 legt die Grenze für neu zu errichtende M/M-, M/H- und H/H-Anlagen bei 0,12 – 0,6 kg N_2O pro t HNO_3 fest.

Die reale Lebensdauer von Salpetersäure-Anlagen wird auf 40 – 60 Jahre geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung. Einige Anlagen sind noch älter.

Einige wenige Salpetersäure-Anlagen in Deutschland sind modern, die Mehrzahl ist jedoch älter. Die meisten Anlagen sind mit primären und sekundären Maßnahmen und nur wenige mit tertiären Maßnahmen ausgestattet. Durch die geplante Einführung des Emissionshandels für die chemische Industrie der EU sind die Hersteller von Salpetersäure gezwungen, ihre Anlagen nachzurüsten oder stillzulegen, da durch den Zukauf von CO_2-Zertifikaten für die N_2O-Emissionen die Herstellkosten wesentlich belastet werden. Dies gilt, wenn die technischen Voraussetzungen bei den bestehenden Anlagen erfüllt sind. Dabei ist der N_2O-Reduktionsgrad eine wirtschaftliche Entscheidung, denn mit größer werdendem Reduktionsgrad steigen die Kosten potenziell. Die TA-Luft vom 24. Juli 2002 legt die Grenze für M/M-, M/H- und H/H-Anlagen für bestehende Anlagen bei 0,12 – 1,85 kg N_2O pro t HNO_3 fest.

Legt man einen mittleren Wert von 0,99 kg N_2O pro t HNO_3 als Basis für die Berechnung der Verringerung der N_2O-Emissionen und die Emissionen im Basisjahr 2007 zugrunde, dann ergibt sich ein Einsparpotenzial von 4.651 t N_2O/a bzw. 1,44 Mt CO_2-eq. t/a.

Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen kaum zu erwarten. Dafür werden aber die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würden ältere Anlagen durch neue ersetzt, um eine effektivere Abgasreinigung zu ermöglichen.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Salpetersäure-Herstellung werden in Tabelle 3-43 zusammengefasst.

Tabelle 3-43: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen und die THG-Emissionen für Salpetersäure

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierend bzw. rückläufig
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Sehr begrenzte Produktsubstitution Keine neuen Einsatzgebiete
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine Prozesssubstitution Verschiebung zu M/M-, M/H- und H/H-Anlagen
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Brennstoffsubstitution	Keine
BVT für den Prozess heute	M/H- oder H/H-Technologie
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	10 – 70 Jahre (Durchschnitt ca. 30 Jahre)
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	40 – 60 Jahre, in einzelnen Fällen noch höher
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes möglich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Wärmeintegration am Standort Einführung von primären Maßnahmen in Verbindung mit tertiären Maßnahmen (Abgasreinigung) für die Reduktion der N_2O-Emissionen
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration
Potenzial für die Verringerung der THG-Emissionen	Durch Abgasreinigung bzw. Abgasminderungstechnologie

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz von bestehenden Anlagen stehen einige Hemmnisse entgegen:

- Die Entwicklung der Stickstoff-Düngemittelindustrie in Deutschland ist mit einigen Unsicherheiten behaftet. Der Düngemittelmarkt ist in Westeuropa eher stagnierend, bedingt durch den geringeren Einsatz an Düngemittel in der Landwirtschaft. Die technischen Anwendungen der Salpetersäure können dies nicht kompensieren. Außerdem wurden in den letzten 20 – 30 Jahren große Kapazitäten für die Erzeugung von Stickstoff-Düngemittel in den rohstoffreichen Ländern errichtet, die mittelfristig eine Konkurrenz für die Stickstoff-Düngemittelindustrie in Westeuropa darstellen.
- Die Entwicklung des Emissionshandels und des Preises für CO_2-Zertifikate führen zu Unsicherheiten bei den zukünftig entstehenden Kosten, dadurch werden Entscheidungen zurückgestellt.

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Primäre und sekundäre Maßnahmen reichen oft nicht aus, um die Vorgaben der TA Luft vom 24. Juli 2002 von maximal 1,85 kg N_2O pro t HNO_3 zu erreichen.
- Die Verlängerung der Verbrennungskammer eignet sich hauptsächlich für neu zu errichtende Anlagen. Für bestehende Anlagen sind die Kosten unverhältnismäßig hoch und damit unwirtschaftlich.
- Tertiäre Maßnahmen sind für N/N-Anlagen wegen des Druckabfalls nicht geeignet.
- Die Katalysatoren für tertiäre Maßnahmen sind nur bei Temperaturen zwischen 400 – 600 °C aktiv. Einige Anlagen erfordern deshalb einen Umbau für diesen Zweck. Außerdem benötigt die Apparatur einen gewissen Platz, der eventuell bei bestehenden Anlagen nicht zur Verfügung steht. Die Energiebilanz kann zudem negativ beeinflusst werden, sodass nicht mehr genug Antriebsenergie für die Kompressoren vorhanden ist (Entec 2008, S. 16).
- Viele Betreiber von Salpetersäure-Anlagen haben bereits in primäre und sekundäre Maßnahmen investiert und sind zögerlich bei der Einführung von tertiären Maßnahmen. Außerdem können tertiäre Maßnahmen für nur wenige große Anlagen wirtschaftlich verwendet werden (EFMA-Kommentar zu Benchmarking nach Ecofys/ Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2009, S. 19).

3.3.2.8 Toluylendiisocyanat (TDI)

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Die Hauptfolgeprodukte des TDI, die Polyurethane, sind wichtige Polymere mit vielfältigen Einsatzgebieten und Entwicklungspotenzial. Fast 70 % der Polyurethane werden für die Herstellung von Schaumstoff eingesetzt. Alternativprodukte aus Naturstoffen oder anderen Polymeren stellen keine echte Konkurrenz dar. Allerdings wird wahrscheinlich Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat (MDI) schneller wachsen als TDI, bei dem statt TDA MDA verwendet wird. MDI kann TDI bei bestimmten Anwendungen ersetzen. Damit wird der Bedarf an TDI stabil bleiben und mit dem Wirtschaftswachstum Schritt halten.

Importe spielen kaum eine Rolle und werden wahrscheinlich nicht wachsen, sodass die Produktion an TDI ebenfalls mit der wirtschaftlichen Entwicklung Schritt halten wird. Extrapoliert man die Entwicklung in den letzten Jahren unter Berücksichtigung möglicher Entwicklung der Folgeprodukte, der Substitutionsmöglichkeiten und der Export/Import-Bilanz auf die Zukunft, wird die TDI-Produktion überproportional wachsen. Ein Hinweis darauf ist die für den Standort in Dormagen geplante Anlage von Bayer MaterialScience mit 300 kt/a, die die neue Gasphasen-Phosgenierung verwendet. Sie

soll die bestehenden Anlagen in Dormagen und Brunsbüttel im Jahre 2014 ersetzen und die Kapazität fast verdoppeln.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Die Einführung von phosgenfreien Prozessrouten wurde lange Zeit angestrebt, ist aber bis heute ohne konkretes Ergebnis geblieben. Da ein möglicher Erfolg nicht absehbar ist, wird diese Technologie nicht weiter betrachtet. Damit wird die Rohstoffbasis unverändert bleiben.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Bei der konventionellen Route ist die gesamte Produktionskette zur Herstellung von TDI das Ziel von Bemühungen zur Minderung des Energieverbrauchs. Im Folgenden werden diejenigen Maßnahmen aufgelistet, die als BVT gelten:

- DNT-Anlage: Chlorwasserstoff und Schwefelsäure werden wieder verwendet. Der Chlorwasserstoff wird in einer HCl-Elektrolyse-Anlage in Chlor und Wasserstoff gespalten und in den Prozess zurückgeführt (Bayer_Klimaschutz-Fragenkatalog, o.J.).
- Hydrierung: Die Wärme aus der exothermen Reaktion wird zurückgewonnen, ohne auf die optimale Ausbeute zu verzichten (IPTS 2003, S. 339).
- Phosgenierung: In diesem Zusammenhang ist die umweltfreundliche Gasphasen-Phosgenierung bei der Herstellung von TDI von Bayer MaterialScience zu erwähnen. Sie gilt als BVT (siehe oben). Dadurch wird der Energieverbrauch in dieser Stufe um 40 – 60 % reduziert (Valentino 2009). Sie wird zurzeit in zwei neuen Anlagen in China und Deutschland implementiert.
- Abgasverbrennung: Die Wärme aus der Abgasverbrennung wird ebenfalls zurückgewonnen. Dabei wird beispielsweise eine rekuperative Verbrennungsanlage eingesetzt (IPTS 2003, S. 339).

Durch den Bau der neuen Anlage in Dormagen mit einer Kapazität von 300 kt/a und der Schließung zweier Anlagen in Brunsbüttel und Dormagen, zusammen mit einer Kapazität von 160 kt/a, wird ab dem Jahr 2014 ein wesentliches Energieeinsparpotenzial erreicht.

Die reale Lebensdauer von TDI-Anlagen wird auf 35 Jahre geschätzt. Dies hängt sowohl von den Modernisierungsmaßnahmen als auch von einer intensiven Instandhaltung ab. Eine Alterung kann durch die Entwicklung neuer Technologien erfolgen.

Bei den beiden anderen Anlagen ist der Anteil der eingeführten Maßnahmen noch relativ gering, da keine Gasphasen-Phosgenierung implementiert wurde. Allerdings bestehen hier technische Grenzen, die mit dem Alter und der angewandten Technologie zu

tun haben. Im Szenario Marktdiffusion ist der Ersatz einer weiteren Anlage möglich. Außerdem werden die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würden weitere bestehende Anlagen ersetzt.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der TDI-Herstellung werden in Tabelle 3-44 zusammengefasst.

Tabelle 3-44: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für TDI

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Signifikantes Wachstum
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Kaum Möglich
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Gasphasen-Phosgenierung
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Brennstoffsubstitution	Keine
BVT für den Prozess heute	Gasphasen-Phosgenierung
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	-
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	35 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Neue Anlage mit 300 kt/a im Jahre 2014
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Gasphasen-Phosgenierung
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Der Errichtung von neuen Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Die in Dormagen geplante Anlage hat fast die doppelte Kapazität wie die zu ersetzenden Anlagen in Dormagen und Brunsbüttel. Dies würde den Bedarf für die nächsten Jahre befriedigen. Über einen noch längeren Zeithorizont bestehen über den Bedarf gewisse Unsicherheiten.

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Ältere Anlagen sind einer Modernisierung aus Gründen des Alters und der angewandten Technologie nicht zugänglich.
- Die Gasphasen-Phosgenierung gilt als proprietär.

3.3.3 Einsparpotenziale bei den anorganischen Prozessen

3.3.3.1 Chlor

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Chlor wird direkt oder indirekt zur Herstellung von fast 60 % der chemischen Produkte verwendet. Die größten Folgeprodukte sind PVC, chlorierte Lösemittel, Propylenoxid nach dem Chlorhydrin-Verfahren und anorganische Produkte, die zusammen über 80 % des Verbrauchs ausmachen. PVC wird wahrscheinlich leicht wachsen. Chlorierte Lösemittel werden eher stagnieren. Für Propylenoxid wurden bereits neue chlorfreie Routen (Direktoxidation) entwickelt, die inzwischen großtechnisch erfolgreich realisiert wurden. Neuere Anlagen für die Herstellung von Propylenoxid werden in Zukunft höchst wahrscheinlich ausschließlich die chlorfreien Prozesse anwenden. Bestehende Anlagen können nicht umgebaut werden. Sie werden solange weiter betrieben, bis sie wirtschaftlich nicht mehr konkurrenzfähig sind.

Eine lang diskutierte Substitution durch chlorfreie Folgeprodukte bzw. chlorfreie Herstellungsprozesse konnte, abgesehen von der Substitution des Chlorhydrin-Prozesses zur Herstellung von Ethylenoxid und Propylenoxid, nicht realisiert werden. Daher wird während des Betrachtungszeitraumes der Bedarf an Chlor in Deutschland abhängig von den Rahmenbedingungen stagnieren bzw. leicht ansteigen.

Das Nebenprodukt Natronlauge ist eines der wichtigsten anorganischen Produkte mit zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten. Wegen der starren Kuppelproduktion sind Chlor-Hersteller stark an konstantem Bedarf und an konstanten Preisen für die Natronlauge interessiert. Die Entscheidung über die Errichtung einer Chloralkalielektrolyse-Anlage hängt also auch von der Verwendung der Natronlauge ab. Während die Natronlauge als 50%ige Lösung oder als Schuppen bzw. Perlen auch über weite Strecken transportiert werden kann, muss das Chlor möglichst am Standort verbraucht werden. Das zweite Nebenprodukt, der Wasserstoff, fällt mit 28 kg pro t Chlor an (IPTS 2001, S. 7). Er wird in Deutschland meistens stofflich ausgenutzt.

Die Chlor-Produktion ist in den zehn Jahren vor dem Basisjahr 2007 um mehr als 40 % gestiegen (VCI 2008a, S. 14). Die Analyse der Folgeprodukte für den Betrachtungszeitraum bestätigt diesen Trend aber nicht. Eher kann man schlussfolgern, dass die Chlorproduktion in Deutschland je nach Rahmenbedingungen sich konsolidieren bzw. unter günstigen Rahmenbedingungen leicht ansteigen wird.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Wie in Kapitel 3.2.2.1 beschrieben, ist das Membran-Verfahren aus heutiger Sicht die BVT und wird bei neu zu errichtenden Anlagen ausschließlich verwendet (siehe z. B. Rothert 2005). Neben dem höheren Energieverbrauch bei Amalgam- und Diaphragma-Verfahren sprechen die Quecksilber-Emissionen beim erstgenannten Verfahren und die Asbest-Emissionen beim zweitgenannten Verfahren gegen ihren Einsatz. Die Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie wird weiter unten besprochen.

Eine Umrüstung der Amalgam-Anlagen auf Membran-Technologie könnte noch vor 2020 wirtschaftlich sinnvoll werden, wenn der Chlor-Bedarf am jeweiligen Standort für die Lebensdauer der geplanten Anlage feststeht und die durch den Anlagenersatz erzielte Energieersparnis die Differenz zwischen den kapitalabhängigen Kosten für die neue Anlage und den mit der Zeit zunehmenden Instandhaltungskosten überkompensiert. Bei einer solchen Betrachtung sind auch die Rahmenbedingungen am Standort zu berücksichtigen. Dazu gehören beispielsweise die Forderung an die Reinheit der Sole; denn das Membran-Verfahren verlangt eine höhere Reinheit als das Amalgam-Verfahren (siehe auch IPTS 2001, S. 91). Die Kosten für eine neue Anlage sind dabei standortspezifisch und abhängig von der geforderten Reinheit des Chlors und der Konzentration der Natronlauge. In IPTS 2001 sind Kostendaten, einschließlich der Investitionskosten, für die Umrüstung einer Amalgam-Anlage auf Membran-Technologie für das Jahr 1997 angegeben (S. 93).

Dabei erfordert die Umrüstung von bestehenden Amalgam-Anlagen auf moderne Membran-Technologie weniger Investitionen und Zeit als die Errichtung von neuen Anlagen, da man wesentliche Teile der ursprünglichen Anlage, wie Soleaufbereitung, elektrische Einrichtungen usw. übernehmen kann (IPTS 2001, S. 88ff). Das Umrüsten kostet dann nur 30 – 50 % einer neuen Anlage (Uhde, persönliche Mitteilung). Daten zur Lebensdauer von Elementen einer Membran-Anlage sind in Uhde 2008b angegeben.

Die Umrüstung einer Diaphragma-Anlage auf Membran-Technologie erfordert zusätzlich zur Umrüstung der Zellen die Errichtung von Prozessstufen für die Solereinigung und Soledechlorierung und eventuell für die Reinigung und die Aufkonzentrierung der Natronlauge. Die Natronlauge aus den in Deutschland in den 60er und 70er Jahren errichteten Diaphragma-Anlagen wird ohne Nachbehandlung weiter verwendet (siehe Kapitel 3.2.2.1). Diese Anlagen arbeiten besonders wirtschaftlich, wenn sie mit einer preisgünstigen Sole versorgt werden, die durch Aussolung einer Salzlagerstätte unmittelbar in der Nähe der Elektrolyse hergestellt wird (vgl. Winnacker-Küchler 2005, S. 497). Vergleicht man den Primärenergieverbrauch des Diaphragma-Verfahrens mit

dem des Membran-Verfahrens für diese Anwendungen, ist der Vorteil zugunsten des Membran-Verfahrens gering.

Inwieweit die neuen Umweltregelungen zu einem generellen Asbest-Verbot führen werden, ist noch offen. In diesem Fall könnten die bestehenden Diaphragma-Anlagen auf asbestfreie Diaphragmen umgerüstet werden. Diese weisen einen günstigeren Energieverbrauch als asbestbasierte Diaphragmen auf, aber einen höheren als beim Membran-Verfahren (IPTS 2001, S. 106). Die asbestfreien Diaphragmen basieren auf verschiedenen Polymeren, wie z. B. PTFE. Die Reinheit und die Konzentration der Natronlauge sind beim asbestbasierten und beim asbestfreien Diaphragma-Verfahren gleich hoch. Der Vorteil gegenüber einer Umrüstung auf Membran-Verfahren liegt darin, dass die Diaphragmen in bestehende Anlagen eingesetzt werden. Die Investitionskosten für die Umrüstung sind daher wesentlich geringer als auf Membran-Technologie (siehe auch IPTS 2001, S. 105). Die Betriebskosten sind aber in der Regel geringer als bei asbestbasierten Diaphragma-Anlagen. Der Hauptnachteil liegt darin, dass die Anschaffungskosten für die asbestfreien Diaphragmen um ein Vielfaches höher als asbestbasierten Diaphragmen sind. Diese Technologie wird heute in Deutschland nicht angewandt (siehe auch IPTS 2001, S. 101ff).

Außerdem wurde das Diaphragma-Verfahren weiter optimiert, sodass heutige Diaphragma-Anlagen wesentlich energieeffizienter sind als ältere Anlagen. Dazu gehören verbesserte Anoden, aktivierte Kathoden, Verringerung der Zellspannung und Verwendung des „Zero-Gap-Prinzips“ durch Auflegen der Elektroden direkt auf das Diaphragma usw. (vgl. Winnacker-Küchler 2005, S. 499).

Auch das Membran-Verfahren wird kontinuierlich weiterentwickelt, um den Energieverbrauch weiter zu reduzieren und die Produktqualität, vor allem der Natronlauge, zu verbessern. Dabei werden die Membran und der Abstand zwischen den Kathoden optimiert. Inzwischen wird die fünfte Membrangeneration angeboten. Die sechste Generation ist in der Entwicklung und soll 2011 auf den Markt kommen. Eine Umrüstung von älteren Membran-Anlagen, z. B. der ersten, zweiten und dritten Membrangeneration, auf die neueste Membrangeneration würde sich nach Aussage der befragten Experten unter Umständen lohnen.

Als eine ganz neue und innovative Technologie gilt die Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie, die von Bayer entwickelt wurde. Der Stromverbrauch ist um 30 % niedriger im Vergleich zum konventionellen Membran-Verfahren und um 50 % zum Amalgam-Verfahren. Allerdings wird der Wasserstoff vollständig verbraucht und steht nicht mehr zur Verfügung. Außerdem benötigt man kleinere Mengen an Sauerstoff. Dieser

reagiert mit dem produzierten Wasserstoff an der Kathode (Winnacker-Küchler 2005, S. 515; Bayer).

Die Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie ist unter dem Gesichtspunkt der hohen Energiepreise für Deutschland wirtschaftlich, wenn auf eine stoffliche Ausnutzung des Wasserstoffs verzichtet werden kann. Eine Anlage mit 20.000 t/a für die HCl-Elektrolyse wird zurzeit in Dormagen errichtet. Eine wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens findet man in Moussallem, Pinnow, Turek 2009 (Weiteres hierzu siehe Wittig 2010; Winnacker-Küchler 2005).

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Das Membran-Verfahren der neuesten Generation gilt als BVT. Die Errichtung von neuen Anlagen ist wegen der oben beschriebenen Situation zurzeit unwahrscheinlich. Realistischer ist der Ersatz von bestehenden Anlagen bzw. ihre Umrüstung. Eine Umrüstung auf Membran-Technologie kann durch eine positive Entwicklung der Grundstoffindustrie im Allgemeinen und der Chlorindustrie im Speziellen beschleunigt werden. Neben einem Konsolidierungsprozess geht der Trend hin zu größeren Anlagen und Stilllegung der kleinen Anlagen. Jedoch versucht man soweit wie möglich, die Transporte von Flüssigchlor zu vermeiden. Sollten die Chlortransporte verboten werden, wie dies in den skandinavischen Ländern der Fall ist, müssten an kleinen Standorten mit geringem Verbrauch (10,000 – 20,000 kt/a) kleinere Anlagen errichtet werden. Diese Entwicklung würde das Ersetzen der älteren Anlagen beschleunigen.

Relativ geringe Energieeinsparpotenziale sind durch Wärmerückgewinnung (ca. 1 %) und moderne Prozessleittechnik (3 %) vorhanden. Das gilt auch für bestehende Anlagen (Arroyo Curras 2010, S. 45).

Die Investitionskosten für die Umrüstung von Amalgam- auf Membran-Verfahren wurden für 1997 je nach Rahmenbedingungen mit 194 – 700 € pro t Chlor Kapazität angegeben (IPTS 2001, S. 91). Diese Werte können mit Hilfe des Preisindex für Chemieanlagen aktualisiert werden, und entsprechen dann 270 – 1.000 € pro t Chlor Kapazität.

Im Folgenden sollen vier Szenarien für Energieeinsparpotenziale durchgespielt werden: 1) Alle Amalgam-Anlagen werden bis 2020 in konventionelle Membran-Anlagen der neuesten Generation umgewandelt. 2) Alle Diaphragma-Anlagen werden bis 2025 in konventionelle Membran-Anlagen bzw. asbestfreie Diaphragma-Anlagen umgewandelt. 3) Die Membran-Anlagen werden kontinuierlich bis 2035 auf die heute neueste Technologie umgerüstet. 4) 15 % aller Chlor-Anlagen werden bis 2035 in Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie umgewandelt.

Die Investitionskosten für die Umrüstung von Amalgam- auf Membran-Verfahren wurden für 1997 je nach Rahmenbedingungen mit 194 – 700 € pro t Chlor Kapazität angegeben (IPTS 2001, S. 91). Diese Werte können mit Hilfe des Preisindex für Chemieanlagen aktualisiert werden, und entsprechen dann 270 – 1.000 € pro t Chlor Kapazität.

Diese vier Fälle werden im Folgenden diskutiert (siehe auch Tabelle 3-45):

1) Umrüstung der Amalgam-Anlagen auf Membran-Technologie: Es wird vorausgesetzt, dass konventionelle Amalgam-Anlagen bis 2020 durch Membran-Anlagen der heute neuesten Generation ersetzt werden. Die Energieersparnis pro Tonne Chlor-Kapazität liegt bei ca. 3 GJ. Die Gesamtenergieersparnis ist dann gleich 2,88 PJ/a. Dieser Wert wird durch verschiedene Angaben verifiziert: 23 % Einsparung nach Angaben eines Chlorherstellers (VCI 2008b, S. 12) und 10 – 30 % Einsparung nach IPTS 2001, S. 91. Beispiele für solche Umrüstungen sind mit Kostendaten in IPTS 2001 angegeben (S. 94).

2) Umrüstung der Diaphragma-Anlagen: Bei den Diaphragma-Anlagen ist ein Zeitpunkt der Umrüstung schwer vorauszusagen, da dieser sowohl von zukünftigen rechtlichen Regelungen als auch von der realen Lebensdauer der Anlagen abhängt. Nimmt man an, dass sie im Jahre 2025 mit einem durchschnittlichen Alter von 52 Jahren aus wirtschaftlichen Gründen bzw. wegen der Umstellung der Folgeprodukte auf andere Technologien ersetzt werden sollen, so liegt schätzungsweise die Energieersparnis pro Tonne Chlor-Kapazität bei ca. 0,65 GJ. Die Gesamtenergieersparnis beträgt dann 0,75 PJ/a.

3) Umrüstung der Membran-Anlagen auf neuere Membran-Technologie: Aus wirtschaftlichen Gründen werden die Membran-Anlagen der ersten Generationen auf neuere Technologie umgerüstet. Wirtschaftlich wäre dies ca. 20 Jahre nach ihrer Errichtung. Da die bestehenden Membran-Anlagen relativ neu sind und ein durchschnittliches Alter von ca. 10 Jahren haben, würde eine Umrüstung im Jahr 2015 beginnen und kontinuierlich fortgeführt werden. Die Gesamtenergieersparnis beträgt dann 0,82 PJ/a.

4) Ersatz von Membran-Anlagen durch Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie: Es wird angenommen, dass bis 2035 ein begrenzter Teil der Membran-Anlagen auf Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie umgerüstet werden. Ausgehend von der Ausnutzung des Wasserstoffs als Chemierohstoff liegt dieser Anteil bei ca. 15 % der Gesamtkapazität. Die Energieersparnis pro Tonne Chlor-Kapazität liegt bei ca. 3,0 GJ (Uhde 2008a). Die Gesamtenergieersparnis beträgt dann 2,07 PJ/a. Die oben genannten Szenarien für Energieeinsparpotenziale werden in Tabelle 3-45 zusammengefasst.

Im Szenario technische Diffusion würden alle Amalgam-Anlagen vor 2020 und die Diaphragma-Anlagen vor 2025 umgerüstet. Zudem würde bei jedem Zellenumtausch die neueste Membrantechnologie eingesetzt.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Chlor-Herstellung werden in Tabelle 3-46 zusammengefasst.

Tabelle 3-45: Szenarien für Energieeinsparpotenziale bei der Chloralkalielektrolyse

Umrüstung bzw. Anlagenersatz	**Jahr**	**Energieersparnis pro t Kapazität (GJ/t)**	**Gesamtenergieersparnis (PJ)**
Umrüstung der Amalgam-Anlagen	2020	3	2,88
Umrüstung der Diaphragma-Anlagen	2025	0,65	0,75
Umrüstung bestehender Membran-Anlagen auf neuere Membrangeneration	Ab 2015	0,3	0,82
Umrüstung von Membran-Anlagen auf Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie	Ab 2020	3	2,07

Tabelle 3-46: Wichtige Parameter zu den Enaergieeinsparpotenzialen für Chlor

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnieren bzw. leicht ansteigen
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Unbedeutend Unbedeutend
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Amalgam- und Diaphragma-Verfahren durch Membran-Verfahren und eventuell durch Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Keine
BVT für den Prozess heute	Membran-Verfahren der 5. Generation
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	Amalgam-Anlagen: > 40 Jahre Diaphragma-Anlagen: 36 Jahre Membran-Anlagen: 10 Jahre
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	40 – 60 Jahre für Gesamtanlagen Membrane und Diaphragma müssen regelmäßig erneuert werden. Metallanoden bei Diaphragma-Verfahren 12 Jahre und bei Membran-Verfahren und Amalgam-Verfahren 4 – 8 Jahre (IPTS 2001, S. 66)
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Ersatz der Amalgam-Anlagen bis 2020 Ersatz der Diaphragma-Anlagen möglich Bau von Anlagen der Sauerstoff-Verzehrkathoden wahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Keine Keine

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Der Errichtung neuer Anlagen nach der Membran-Technologie stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Der Markt für Chlor ist gesättigt. Der Zustand der bestehenden Chloralkalielektrolyse-Anlagen gilt als relativ gut. Sie haben in Europa eine reale Lebensdauer von 40 – 60 Jahren (IPTS 2001, S. iii).

Einer Umrüstung bestehender Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Die meisten Amalgam- und Diaphragma-Anlagen sind zwar älteren Datums, sind aber noch in einem relativ guten Zustand, sodass ein Ersatz aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht zwingend ist. Bei Amalgam-Anlagen stellt sich jedoch die Frage, ob man die eine oder andere Anlage noch vor 2020 stilllegt bzw. auf Membran-Technologie umrüstet. Eine Entscheidung über den Zeitpunkt einer Umrüstung geht von einer Berechnung der Herstellkosten aus. Bei steuerlich abgeschriebenen Anlagen werden die Kosten bekanntlich nicht durch die kapitalabhängigen Kosten belastet. Bei der Umrüstung auf das Membran-Verfahren müssen aber nicht nur die Investitionskosten, sondern auch die laufenden Kosten für den Membranersatz berücksichtigt werden. Auch die Ausfallzeit für die Produktion muss in die Berechnung einbezogen werden. Dem Produktionsausfall versuchen Betreiber von Chloranlagen allerdings durch graduelle Umrüstung zu entgehen. Allgemein kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es wirtschaftlicher ist, Amalgam-Anlagen am Ende ihrer realen Lebensdauer umzurüsten.
- Ein weiteres Hemmnis können die gewünschte Qualität und die gewünschte Konzentration der Natronlauge sein. An vielen Standorten wird Natronlauge bestimmter Konzentration und Reinheit für Folgeprodukte benötigt. Eine Umrüstung auf das Membranverfahren erfordert dann eine Aufkonzentrierung der Lauge. Einen speziellen Fall bilden in Deutschland die Diaphragma-Anlagen, die in den 70er Jahren errichtet wurden. Für die derzeitigen Anwendungen reicht die anfallende Natronlauge hinsichtlich Konzentration und Reinheit aus. Die wirtschaftlichen Vorteile einer Umrüstung auf Membran-Technologie, vor allem der geringere Strombedarf, wären im Vergleich zu den getätigten Investitionen wirtschaftlich nicht gerechtfertigt.
- Bei der Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie müssen der Verlust des Wasserstoffs und der benötigte Sauerstoff bei einem Vergleich mit dem klassischen Membran-Verfahren in der Kostenrechnung berücksichtigt werden. Vor allem ist die Bewertung des Wasserstoffs von entscheidender Bedeutung. Wird er nur verbrannt, wird er mit seinem Heizwert bewertet. Hat er aber eine stoffliche Verwendung, so muss er entsprechend höher bewertet werden. Dabei ist zu bemerken, dass der größte Teil des Wasserstoffs aus der Chloralkalielektrolyse in Deutschland stofflich verwertet wird. Zudem benötigt die Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie eine um 50 % höhere Investition als das konventionelle Membran-Verfahren.

3.3.3.2 Sauerstoff

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Sauerstoff wird in zahlreichen chemischen Prozessen benötigt. Er wird vor allem dort eingesetzt, wo reiner Sauerstoff für Oxidation an Stelle von Luft gebraucht wird, um günstigere Reaktionsbedingungen zu erreichen oder um Stickstoff im Produktgas zu vermeiden. Im letzten Fall wäre die Trennung des Stickstoffs zu aufwändig.

Eine große Änderung des Verbrauchs in der chemischen Industrie ist nicht zu erwarten. Steigender Bedarf könnte entstehend, wenn Biomasse im großen Stil zu Synthesegas mit Hilfe von reinem Sauerstoff vergast wird (BTL). Eventuell wird auch der Bedarf an reinstem Sauerstoff für spezielle Prozesse steigen.

Die Sauerstoff-Produktion ist in den zehn Jahren vor dem Basisjahr 2007 um fast 18 % gestiegen (VCI 2008a, S. 14). Man kann annehmen, dass die Sauerstoff-Produktion in Zukunft im gleichen Umfang wie die chemische Industrie wachsen wird. Da Sauerstoff immer am jeweiligen Standort erzeugt wird, entspricht der Bedarf der Produktion.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Die Tieftemperaturluftzerlegung ist der dominierende Prozess zur Gewinnung von Sauerstoff und Stickstoff für die chemische Industrie mit über 90 % und wird wahrscheinlich für die nächste Zukunft bleiben (vgl. Häring 2008, S. 13ff). Sie eignet sich für große Durchsätze und hohe Reinheit der Gase. Weitere Verfahren sind das Druckwechsel-Adsorptionsverfahren und das Membran-Verfahren. In der Entwicklung befindet sich noch das Keramikmembran-Verfahren, das hohe Temperaturen benötigt und sich daher für Prozesse eignet, bei denen preiswerte Wärme zur Verfügung steht, wie in Kraftwerken.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Der Prozess der Tieftemperaturluftzerlegung ist ausgereift und gilt als BVT. Folgende Optimierungsmaßnahmen sind möglich:

- Ausnutzung der Kompressionswärme am Standort: Bis zu 80 % der Wärme kann zurückgewonnen werden (Österreichische Energieagentur 2007b, S. 4)
- Verwendung von modernen Prozessleitsystemen
- Verwendung von energieeffizienteren Kompressoren, Pumpen und Motoren: Hierdurch können 2 – 5 % der Energie eingespart werden (Österreichische Energieagentur 2007b, S. 4)
- Verwendung von energieeffizienten Rektifizierkolonnen, wie z. B. gepackten Säulen

- Verwendung von energieeffizienten Wärmetauschern, Kondensatoren und Verdampfern
- Eine bessere Wärmedämmung der Anlage: Durch eine stärkere Wärmedämmung kann 5 – 10 % der Energie eingespart werden (Österreichische Energieagentur 2007b, S. 4).

Aufgrund der oben beschriebenen Situation ist vereinzelt mit der Errichtung von neuen Anlagen zu rechnen. Ältere Anlagen können eventuell ersetzt werden, wenn die Herstellkosten durch Instandhaltungskosten und Energiekosten stark belastet werden. Der Zeitpunkt ist aber nicht absehbar. Die reale Lebensdauer von Luftzerlegungs-Anlagen wird auf 40 Jahre geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung.

Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen werden aber bei bestehenden Anlagen weiter durchgeführt, um die Energieeffizienz zu verbessern. Der Anteil der bereits realisierten Modernisierungsmaßnahmen gilt als sehr hoch. Im Szenario technische Diffusion werden einige bestehende Anlagen ersetzt.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Sauerstoff-Herstellung werden in Tabelle 3-47 zusammengefasst.

Tabelle 3-47: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Sauerstoff

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierend
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Keine Einsatz in einigen neueren Prozessen
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Brennstoffsubstitution	Keine
BVT für den Prozess heute	Tieftemperaturluftzerlegung
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	-
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	40 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes wahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Ausnutzung der Kompressionswärme am Standort Unterschiedlich

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz von Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

· Die Zukunft der Grundstoffchemie ist ungewiss, deshalb kann der Bedarf an Sauerstoff sehr schwer abgeschätzt werden.

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

· An manchen Standorten kann die Wärme aus den Kompressoren wegen des fehlenden Bedarfs nicht genutzt werden.

3.3.3.3 Soda

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Soda wird aufgrund seiner vielseitigen Anwendungen eine der wichtigsten anorganischen Chemikalien bleiben. Etwa die Hälfte der Produktion geht in die Glasindustrie. Weitere große Abnehmer sind die Waschmittel- und die chemische Industrie. Die zukünftige Entwicklung der Soda-Industrie in Deutschland ist aber mit einer Anzahl von Unsicherheiten behaftet:

· Die Glasflaschen werden in verschiedenen Anwendungen durch Kunststoffflaschen, vor allem PET-Flaschen, verdrängt.

· Das synthetische Soda steht in Konkurrenz zum Natursoda. Zwar ist Natursoda in Europa kaum verfügbar, jedoch würden sich Importe aus den USA bei einem höheren Preis des Sodas bzw. bei einem höheren Energiepreis lohnen. Über 30 % der weltweiten Produktion stammen bereits aus Natursoda-Vorkommen (IPTS 2007c, S. 31).

· Natronlauge gilt als Konkurrent zum Soda bei Neutralisationsreaktionen. Damit ist die zukünftige Entwicklung der Soda-Industrie vom Chlor-Bedarf abhängig. Zurzeit ist der Preis für Natronlauge höher, der Preis für Soda steigt aber auch.

· Es besteht ein weltweiter Überhang in der Soda-Industrie. In den 90er Jahren und Anfang dieses Jahrhunderts mussten einige Anlagen in Westeuropa schließen. Dazu gehörten auch drei Anlagen in Deutschland (IPTS 2007c, S. 39).

· Die Herstellkosten für Soda in Osteuropa und China sind aufgrund der geringeren Energie- und Arbeitskosten niedriger. Es stellt eine Konkurrenz zu dem in Deutschland hergestellten Soda dar. In Westeuropa liegt der Anteil der Energiekosten an den Herstellkosten bei ca. 30 % (ESAPA 2004, S. 20). Dadurch ist die europäische Soda-Industrie gegenüber Produzenten mit preiswerter Energie benachteiligt.

· Pro Tonne Soda fallen 200 – 400 kg CO_2 an (ESAPA 2004, S. 39). Bei Einführung des CO_2-Handels werden die Herstellkosten des Sodas zusätzlich belastet.

Trotz der beschriebenen Entwicklung wurde die Kapazität in Deutschland 2008 um 150 kt/a ausgeweitet. Es ist nicht absehbar, wie sich die Produktion in Deutschland in Zukunft entwickelt. Man kann annehmen, dass die Soda-Produktion je nach Rahmenbedingungen stagniert oder leicht wächst. Auch ein Rückgang ist denkbar.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Bis jetzt ist es nicht gelungen eine Alternative zum Solvay-Verfahren zu entwickeln. Damit wird auch die Rohstoffbasis unverändert bleiben. Um die Umweltbelastung zu minimieren, ist man bestrebt, Rohstoffe mit geringeren Umweltbelastungen, wie z. B. Kalk mit einem höheren Reinheitsgrad, einzusetzen. Jedoch kann man die Rohstoffe nicht über längere Strecken transportieren, damit der Transport die Herstellkosten nicht zusätzlich belastet.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Das Solvay-Verfahren mit einer hohen Wärmeintegration gilt als BVT:

- Die Wärme- und Stoffintegration wurde in Deutschland bereits vor Jahren angegangen. Zu nennen ist: die Gewinnung von Niederdruckdampf und CO_2 aus dem Kalkbrennen, Aufwärmung des in die Soleaufbereitung eingeführten Solestroms, des Prozesswassers für die Kalkmilchproduktion und des Speisewassers für den Abhitzekessel, Bau von parallelen Fällungstürmen für Natriumbicarbonat, um eine kontinuierliche Fahrweise zu gewährleisten, Gewinnung von Dampf aus der Calcinierungsstufe, Verwendung von Entspannungsverdampfern für Flüssigkeiten mit hohen Temperaturen usw. Der im Prozess gewonnene Dampf wird für den Antrieb verschiedener Maschinen, wie z. B. Turbogeneratoren und Gaskompressoren, verwendet. Außerdem wird er für die Rektifikation, Trocknung usw. eingesetzt. Dabei wird der Niedrigtemperatur-Wärmebedarf regelmäßig durch Dampf gedeckt (siehe auch IPTS 2007c, S. 67).
- Die Verwendung von Erdgas als Brennstoff führt zur Reduktion der CO_2-Emissionen. Die Maßnahme verursacht aber höhere Kosten, bedingt durch den höheren Preis für Erdgas bezogen auf die Wärmeeinheit. Verwendet man Erdgas auch für die Calcinierung des Kalks, erhält man eine geringere Konzentration des CO_2. Eine höhere CO_2-Konzentration ist aber für den Karbonisierungs-Prozessschritt wünschenswert, da man das Volumen der Apparate reduzieren kann (IPTS 2007c, S. 68ff).
- Die Auswahl von reinerem Kalk beeinflusst den Energieverbrauch positiv. Das Gleiche gilt für die Steuerung des Brennvorganges.
- Die Einführung von modernen Prozessleitsystemen mit hierarchischer Regelung führt zu optimalen Betriebspunkten und damit zu einem geringeren Wärmeverbrauch.

- KWK ist mit 90 % Wirkungsgrad eine der effektiven Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs. Durch Einführung einer KWK auf Erdgasbasis in Verbindung mit einer Gasturbine kann bis zu 30 % des Energieverbrauchs eingespart werden. Der überschüssige Strom wird dann in das öffentliche Stromnetz eingespeist (IPTS 2007c, S. 81; ESAPA 2004, S. 52).
- Zentrifugen werden verwendet, um die Feuchtigkeit des Bicarbonats vor der Trocknung zu reduzieren.
- Die Anlagen werden so optimiert, dass die CO_2-Emissionen minimiert werden. Dies ist von besonderer Bedeutung im Zusammenhang mit dem Emissionshandel ab 2013.
- Die Verwendung von vertikalen Schachtöfen für das Kalkbrennen mit Koks als Brennstoff erfüllt am besten die Anforderungen der Soda-Industrie hinsichtlich Energieeffizienz und Konzentration des CO_2 (IPTS 2007c, S. 85).

Die oben beschriebene Situation führt dazu, dass die Errichtung von neuen Anlagen unwahrscheinlich ist. Der Zeitpunkt für den Ersatz von bestehenden älteren Anlagen ist unbekannt und hängt stark von der Entwicklung des Bedarfs und der Importe ab. Der Zustand der Anlagen in Deutschland erlaubt eine Verschiebung dieser Entscheidung. Falls der Bedarf steigt, wird man eher die Kapazität erweitern. Die reale Lebensdauer von Soda-Anlagen wird auf 40 – 60 Jahre geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung. Dabei ist zu bemerken, dass der Erneuerungsprozess fließend erfolgt.

Die in Deutschland bestehenden Anlagen wurden immer wieder modernisiert und optimiert. Dadurch versucht man, nicht nur die gesetzlichen Regelungen zu erfüllen, sondern auch der Konkurrenz durch Kostenreduktion entgegenzuwirken. Dabei liegt der Gesamtenergieverbrauch für EU-Verhältnisse bei 9,7 – 13,6 GJ/ t Schwersoda und 8,8 – 12,8 GJ/ t Leichtsoda. Davon werden 2,2 – 2,8 GJ/ t Kalk für das Brennen des Kalks verbraucht (IPTS 2007c, S. 101; ESAPA 2004, S. 35).

Die oben genannten Maßnahmen wurden an deutschen Standorten in unterschiedlichem Maße eingeführt. Alle Standorte verfügen über KWK und einen hohen Stand der Prozesswärmeintegration. Teilweise wird Wärme am Standort bzw. für benachbarte Anwender exportiert. Die meisten großen Kapazitäten von über 600 kt/a erlauben solche Maßnahmen. Eine Schätzung des Realisierungsanteils jeder Maßnahme ist aus Mangel an veröffentlichten Informationen kaum möglich. Die Errichtung von neuen Anlagen ist sowohl im Szenario Marktdiffusion als auch im Szenario technische Diffusion kaum zu erwarten.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Soda-Herstellung werden in Tabelle 3-48 zusammengefasst.

Tabelle 3-48: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Soda

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierend bzw. rückläufig
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Keine Keine
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Verwendung von weniger verunreinigten Rohstoffen
Mögliche Brennstoffsubstitution	Verwendung von Erdgas als Energieträger
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	Die Soda-Anlagen wurden teilweise im 19. Jahrhundert errichtet, aber immer wieder modernisiert. Es ist daher schwierig, ein durchschnittliches Alter für die Anlagen anzugeben.
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	Unter Berücksichtigung der Modernisierungen: 60 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes unwahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration
Potenzial für die Verringerung der THG-Emissionen	200 – 400 kg / t Soda (ESAPA 2004, S. 39; IPTS 2007c, S. 82)

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz von Soda-Anlagen stehen einige Hemmnisse entgegen:

- Die oben dargestellte Situation der westeuropäischen Soda-Industrie führt zu Unsicherheiten, sodass neue Anlagen nicht errichtet werden. Auch ein Ersatz für bestehende Anlage ist unwahrscheinlich.
- Der Kapitalbedarf für neue Anlagen wäre sehr beträchtlich und mit hohen Risiken bei einer unklaren Marktentwicklung verbunden. Man schätzt den Kapitalbedarf auf 600 € pro Tonne Soda-Kapazität (IPTS 2007c, S. 31 und S. 39).

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Da es sich bei einigen Standorten der Soda-Produktion um isolierte Standorte handelt, die historisch in der Nähe der Rohstoffe entstanden sind, ist eine Stoff- und Wärmeintegration am Standort nur schwer zu realisieren.

· Einige technische Maßnahmen können nur bei neuen Anlagen wirtschaftlich sinnvoll eingeführt werden. Dazu gehören beispielsweise einige Wärmeintegrations- und Wärmerückgewinnungsmaßnahmen. Nachträglicher Einbau von Wärmetauschern könnte unwirtschaftlich sein (siehe auch IPTS 2007c, S. 52).

3.3.3.4 Titandioxid

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Titandioxid wird fast ausschließlich als Pigment verwendet. Ein preiswerter Produktersatz gleicher Qualität ist nicht verfügbar. Der Bedarf für Deutschland wird mit dem Wachstum der Wirtschaft Schritt halten. Importe aus rohstoffreichen Ländern sind möglich und würden einen Teil des Bedarfs decken. Die Preise sind in den letzten Jahren weltweit gefallen und haben dadurch die Konkurrenz verschärft. Benachteiligt sind vor allem Produzenten mit hohen Energiekosten. Ein Argument für deutsche Standorte ist aber der Qualitätsaspekt, der bei Titandioxid eine wichtige Rolle spielt. Die Produktion wird daher in Deutschland in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen stagnieren bzw. leicht ansteigen.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Wie in Kapitel 3.2.2.4 dargestellt, wird Titandioxid durch zwei Verfahren hergestellt. Das Sulfat-Verfahren und das Chlorid-Verfahren.

Das Chlorid-Verfahren hat sich in den letzten 20 Jahren gegenüber dem Sulfat-Verfahren immer mehr durchgesetzt. Weltweit dominiert es mit einem Anteil von über 55 % (IPTS 2007c, S. 105). Der wesentliche Vorteil des Chlorid-Verfahrens besteht darin, dass keine Abfallprodukte anfallen, da das freiwerdende Chlor wieder in den Chlorierungsprozess zurückgeführt wird. Damit ist der spezifische Energieverbrauch wesentlich geringer. Der Reaktionsofen für die Chlorierung besitzt jedoch nur eine begrenzte Lebensdauer und muss oft erneuert werden. Außerdem können Pigmente aus dem Chlorid-Verfahren nicht in der Textilindustrie eingesetzt werden. Auf der anderen Seite ist das Sulfat-Verfahren in der Lage, Erze mit geringerer Konzentration wie Ilminit und Titanschlacke zu verarbeiten. Das Chlorid-Verfahren kann also trotz der genannten Vorteile nicht ohne weiteres das Sulfat-Verfahren ersetzen. Jedoch sind die Produkte beider Prozesse für fast 80 % der Anwendungen geeignet. Daher ist es wahrscheinlich, dass neu zu errichtende Anlagen die Chlorid-Technologie verwenden werden (siehe auch IPTS 2007c, S. 105ff und S. 186ff).

Traditionell wurde in Europa für das Chlorid-Verfahren Natur-Rutil als Rohstoff verwendet. Dieses ist aber inzwischen nicht mehr in ausreichenden Mengen und zu akzeptab-

len Preisen verfügbar. Ilminit als Ersatz erfordert im Zusammenhang mit dem Chlorid-Verfahren ein spezielles Know-how, um die Bildung von großen Mengen an Metallchloriden zu vermeiden. Außerdem sind die Reststoffe schwer zu entsorgen. Stattdessen wird Titanschlacke bzw. synthetisches Rutil eingesetzt. Der letztgenannte Rohstoff wird durch Extraktion von Ilminit mit HCl gewonnen. Titanschlacke wird in einem energieintensiven Prozess im Schachtofen aus Ilminit produziert (IPTS 2007c, S. 186). Durch Umstellen auf andere Rohstoffe kann der Energieverbrauch bei der Rohstoffaufbereitung und den Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen signifikant steigen.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Beide oben beschriebene Prozesse weisen ihre jeweiligen Vor- und Nachteile auf. Dabei ist das Chlorid-Verfahren vorteilhafter hinsichtlich des Energieverbrauchs. Voraussetzung ist, dass die gewünschten Eigenschaften des Produktes gewährleistet sind.

Beim Sulfat-Verfahren gelten folgende Prozesseigenschaften als BVT (IPTS 2007c, S. 164ff):

- energieeffiziente Aufbereitungsstufe,
- Verwendung eines energieeffizienten Calcinierungsofens,
- Rückführung des Abgases aus der Calcinierungsstufe in den Ofen,
- Verwendung von Druckfilter in der Calcinierungsstufe,
- Wärmerückgewinnung aus den Abgasen und Verwendung im Prozess, z. B. für die Trocknung des Rohstoffes und des Produktes,
- energieeffiziente Rückgewinnung der Gebrauchtsäure, die 13,8 GJ/t Produkt benötigt (IPTS 2007c, S. 179),
- Verwendung von KWK am Standort.

Folgende Energieeinsparmaßnahmen gelten für das Chlorid-Verfahren als BVT (IPTS 2007c, S. 126ff):

- hohe Ausbeute der Rohstoffe,
- optimale Fahrweise für den Chlorierungsreaktor,
- optimale Reinigung des $TiCl_4$,
- maximaler Umsatz im Oxidationsofen,
- energieeffiziente Optimierung der Chlorrückgewinnung durch Verwendung des direkten Chlor-Recycling,
- Verwendung von KWK am Standort: 18,7 % der Energie kann dadurch eingespart werden (IPTS 2007c, S. 163).

Aufgrund der oben beschriebenen Situation ist nicht mit der Errichtung von neuen Anlagen zu rechnen. Ein Indiz dafür ist, dass in den letzten 15 Jahren in Westeuropa keine neue Anlage errichtet wurde. Wann ältere Anlagen ersetzt werden, ist nicht absehbar. Die reale Lebensdauer von Titandioxid-Anlagen wird auf 40 – 60 Jahren geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung.

Die Hersteller von Titandioxid bemühen sich, beide Prozesse zu optimieren. Beim Sulfat-Verfahren geht es um die Verringerung des Energieverbrauchs in allen Prozessstufen. Ein kontinuierlicher Aufschluss von Ilminit wurde versucht, allerdings weist er durch die geringere Verweilzeit und die geringere Temperatur eine um 3 – 4 % kleinere Ausbeute auf. Diese Technologie ist auf Titanschlacke nicht anwendbar und hat sich außerdem in Europa nicht durchgesetzt.

Auch beim Chlorid-Verfahren versucht man, den Energieverbrauch zu senken. Wie aus der Tabelle 3-23 zu ersehen ist, ist die Nachbehandlung der energieintensivere Prozessabschnitt, auf den sich die meisten Bemühungen für die Energieeinsparung konzentrieren. Auf die Prozessstufe der Absorption/ Desorption des Chlors wird verzichtet. Stattdessen wird ein Direktrecycling des Chlors eingeführt. Dadurch wird eine beträchtliche Energieeinsparung erreicht. Für das Chlorid-Verfahren gilt ein Energieverbrauch von 18,8 GJ/t als BVT (IPTS 2007c, S. 141).

Sowohl beim Sulfat-Prozess als auch beim Chlorid-Prozess wird der Realisierungsanteil als sehr hoch eingestuft. Damit sind die Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz begrenzt. Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen kaum zu erwarten. Dafür werden aber die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würde mindestens eine neue Anlage nach dem Chlorid-Prozess errichtet, die Anlagen nach dem Sulfat-Prozess ersetzt.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Herstellung von Titandioxid werden in Tabelle 3-49 zusammengefasst.

Tabelle 3-49: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Titandioxid

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnierend
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Keine Keine
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Chlorid-Verfahren ersetzt teilweise bei neuen Anlagen das Sulfat-Verfahren.

Parameter	Wert/Beschreibung
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Ilminit, synthetisches Rutil und Titanschlacke ersetzen Natur-Rutil fast vollständig.
Mögliche Brennstoffsubstitution	Sulfat-Verfahren: keine Chlorid-Verfahren: keine
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	Sulfat-Verfahren: 41 – 83 (Durchschnitt = 60 Jahre) Chlorid-Verfahren: 38 Jahre
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	Sulfat-Verfahren; über 70 Jahre Chlorid-Verfahren: über 50 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes unwahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Sulfat-Verfahren: siehe oben Chlorid-Verfahren: siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Hoch Hoch

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz der Titandioxid-Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Unsicherheit besteht durch sinkende Preise und steigende Konkurrenz. Dadurch werden Entscheidungen über neue Anlagen zurückgestellt.
- Gegen den Ersatz von Sulfat-Anlagen durch Chlorid-Anlagen sprechen folgende Gründe:
  - Titandioxid aus dem Chlorid-Verfahren ist für bestimmte Anwendungen, wie z. B. für die Färbung von Textilien, ungeeignet.
  - Die Prozessstufe der Wiederaufarbeitung der Gebrauchtsäure wurde in Deutschland erst Ende der 80er Jahre eingeführt. Sie ist damit bei allen Sulfat-Anlagen noch in einem guten Zustand.
  - Die Verfügbarkeit von geeigneten Rohstoffen kann ebenfalls ein Hindernis sein (siehe oben).

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Bei beiden Verfahren ist die Reduktion der Emissionen und der Reststoffe das oberste Ziel. Dies erfordert aber einen hohen Einsatz an Energie, der dann in Kauf genommen wird.
- Bei geringer Standortwärmeintegration ist der Import/Export von Dampf begrenzt.

- Ein Wechsel zu Rohstoffen mit geringeren Verunreinigungen und damit energieeffizienteren Rohstoffen ist aus technischen Gründen nicht immer möglich.
- Beim Sulfat-Verfahren sind zusätzlich folgende Hemmnisse zu nennen: Beeinträchtigung der Produktqualität durch bestimmte Energiesparmaßnahmen und schwierige Rückgewinnung der Wärme aus der Aufschluss- und Calcinierungsstufe.

3.3.4 Einsparpotenziale bei den Polymeren

3.3.4.1 Polycarbonate

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Die Polycarbonate haben sich in den letzten drei Jahrzehnten als eine wichtige Kunststoffgruppe etabliert und weisen hohe Wachstumsraten auf. Das liegt an ihrer herausragenden Eigenschaftskombination, am guten Preis-Leistungs-Verhältnis und an der großen Variationsbreite der Polycarbonat-Eigenschaften, sodass Polycarbonate viele Nischenanwendungen besetzen konnten. Haupteinsatzbereiche sind Elektrotechnik, Bauwesen, CD-Herstellung und Fahrzeugbau.

Der Einsatz für die Herstellung von CDs wird in Zukunft rückläufig sein. Er liegt bei ca. 10 % und wird den Gesamtabsatz nicht wesentlich beeinflussen. Die anderen Einsatzbereiche sind stabil und dürften noch stark wachsen. Außerdem ist es wahrscheinlich, dass neue Einsatzbereiche erschlossen werden. Importe im größeren Stil sind nicht zu erwarten. Der Bedarf und die Produktion werden also parallel wachsen.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Die Phasengrenzflächenpolymerisation dominiert noch immer bei der Produktion von Polycarbonaten. Die Umesterung, mit dem Vorteil der Lösemittelfreiheit und des Ersatzes von Phosgen durch einen Kohlensäureester, wird wieder verwendet. So wurde im Jahre 2000 eine Anlage nach diesem Verfahren in Leverkusen errichtet. Jedoch weist es auch einige Nachteile gegenüber der Phasengrenzflächenpolymerisation auf. Mit dem letztgenannten Prozess kann eine außerordentliche Variationsbreite an unterschiedlichen Polycarbonat-Typen hergestellt werden. Weitere Verfahren, wie die Polykondensation in der homogenen Phase, haben keine wirtschaftliche Bedeutung erlangt. Damit wird sich auch die Rohstoffbasis nicht ändern.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Hersteller von Polycarbonaten haben jeweils ihre proprietären Prozessrouten, sodass die Technologie nicht beliebig austauschbar ist. Sie wurden immer wieder verfeinert.

Energieeinsparpotenzial liegt vor allem in der Reduktion des Wärmeverbrauchs und der Prozesswärmeintegration.

Die Errichtung von neuen Anlagen ist wahrscheinlich, hängt aber von der Entwicklung des Marktes ab. Darum kann keine Aussage über den Zeitpunkt gemacht werden. Die reale Lebensdauer von Polycarbonat-Anlagen wird auf 35 Jahren geschätzt. Sie hängt von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung ab. Ein Anlagenersatz kann aber aus Gründen des technologischen Fortschritts notwendig werden. Die zurzeit bestehenden Anlagen sind aber modern. Daher sind die Einsparpotenziale begrenzt. Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen möglich. Außerdem werden die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würde mindestens eine neue Anlage errichtet, wenn 2025 das Durchschnittsalter die 35 Jahre überschritten hat.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Polycarbonat-Herstellung werden in Tabelle 3-50 zusammengefasst.

Tabelle 3-50: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polycarbonate

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Mäßiger bis mittlerer Anstieg der Produktion
Erwartete Produktsubstitution bis 2035	Substitution von konventionellen Werkstoffen durch Polycarbonate CD-Einsatzgebiet verliert an Bedeutung
Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Zahlreiche neue Einsatzgebiete möglich
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Brennstoffsubstitution	Keine
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	Ca. 20 Jahre
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	35 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes wahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Hoch Hoch

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz der Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

· Die angewandten Prozesse sind proprietär. Prozesse können daher nicht beliebig durch andere energieeffizientere ersetzt werden. Know-how- und Patentbarrieren stellen ebenfalls Hemmnisse dar.

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

· Eine Standortwärmeintegration ist nicht überall möglich.

3.3.4.2 Polyethylen

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Polyethylen ist der wichtigste Massenkunststoff mit vielfältigen Anwendungen und substituiert seit seiner Einführung regelmäßig klassische Werkstoffe. Außerdem werden neue Anwendungsmöglichkeiten erschlossen. Auch Spezialkunststoffe werden in bestimmten Fällen durch Polyethylen ersetzt. Dies liegt an der Verbesserung seiner Eigenschaften und an seinem günstigen Preis. Es ist anzunehmen, dass seine Bedeutung während des Betrachtungszeitraumes erhalten bleibt und dass der Bedarf an Polyethylen parallel zur wirtschaftlichen Entwicklung wachsen wird.

HDPE, LDPE und LLDPE werden sich wahrscheinlich gegen andere Arten des Polyethylens behaupten. Eher wird eine begrenzte Substitution unter diesen drei Arten stattfinden. LLDPE verdrängt eventuell die beiden anderen Arten bei speziellen Anwendungen. Es wird aber auch mit ihnen vermischt, um bessere Eigenschaften zu erzielen. Jedoch hat jede Art einen definierten Anwendungsbereich.

Die sinkenden Margen der Produzenten in Europa haben dazu geführt, dass in den letzten Jahren ein Konzentrationsprozess stattfand, sodass heute nur noch wenige Anbieter übrig geblieben sind (siehe Kapitel 3.4.1). Diese versuchen, durch Rationalisierungsmaßnahmen, Innovationen und Erschließung von neuen Anwendungsmöglichkeiten die Herstellkosten zu reduzieren bzw. ihre Margen zu verbessern.

Die Produktion in Deutschland hat in den letzten Jahren leicht zugenommen. Ein Teil davon wird in andere europäische Länder exportiert. Exporte in Länder außerhalb der EU sind mit weniger als 10 % relativ niedrig. Es ist anzunehmen, dass dieser Anteil weiter abnehmen wird. Dies gilt nicht für spezielle Co-Polymere. Es ist aber sehr gut möglich, dass Importe von außerhalb des westeuropäischen Wirtschaftsraumes zunehmen werden, da große Kapazitäten, vor allem im Nahen Osten mit preiswerten Rohstoffen, aufgebaut wurden. Durch die oben beschriebenen Entwicklungen wird die

Produktion von Polyethylen in Deutschland in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen leicht ansteigen bzw. stagnieren.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Eine grundsätzliche Prozesssubstitution ist nicht anzunehmen. Die verschiedenen Prozesse bzw. Prozessvarianten zur Herstellung von Polyethylen-Arten stehen nur begrenzt in Konkurrenz zueinander, da man mit ihnen teilweise verschiedene Eigenschaften erreichen kann. Zudem verwenden die proprietären Routen jeweils andere Prozessvarianten.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Moderne Polymerisationsprozesse zur Herstellung von Polyethylen und die dazu gehörigen Katalysatoren der neuesten Generation gelten als BVT:

- Erzeugung von Niederdruckdampf in dem Reaktor: Der Dampf wird dann im Prozess, z. B. für das Aufheizen von Stoffströmen oder am Standort eingesetzt. Arroyo Curras schätzt das Einsparpotenzial auf 2 % (2010, S. 46). Auch der Einsatz von KWK ist üblich (IPTS 2007a, S. 257),
- Verwendung von energieeffizienten Kompressoren,
- Verwendung eines „static mixers“ (Statikmischer): Dadurch ist ein besserer Stoff- und Wärmeaustausch möglich (Arroyo Curras 2010, S. 47). Die Verwendung einer Zahnradpumpe anstelle eines Extruders, wenn technisch machbar, gilt als BVT (IPTS 2007a, S. 203),
- Verringerung der An- und Abfahrvorgänge (IPTS 2007a, S. 257),
- Verwendung von moderner Prozessleittechnik: Arroyo Curras schätzt das Einsparpotenzial auf 2 – 3 % (2010, S. 46 und S. 49),
- Verwendung von geschlossenen Kühlwassersystemen (IPTS 2007a, S. 257).

Zusätzlich können spezielle Maßnahmen für jede Polyethylen-Art notwendig sein (siehe hierzu IPTS 2007a).

Als Beispiel wird in Tabelle 3-51 der Energieverbrauch für verschiedene Polyethylen-Prozesse und -Anlagen angegeben.

Da die Investitionskosten für Polymerisationsanlagen wesentlich niedriger als für Steam-Cracker sind, ist die Errichtung von neuen Anlagen bzw. der Ersatz bestehender Anlagen mit relativ begrenzten Risiken verbunden. Einige neue Anlagen wurden in Deutschland in den letzten Jahren, teilweise als Ersatz für ältere Anlagen, errichtet. Die reale Lebensdauer von Polyethylen-Anlagen wird auf ca. 35 Jahre geschätzt und hängt von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung ab. Eine

Alterung erfolgt eher durch die Entwicklung neuer Technologien. Ein Anlagenersatz wird daher eher die Ausnahme bleiben. Die meisten Anlagen können in den nächsten Jahren weiter betrieben werden, da die Einführung von neuen oder verbesserten Katalysatoren nicht zwingend einen Anlagenersatz bedeutet.

Tabelle 3-51: BVT-Energieverbrauch für Polyethylen

Polymer/Reaktor	**Sekundärenergieverbrauch (GJ/t)**	**Primärenergieverbrauch (GJ/t)**
LDPE, Rohrreaktor	2,88 – 3,24	7,2 – 8,1
LDPE, Rührkesselreaktor	3,24 – 3,60	8,1 – 9,0
HDPE, neue Anlage	2,05	7,2 – 8,1
HDPE, bestehende Anlage	2,05 – 2,52	4,25 – 5,36
LLDPE, neue Anlage	2,08	2,92
LLDPE, bestehende Anlage	2,08 – 2,45	2,92 – 4,14

Quelle: IPTS 2007a, S. 259

Die Modernisierung von bestehenden Anlagen wird durch Verbesserung der Prozesse und der Katalysatoren erreicht, wobei vor allem die Verbesserung der Produkteigenschaften das Ziel ist. Teilweise ist man direkt bestrebt, den Energieverbrauch zu reduzieren, wie z. B. durch den Einsatz von KWK, Dampfgewinnung und Verwendung von energieeffizienten Kompressoren. Diese Maßnahmen wurden an deutschen Standorten bereits zum größten Teil umgesetzt.

Eine Abschätzung des realisierten Anteils jeder Maßnahme ist aus Mangel an veröffentlichten Informationen kaum möglich. Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen wahrscheinlich. Außerdem werden die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würden zahlreiche Anlagen ersetzt und die meisten Modernisierungsmaßnahmen realisiert.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Polyethylen-Herstellung werden in Tabelle 3-52 zusammengefasst.

Tabelle 3-52: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polyethylen

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Stagnieren oder leicht ansteigen
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Polyethylen substituiert klassische Werkstoffe und teilweise Spezialkunststoffe.
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine

Parameter	Wert/Beschreibung
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Brennstoffsubstitution	Keine
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	-
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	30 – 40 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes möglich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Optimierung der Katalysatoren bei HDPE und LLDPE Prozess- und Standortwärmeintegration
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz der Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Die angewandten Prozesse sind proprietär. Prozesse können daher nicht beliebig durch andere energieeffizientere ersetzt werden. Know-how- und Patentbarrieren stellen weitere Hemmnisse dar.

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Eine Standortwärmeintegration ist nicht überall möglich.
- Die Verringerung der Emissionen ist ein wichtiges Ziel. Dies erfordert aber mehr Energie.
- Bei älteren Anlagen können technische Grenzen als Hemmnisse wirken.

3.3.4.3 Polypropylen

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Der Verbrauch von Polypropylen entwickelt sich überproportional im Vergleich zu anderen Massenkunststoffen. Wegen seiner vielseitigen Eigenschaften und seiner Fähigkeit zur Bildung von Co-Polymeren substituiert Polypropylen sowohl klassische Werkstoffe als auch technische Kunststoffe. Dies gilt beispielsweise für den Automobilsektor. Dabei liegt der Anteil der Co-Polymere bei ca. 30 % der gesamten Polypropylen-Produktion. Es ist anzunehmen, dass die Bedeutung des Polypropylens während des Betrachtungszeitraumes erhalten bleibt und dass der Bedarf an Polypropylen im Vergleich zu anderen Massenkunststoffen überdurchschnittlich wachsen wird.

Die Produktion des Polypropylens in Deutschland hat in den letzten Jahren stärker als die des Polyethylens zugenommen. Ein Teil der Produktion wird analog zu Polyethylen in andere europäische Länder exportiert. Exporte in Länder außerhalb der EU sind mit weniger als 10 % niedrig. Es ist anzunehmen, dass dieser Anteil weiter abnehmen wird. Eine Ausnahme bilden spezielle Co-Polymere. In den letzten Jahren fand bei Polypropylen ebenfalls ein Konzentrationsprozess statt, sodass heute nur noch wenige Anbieter verblieben sind (siehe Kapitel 3.3.4.2). In vielen Fällen sind die Hersteller von Polyethylen und Polypropylen identisch. Die Produktion ist dann an denselben Standorten. Insgesamt kann ein leichter Anstieg der Produktion vorausgesagt werden.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Analog zu Polyethylen ist nur eine begrenzte Prozesssubstitution zu erwarten. Die verschiedenen Prozesse bzw. Prozessvarianten zur Herstellung von Polypropylen stehen nicht immer in Konkurrenz zueinander, da man mit ihnen verschiedene Eigenschaften erreichen kann. Auch die eingesetzten Katalysatoren können unterschiedlich sein. Zudem verwenden die proprietären Routen jeweils andere Prozessvarianten.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Moderne Polymerisationsprozesse und Katalysatoren der neuesten Generation zur Herstellung von Polypropylen gelten als BVT. Zusätzlich zu den in Kapitel 3.3.4.2 im Zusammenhang mit dem Polyethylen erwähnten Maßnahmen ist der Einsatz von BVT-Katalysatoren, z. B. Ziegler-Natta-Katalysatoren der fünften Generation oder Metallocen-Katalysatoren der neuesten Generation von besonderer Bedeutung.

Ähnlich wie beim Polyethylen sind die Investitionskosten für Polypropylen-Polymerisationsanlagen wesentlich niedriger als für Steam-Cracker, sodass die Errichtung von neuen Anlagen bzw. der Ersatz bestehender Anlagen mit relativ begrenzten Risiken verbunden ist. Einige neue Anlagen wurden in Deutschland in den letzten Jahren, teilweise als Ersatz für ältere Anlagen, errichtet. Die Errichtung von neuen Anlagen im großen Stil wird nicht erwartet, da die meisten Anlagen weiter betrieben werden können. Die reale Lebensdauer von Polypropylen-Anlagen wird auf mehr als 35 Jahre geschätzt. Sie ist von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung abhängig. Eine Alterung erfolgt eher durch die Entwicklung neuer Technologien. Ein Anlagenersatz wird daher die Ausnahme bleiben. Diese Tatsache gilt auch für die nächsten Jahre, da die Einführung von neuen oder verbesserten Katalysatoren nicht zwingend einen Anlagenersatz bedeutet.

Die Modernisierung von bestehenden Polypropylen-Anlagen wird durch die Verbesserung der Prozesse und der Katalysatoren erreicht, wobei die Verbesserung der Pro-

dukteigenschaften vorrangig ist. Teilweise ist man direkt bestrebt, den Energieverbrauch zu reduzieren, wie z. B. durch den Einsatz von KWK, die Dampfgewinnung und die Verwendung von energieeffizienten Kompressoren. An deutschen Standorten wurden diese Maßnahmen zum größten Teil bereits umgesetzt. Eine Schätzung des realisierten Anteils jeder Maßnahme ist aus Mangel an veröffentlichten Informationen kaum möglich. Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen möglich. Außerdem werden die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würden einige Anlagen ersetzt und die meisten Modernisierungsmaßnahmen realisiert.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Polypropylen-Herstellung werden in Tabelle 3-53 zusammengefasst.

Tabelle 3-53: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polypropylen

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Leichtes Wachstum
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Substitution von konventionellen Werkstoffen und einigen Spezialkunststoffen durch Polypropylen
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Keine
Mögliche Brennstoffsubstitution	Keine
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	-
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	30 – 40 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes wahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Optimierung der Katalysatoren Ausnutzung der Reaktionswärme für den Prozess oder am Standort
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz von Polypropylen-Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Die angewandten Prozesse sind proprietär. Prozesse können daher nicht beliebig durch andere energieeffizientere ersetzt werden. Know-how- und Patentbarrieren stellen ebenfalls Hemmnisse dar.

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Eine Standortwärmeintegration ist nicht überall möglich.
- Die Verringerung der Emissionen ist ein wichtiges Ziel. Dies erfordert aber mehr Energie.
- Bei älteren Anlagen können technische Grenzen als Hemmnisse wirken.

3.3.4.4 Polysulfone und Polysulfide

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Exemplarisch werden hier nur die Polysulfone behandelt. Diese gehören zu den warmfesten Kunststoffen mit hoher Chemikalienbeständigkeit. Sie werden in der Elektrotechnik, Elektronik, im Fahrzeug- und Maschinenbau, für Haushaltsgeräte und in der Medizintechnik eingesetzt, wenn es auf hohe Wärmebeständigkeit bei gleichzeitiger Transparenz ankommt. Die genannten Bereiche machen fast 80 % des Einsatzes aus. Weltweit sind Wachstumsraten von bis zu 15 % pro Jahr zu verzeichnen (Haberhauer 2004). Damit weisen die Polysulfone großes Entwicklungspotenzial auf, in dem sie konventionelle Werkstoffe, vor allem Metalle und Glas sowie andere Kunststoffe, wie Duroplaste, in den oben genannten Einsatzbereichen substituieren (Keim 2006, S. 228). Jedoch besteht die Gefahr, dass die Polysulfone in bestimmten Anwendungen durch preiswertere Massen- und Spezialkunststoffe, wie Polycarbonate, ersetzt werden. Trotzdem kann man annehmen, dass der Bedarf stark zunehmen wird.

Wegen der hohen Know-how-Barrieren werden Polysulfone weiterhin exportiert. Importe im großen Stil sind nicht zu erwarten. Daher wird die Produktion von Polysulfonen in Deutschland stark zunehmen.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Für jede Art der Polysulfone werden andere Prozesse eingesetzt. Dabei dominieren proprietäre Prozesse. Prozess- und Rohstoffsubstitution sind mit weiterer Forschung und Entwicklung möglich.

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Die Prozesse zur Herstellung von Polysulfonen sind relativ neu und modern. Sie gelten als BVT. Mit steigendem Bedarf wird es notwendig sein, neue Anlagen zu errichten. Die reale Lebensdauer von Polysulfon-Anlagen wird auf 35 Jahre geschätzt. Dies ist von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung abhängig. Eine Alterung erfolgt eher durch die Entwicklung neuer Technologien. Auch bestehen-

de Anlagen werden mit zunehmenden Erfahrungen modernisiert und optimiert. Eine Abschätzung des Anteils jeder Maßnahme ist aus Mangel an veröffentlichten Informationen kaum möglich. Es kann aber angenommen werden, dass ein wesentlicher Teil der Gesamtmenge der Maßnahmen bereits realisiert wurde. Im Szenario Marktdiffusion ist die Errichtung von neuen Anlagen möglich. Außerdem werden die oben genannten Modernisierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen fortgesetzt. Im Szenario technische Diffusion würde mindestens eine neue Anlage errichtet.

Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen bei der Polysulfon-Herstellung werden in Tabelle 3-54 zusammengefasst.

Tabelle 3-54: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polysulfone

Parameter	**Wert/Beschreibung**
Entwicklung der Produktion bis 2035	Bedeutendes Wachstum
Erwartete Produktsubstitution bis 2035 Erwartete neue Einsatzgebiete bis 2035	Konkurrenz zu anderen Hochleistungspolymeren, wie bestimmte Sorten von Polyamid Substitution von konventionellen Werkstoffen durch Polysulfone
Erwartete Prozesssubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Rohstoffsubstitution bis 2035	Keine
Mögliche Brennstoffsubstitution	Keine
BVT für den Prozess heute	Siehe oben
Durchschnittliches Anlagenalter 2010	-
Geschätzte reale Anlagenlebensdauer	30 – 40 Jahre
Möglicher Bau neuer Anlagen bzw. Ersatz bestehender Anlagen	Vor Ende des Untersuchungszeitraumes wahrscheinlich
Wesentliche mögliche Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen	Siehe oben
Stand der Prozesswärmeintegration Stand der Standortwärmeintegration	Starke Prozesswärmeintegration Starke Standortwärmeintegration

Produkt- und prozessspezifische Hemmnisse

Dem Ersatz von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Die angewandten Prozesse sind proprietär. Prozesse können daher nicht beliebig durch andere energieeffizientere ersetzt werden. Know-how- und Patentbarrieren stehen dem entgegen.

Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Eine Standortwärmeintegration ist nicht überall möglich.
- Bei älteren Anlagen können technische Grenzen als Hemmnisse wirken.

3.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

3.4.1 Zukünftige Entwicklung der Grundstoffchemie in Deutschland

Die zukünftige Entwicklung der chemischen Grundstoffindustrie in Deutschland soll in diesem Kapitel für den gesamten Wirtschaftszweig besprochen werden. Prozessbezogen wurde dies in dem jeweiligen Kapitel dargestellt. Ziel ist es, eine Aussage über den zukünftigen Energieverbrauch bzw. die zukünftige Entstehung von THG-Emissionen zu machen. Dabei werden sowohl die wirtschaftlichen als auch die technologischen Entwicklungen berücksichtigt.

Durch die Globalisierung, die Entstehung von neuen Wirtschaftszentren und die steigenden Rohstoff- und Energiepreise beobachtet man bereits heute zwei Trends in der Grundstoffchemie: hin zu den aufstrebenden Märkten, vor allem in Richtung Asien, und hin zu den Rohstoffquellen, vor allem in die OPEC-Länder. Diese Trends gelten vor allem für Düngemittel und Massenkunststoffe. Die Barrieren für Know-how-Transfer sind dabei in der Grundstoffchemie relativ gering. Zudem gehen international tätige Chemieunternehmen Joint Ventures mit lokalen Unternehmen ein, wodurch ein Know-how-Transfer stattfindet. Durch diese Trends und die gesättigten Märkte in Europa war in den letzten 15 Jahren das Wachstum in der Grundstoffchemie moderat. Nur wenige neue Anlagen wurden errichtet. Notwendige Kapazitätsanpassungen erreichte man meistens durch Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen (siehe auch HLG 2008). Die oben beschriebene Entwicklung wird sich in Zukunft wahrscheinlich fortsetzen.

Diese Entwicklung gilt auch für Deutschland, sodass die Grundstoffindustrie je nach Rahmenbedingungen leicht wachsen oder stagnieren wird. Es ist aber auch möglich, dass sie in bestimmten Segmenten zurückgeht. Deutschland wird seine Stellung als Netto-Exporteur von Chemiegrundstoffen an außereuropäische Länder verlieren. Dabei sind durch die zunehmende wirtschaftliche Integration der EU- und anderen westeuropäischen Ländern innereuropäische Produktionsverlagerungen möglich. Stark integrierte, durch Wasserwege erreichbare und durch Pipelines vernetzte Standorte werden auf Kosten kleinerer, isolierter Standorte gefördert.

Ein Resultat der oben beschriebenen Situation sind fallende Margen in der Grundstoffchemie in Deutschland. Dies führt auf der einen Seite dazu, dass die verfügbaren Mittel für Energieeinsparmaßnahmen knapp werden bzw. die verfügbaren technischen Möglichkeiten nicht voll ausgenutzt werden. Unter solchen Umständen würde man die Anlagen bis zum endgültigen Abschalten länger laufen lassen. Ersatz von Anlagen wegen steigenden Bedarfs wird die Ausnahme sein und nur für bestimmte Produkte gelten. Dadurch wird die Energieeffizienz nicht mehr in dem Maße verbessert, wie dies bis heute der Fall ist.

Auf der anderen Seite ist man gezwungen, die Kosten zu senken, um die Wettbewerbsfähigkeit aufrecht zu erhalten. Die dafür notwendigen Maßnahmen beeinflussen die Energieeffizienz positiv:

- Wenn neue Anlagen errichtet werden, wird die Kapazität pro Anlage steigen, um die Economies of Scale ausnutzen zu können.
- Die Herstellung von Chemiegrundstoffen wird an wenigen Standorten konzentriert, um die Vorteile von günstig gelegenen integrierten Standorten ausnutzen zu können. Dazu gehören die Stoff- und Energieintegration und die gemeinsame Nutzung von Nebenanlagen.
- Der technische Fortschritt wird ausgenutzt, um die Produktionskosten zu senken und einen technologischen Vorsprung zu gewährleisten.

Der technische Fortschritt wird sich positiv auf die Energieeffizienz auswirken. Technologien, die heute wegen ihrer hohen Kosten noch nicht oder nur teilweise wirtschaftlich sind, werden in Zukunft stärker eingesetzt:

- Energieeinsparung wird durch eine höhere Wärmeintegration erzielt, die heute noch nicht wirtschaftlich ist.
- Die Stoffintegration innerhalb einer Anlage wird durch Rücklaufführungen, höheren Einsatz an Trennoperationen usw. steigen.
- Energieeffiziente Trennverfahren werden immer öfter eingesetzt. Dazu gehören beispielsweise die Membrantechnologie und die Reaktivdestillation.
- Eine bessere Reinigung der Rohstoffe wird durch neuere Technologien möglich werden. Dadurch erzielt man höhere Ausbeuten und Selektivitäten. Dies führt wiederum zu Ressourceneinsparungen.
- Die vorhandenen Katalysatoren werden verbessert, neuere werden eingeführt. Durch die damit verbesserten Ausbeuten und Selektivitäten erzielt man einen niedrigeren Rohstoff- und Energieeinsatz. Das Verhältnis der Produkte zu den Reststoffen wird ansteigen.

- Der Einsatz von neueren Werkstoffen wird höhere Drücke und Temperaturen in den Anlagen erlauben. Dadurch kann man eventuell höhere Ausbeuten und Selektivitäten erreichen.
- Einen besseren Stoff- und Energieaustausch erreicht man durch Verwendung von speziellen Reaktortypen, wie z. B. Wirbelschichtreaktoren, oder durch konstruktive Maßnahmen.
- Ein höherer Automatisierungs- und Mechanisierungsgrad führt zu einer besseren Produktqualität und zu einem geringeren Ressourcenbedarf.
- Die Online-Analyse wird dominieren. Die Prozesse werden besser beobachtet. Energieverbrauchsmessungen für einzelne Apparate und Maschinen werden zum Standard gehören.

Zudem beeinflusst die intensive Umstrukturierung der chemischen Industrie der letzten zwei Jahrzehnte in Europa ebenfalls die Energieeffizienz. Die Fokussierung auf das Kerngeschäft mit ihren Begleiterscheinungen, wie z. B. Merger & Aquisition, führt zur Lockerung der alten Standortstrategien hin zu Chemieparks. Die alte Stoff- und Wärmeintegration an den Standorten wurden durch die neuen Betreiber der Anlagen übernommen. Es ist aber unklar, wie dies in Zukunft bei neuen Anlagen bzw. Restrukturierungen aussehen wird.

Jedoch gibt es einige Unsicherheitsfaktoren bei der Analyse zukünftiger Entwicklungen, wie beispielsweise die Entwicklung des freien Handels in der Welt, die Erschließung von neuen Rohstoff- und Energiequellen, die Kosten für den Emissionshandel und die Geschwindigkeit des Klimawandels. Außerdem fehlen veröffentlichte Daten zu der voraussichtlichen Lebensdauer der Anlagen bis zu einem Ersatz. Daher ist es schwierig, eine quantitative Voraussage zu der Produktionsentwicklung zu machen (Weiteres hierzu siehe Gielen, Bennaceur, Tam 2006).

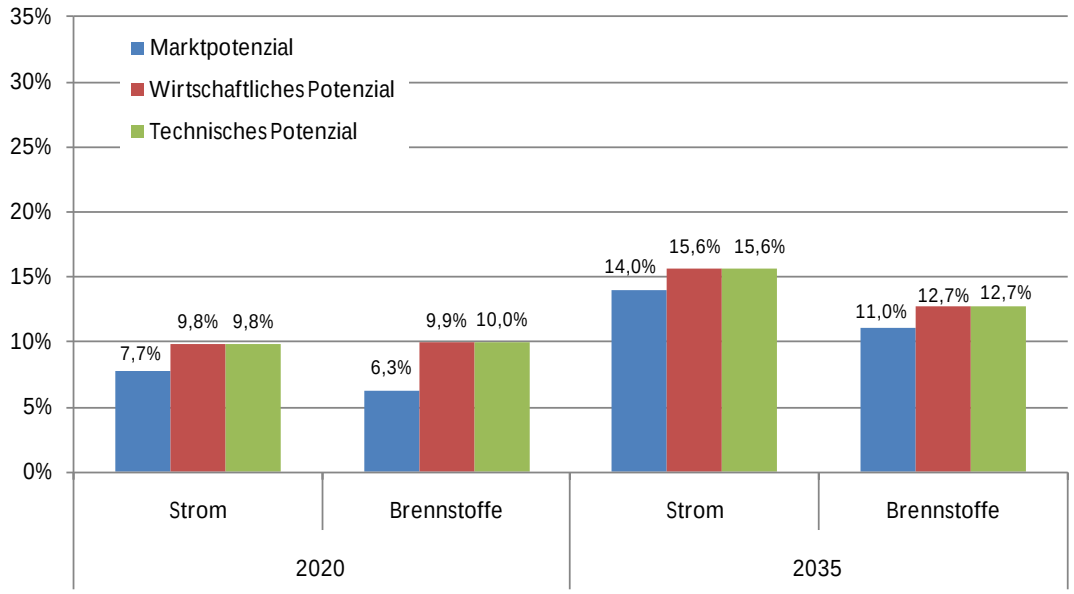
Ausgehend von den heute verfügbaren Daten und den oben gemachten Annahmen kann man folgendes Szenario für die einzelnen Produkte der Grundstoffchemie in Deutschland in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen entwerfen (siehe auch Kapitel 3.3):

- stagnierende bzw. rückläufige Produktion der Stickstoff-Düngemittel und des Methanols,
- stagnierende bzw. rückläufige Soda-Produktion,
- leicht expandierende Steam-Cracker-Produkte,
- leicht expandierende Massenkunststoffe,
- Konsolidierung der Chlorchemie,
- Konsolidierung bzw. Anstieg des Bedarfs an Sauerstoff,
- expandierende Spezialitäten und Feinchemikalien, einschließlich Spezialkunststoffe.

3.4.2 Energie- und THG-Einsparpotenziale bis 2035

Mit relativ moderaten Investitionen konnte man bis vor kurzem große Energieeinsparungen erzielen, z. B. durch Wärmeintegration (siehe Kapitel 3.2.6). Diese Maßnahmen sind zum wesentlichen Teil ausgeschöpft. Eine weitere Steigerung der Energieeffizienz erfordert jetzt investitionsintensivere Maßnahmen, die wie in Kapitel 3.3 erläutert, mit anderen Investitionsvorhaben in einem Unternehmen zu konkurrieren haben. Zudem steigt die internationale Konkurrenz an, sodass beim Ersatz älterer Anlagen in der Grundstoffchemie Zurückhaltung zu beobachten ist. Daher sind Steigerungsraten der Energieeffizienz, wie man es bis jetzt gewohnt ist, in den nächsten 25 Jahren kaum zu erwarten.

Abbildung 3-5: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Grundstoffchemiesektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario



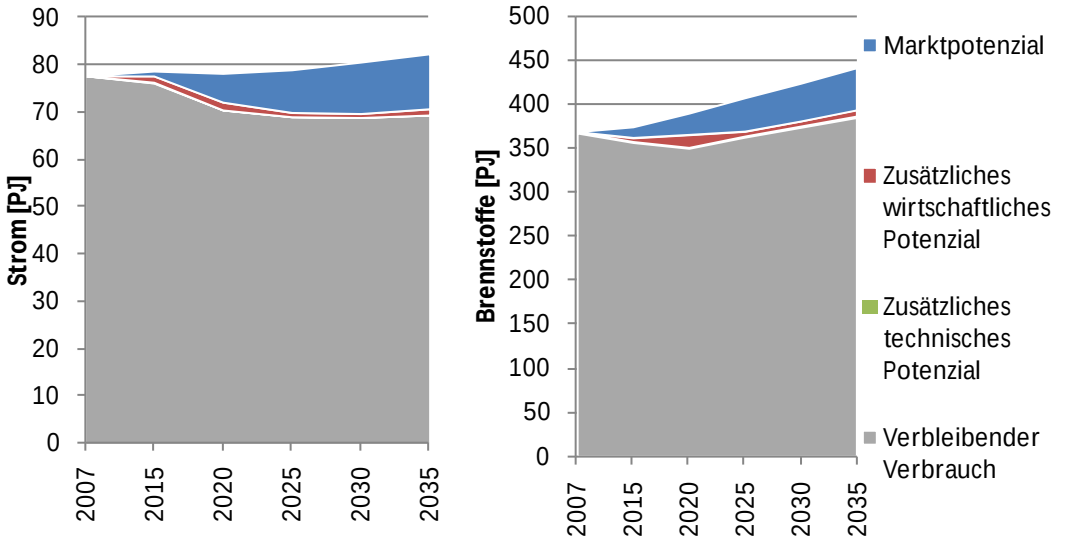
Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die Energieeinsparpotenziale wurden für die einzelnen Prozesse in dem jeweiligen Unterkapitel von 3.3 besprochen. Für Strom und Brennstoff werden die absoluten Werte in Abbildung 3-6 summarisch bis 2035 für die ausgewählten Prozesse dargestellt. Die Angaben gelten für verschiedene Szenarien. Beim Wegfallen von Hemmnissen würde der spezifische Energieverbrauch sinken.

Der spezifische Energieverbrauch je Prozess nach Szenario wird in Tabelle 3-56 zusammengestellt.

Zum Vergleich ist der spezifische Energieverbrauch im Basisjahr angegeben. Je nach Szenario entwickelt sich der Energieverbrauch unterschiedlich. Höhere Einsparpotenziale werden durch eine bessere Diffusion der Einspartechnologien während des Betrachtungszeitraumes verursacht und sind vor allem auf den Ersatz älterer Anlagen und die konsequente Umsetzung der Einsparmaßnahmen zurückzuführen. Neuere Anlagen mit modernen Technologien weisen bekanntlich einen wesentlich höheren Energiewirkungsgrad auf.

Abbildung 3-6: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035



Strom [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	77,7	78,7	78,2	79,0	80,6	82,3
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	1,0	6,0	9,0	10,8	11,5
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	1,3	1,6	0,9	0,8	1,3
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0

Brennstoffe [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	368,2	373,8	389,6	407,3	424,0	442,0
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	12,3	24,5	38,5	43,6	48,7
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	4,1	14,2	5,3	5,7	7,3
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 2.1 bis 2.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Der absolute Energieverbrauch und die absoluten THG-Emissionen hängen stark von der Entwicklung der Produktion ab. Diese wurden in dem jeweiligen Unterkapitel von 3.3 für jeden Prozess gesondert besprochen. Sie werden je Prozess nach Szenario in

Tabelle 3-57 mitgeteilt. Vor allem bei den Spezialkunststoffen und ihren Vorprodukten steigt der absolute Energieverbrauch während des Betrachtungszeitraumes signifikant an. Bei den anderen Produkten mit stagnierenden Produktionszahlen ist ein Rückgang des Energieverbrauchs zu verzeichnen. Dagegen macht sich der Emissionshandel ab 2013 bei den direkten THG-Emissionen bemerkbar.

Tabelle 3-55: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse

	Produktion [kt]					
Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Adipinsäure	544	562	573	584	595	607
Ammoniak 1, Erdgas	2.234	2.234	2.569	2.569	2.569	2.569
Ammoniak 2, andere KW	1.100	1.100	880	880	880	880
Calciumcarbid	190	190	190	190	190	190
Chlor, Amalgan-Verf.	867	867	0	0	0	0
Chlor, Diaphragma-Verf.	1.162	1.162	1.162	0	0	0
Chlor, Membran-Verf.	2.748	2.748	3.615	4.777	4.777	4.777
Ethylen 1, Naphtha	3.823	3.823	4.014	4.215	4.426	4.647
Ethylen 2, gasförmige KW	408	408	428	450	472	496
Ethylen 3, andere KW	816	816	856	899	944	991
Industrieruß	665	665	665	665	665	665
Methanol 1, Erdgas	445	445	445	445	445	445
Methanol 2, erdölbasierte KW	1.478	1.478	1.478	1.478	1.478	1.478
Methanol 3, Klärschlamm	101	101	101	101	101	101
Polycarbonat	455	501	601	661	727	799
Polyethylen	2.846	2.988	3.287	3.451	3.624	3.805
Polypropylen	1.928	2.025	2.227	2.338	2.455	2.578
Polysulfone	340	409	449	517	594	683
Salpetersäure	5.604	5.604	5.604	5.604	5.604	5.604
Sauerstoff	7.697	7.697	8.082	8.486	8.910	9.356
Soda	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415
TDI	400	480	528	581	639	703
Titandioxid 1, Sulfat	351	351	369	387	406	427
Titandioxid 2, Chlor	109	109	114	120	126	133

Die Entwicklung des Energieverbrauchs für Strom und Wärme (Brennstoff und Dampf) wird im Szenario technische Diffusion bis 2035 in Abbildung 3-7 dargestellt. Die Dominanz von einigen wenigen Produkten beim Strom- bzw. Wärmeverbrauch bleibt bestehen. Zu einem Technologiewechsel kommt es dabei nur beim Chlor.

In Tabelle 3-58 werden die absoluten Energie- und THG-Einsparpotenziale nach Prozessen wiedergegeben. In dieser Tabelle werden sowohl die Entwicklung der Produktion als auch die Diffusion der Einsparmaßnahmen berücksichtigt.

Die Untersuchungen der einzelnen Prozesse zeigen, dass im Falle des wahrscheinlichsten Szenarios mit begrenztem Ersatz für ältere Anlagen und weiterer Modernisierung bestehender Anlagen das wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial je nach Rahmenbedingungen bei 10 – 20 % liegt. Der untere Wert geht von einer sehr begrenzten

Tabelle 3-56: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess nach Szenario

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Adipinsäure	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Ammoniak 1, Erdgas	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Ammoniak 2, andere KW	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4
Calciumcarbid	8,3	8,3	8,3	8,1	8,0	8,1	7,8	8,1	7,8
Chlor, Amalgan-Verf.	12,8	-	-	-	-	-	-	-	-
Chlor, Diaphragma-Verf.	10,7	10,7	-	10,7	-	10,7	-	10,7	-
Chlor, Membran-Verf.	10,0	10,0	10,0	9,6	9,3	9,6	9,3	9,6	9,3
Ethylen 1, Naphtha	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylen 2, gasförmige KW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylen 3, andere KW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Industrieruß	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,7	1,6	1,7	1,6
Methanol 1, Erdgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Methanol 2, erdölbasierte KW	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Methanol 3, Klärschlamm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Polycarbonat	2,7	2,7	2,7	1,9	1,8	1,9	1,8	1,9	1,8
Polyethylen	2,0	2,0	2,0	1,6	1,6	1,6	1,5	1,6	1,5
Polypropylen	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Polysulfone	3,1	3,1	3,1	2,1	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0
Salpetersäure	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sauerstoff	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6
Soda	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
TDI	2,8	2,8	2,8	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1
Titandioxid 1, Sulfat	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,4	3,5	3,4
Titandioxid 2, Chlor	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,3	2,2

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Adipinsäure	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9
Ammoniak 1, Erdgas	8,7	8,7	8,7	8,5	4,6	4,7	4,2	4,7	4,2
Ammoniak 2, andere KW	16,5	16,5	16,5	16,3	16,1	16,1	15,6	16,1	15,6
Calciumcarbid	6,1	6,1	6,1	5,9	5,7	5,8	5,6	5,8	5,6
Chlor, Amalgan-Verf.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chlor, Diaphragma-Verf.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chlor, Membran-Verf.	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Ethylen 1, Naphtha	35,5	35,5	35,5	34,1	33,3	33,5	32,8	33,5	32,8
Ethylen 2, gasförmige KW	17,5	17,5	17,5	16,7	16,2	16,3	15,8	16,3	15,8
Ethylen 3, andere KW	47,0	47,0	47,0	45,4	44,4	44,7	43,8	44,7	43,8
Industrieruß	64,7	64,7	64,7	62,2	60,2	61,8	59,6	61,8	59,6
Methanol 1, Erdgas	6,9	6,9	6,9	6,7	6,6	6,7	6,3	6,7	6,3
Methanol 2, erdölbasierte KW	17,2	17,2	17,2	16,9	16,7	16,8	16,2	16,8	16,2
Methanol 3, Klärschlamm	18,7	18,7	18,7	17,7	16,6	17,3	16,3	17,3	16,3
Polycarbonat	12,9	12,9	12,9	8,5	8,1	8,4	7,8	8,4	7,8
Polyethylen	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4
Polypropylen	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Polysulfone	24,5	24,5	24,5	17,5	17,0	17,3	16,6	17,3	16,6
Salpetersäure	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1
Sauerstoff	-	-	-	- 0,0	- 0,0	- 0,0	- 0,0	- 0,0	- 0,0
Soda	11,3	11,3	11,3	10,5	10,4	10,5	10,2	10,4	10,2
TDI	26,7	26,7	26,7	16,1	16,0	15,7	15,7	15,7	15,7
Titandioxid 1, Sulfat	39,7	39,7	39,7	38,9	38,5	38,7	38,0	38,7	38,0
Titandioxid 2, Chlor	16,5	16,5	16,5	16,1	15,9	16,0	15,5	16,0	15,5

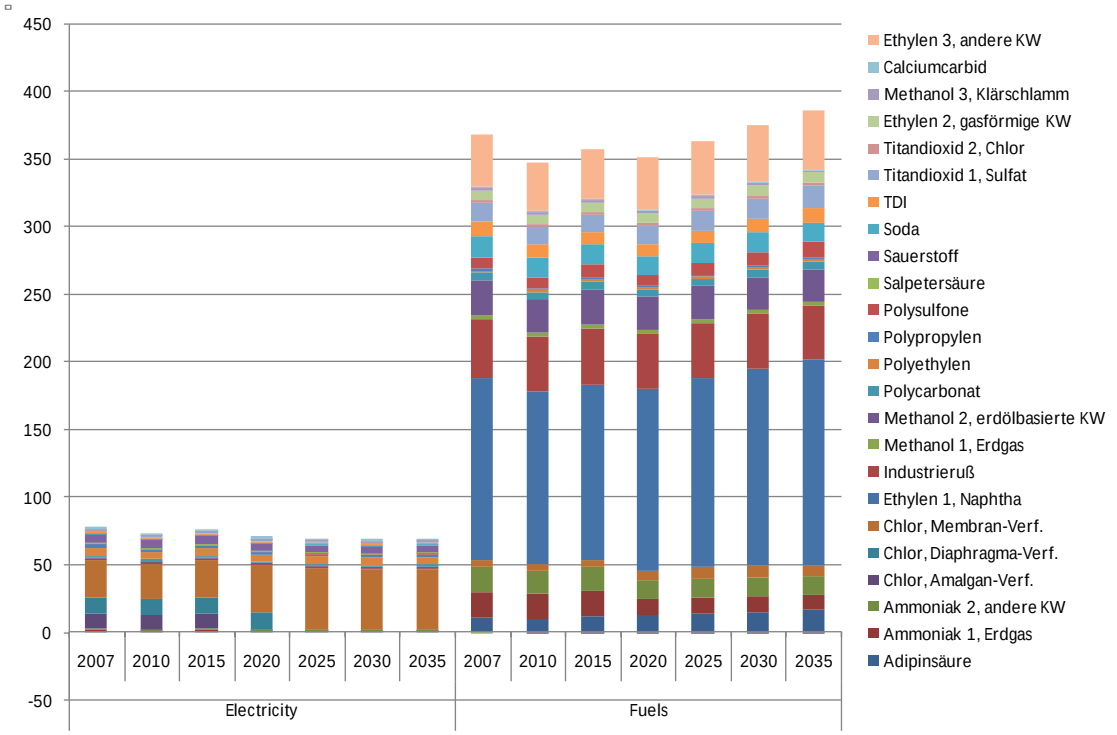
Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3 sowie Tabelle 3-55 genannten Datenquellen und Annahmen

Errichtung von neuen Anlagen und einem begrenztem Ersatz älterer Anlagen sowie von begrenzten Investitionen für die Energieeinsparung aus. Der höhere Wert setzt eine stabilere Wirtschaftentwicklung und eine bleibende Konkurrenzfähigkeit im internationalen Wettbewerb voraus. Dabei ist ein größeres Einsparpotenzial bei Brennstoff und Dampf als bei Strom möglich.

Wichtige Energieeinsparpotenziale sind auch bei den Nebenanlagen vorhanden, die nicht Gegenstand dieser Untersuchung sind, sodass die Energieeinsparpotenziale für die gesamte Grundstoffchemie doch höher liegen. Beispiele hierzu sind Intensivierung der Verwendung der KWK in der chemischen Industrie, Optimierung der Bereitstellung von Kälte, Druckluft[45] und Kühlwasser usw.

Die chemische Industrie schätzt die jährliche Steigerung der Energieeffizienz ebenfalls moderat ein und nennt Werte von 0,5 – 1 % (im Durchschnitt 0,75) jährlich. Diese Angaben decken sich weitgehend mit den ermittelten Werten.

Abbildung 3-7: Die Entwicklung des Energieverbrauchs nach Prozessen bis 2035



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3 genannten Datenquellen und Annahmen

45 Zu Druckluft siehe beispielsweise Kreisel und Jochem 1996; Österreichische Energieagentur 2007c.

Tabelle 3-57: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Adipinsäure	0,78	0,83	0,87	0,83	0,87	0,83	0,87	0,83	0,87
Ammoniak 1, Erdgas	1,07	1,23	1,23	1,20	0,81	0,82	0,75	0,82	0,75
Ammoniak 2, andere KW	0,53	0,42	0,42	0,41	0,40	0,40	0,38	0,40	0,38
Calciumcarbid	1,58	1,58	1,58	1,54	1,51	1,54	1,48	1,54	1,48
Chlor, Amalgan-Verf.	11,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chlor, Diaphragma-Verf.	12,42	12,42	0,00	12,42	0,00	12,42	0,00	12,42	0,00
Chlor, Membran-Verf.	27,59	36,29	47,96	34,67	44,38	34,67	44,38	34,67	44,38
Ethylen 1, Naphtha	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylen 2, gasförmige KW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylen 3, andere KW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Industrieruß	1,18	1,18	1,18	1,12	1,08	1,11	1,06	1,11	1,06
Methanol 1, Erdgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Methanol 2, erdölbasierte KW	0,96	0,96	0,96	0,94	0,92	0,93	0,88	0,93	0,88
Methanol 3, Klärschlamm	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Polycarbonat	1,21	1,60	2,13	1,14	1,47	1,13	1,43	1,13	1,43
Polyethylen	5,81	6,71	7,76	5,35	5,95	5,27	5,79	5,27	5,79
Polypropylen	2,21	2,56	2,96	1,81	2,01	1,79	1,96	1,79	1,96
Polysulfone	1,04	1,38	2,09	0,95	1,39	0,94	1,35	0,94	1,35
Salpetersäure	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Sauerstoff	7,31	7,68	8,89	6,75	6,19	5,71	5,44	5,71	5,44
Soda	0,47	0,47	0,47	0,46	0,45	0,46	0,45	0,46	0,45
TDI	1,10	1,46	1,94	1,17	1,56	1,12	1,50	1,12	1,50
Titandioxid 1, Sulfat	1,28	1,35	1,56	1,31	1,49	1,30	1,47	1,30	1,47
Titandioxid 2, Chlor	0,26	0,27	0,31	0,26	0,30	0,26	0,29	0,26	0,29
Summe	77,96	78,40	82,35	72,36	70,80	70,73	69,51	70,73	69,51

	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Adipinsäure	14,63	15,42	16,34	15,42	16,34	15,42	16,34	15,42	16,34
Ammoniak 1, Erdgas	19,44	22,35	22,35	21,81	11,81	11,98	10,76	11,98	10,76
Ammoniak 2, andere KW	18,16	14,53	14,53	14,32	14,14	14,20	13,76	14,20	13,76
Calciumcarbid	1,16	1,16	1,16	1,12	1,08	1,10	1,05	1,10	1,05
Chlor, Amalgan-Verf.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chlor, Diaphragma-Verf.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chlor, Membran-Verf.	5,08	6,69	8,84	6,69	8,84	6,69	8,84	6,69	8,84
Ethylen 1, Naphtha	135,72	142,51	164,97	136,90	154,77	134,64	152,37	134,64	152,37
Ethylen 2, gasförmige KW	7,14	7,49	8,67	7,13	8,01	6,99	7,85	6,99	7,85
Ethylen 3, andere KW	38,33	40,25	46,59	38,87	44,03	38,30	43,43	38,30	43,43
Industrieruß	43,04	43,04	43,04	41,31	40,02	41,06	39,59	41,06	39,59
Methanol 1, Erdgas	3,10	3,10	3,10	3,01	2,93	2,97	2,79	2,97	2,79
Methanol 2, erdölbasierte KW	25,45	25,45	25,45	25,05	24,68	24,81	23,93	24,81	23,93
Methanol 3, Klärschlamm	1,89	1,89	1,89	1,80	1,68	1,75	1,66	1,75	1,66
Polycarbonat	5,85	7,72	10,28	5,11	6,48	5,03	6,24	5,03	6,24
Polyethylen	1,82	2,10	2,44	1,53	1,70	1,50	1,65	1,50	1,65
Polypropylen	1,53	1,77	2,05	1,20	1,33	1,18	1,29	1,18	1,29
Polysulfone	8,34	11,00	16,73	7,87	11,61	7,79	11,34	7,79	11,34
Salpetersäure	- 0,40	- 0,40	- 0,40	- 0,42	- 0,42	- 0,42	- 0,42	- 0,42	- 0,42
Sauerstoff	-	-	-	- 0,09	- 0,22	- 0,12	- 0,31	- 0,12	- 0,31
Soda	16,04	16,04	16,04	14,88	14,68	14,81	14,51	14,73	14,42
TDI	10,68	14,09	18,76	8,52	11,24	8,28	11,02	8,28	11,02
Titandioxid 1, Sulfat	13,95	14,65	16,96	14,36	16,44	14,25	16,23	14,25	16,23
Titandioxid 2, Chlor	1,80	1,89	2,18	1,84	2,10	1,83	2,06	1,83	2,06
Summe	372,73	392,73	441,96	368,22	393,29	354,05	385,97	353,96	385,88

…

Fortsetzung Tabelle 3-57:

	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Adipinsäure	9.114	9.582	9.991	4.339	4.067	3.290	1.475	3.290	1.475
Ammoniak 1, Erdgas	1.782	2.013	1.793	1.976	1.197	1.334	1.135	1.334	1.135
Ammoniak 2, andere KW	2.763	2.192	2.071	2.177	2.048	2.169	2.026	2.169	2.026
Calciumcarbid	352	333	232	325	221	323	216	323	216
Chlor, Amalgan-Verf.	1.990	0	0	0	0	0	0	0	0
Chlor, Diaphragma-Verf.	2.223	2.087	0	2.087	0	2.087	0	2.087	0
Chlor, Membran-Verf.	5.242	6.490	5.688	6.217	5.298	6.217	5.298	6.217	5.298
Ethylen 1, Naphtha	8.104	8.369	8.597	8.040	8.066	7.907	7.940	7.907	7.940
Ethylen 2, gasförmige KW	426	440	452	419	417	410	409	410	409
Ethylen 3, andere KW	2.289	2.364	2.428	2.283	2.294	2.249	2.263	2.249	2.263
Industrieruß	2.781	2.726	2.372	2.615	2.203	2.598	2.179	2.598	2.179
Methanol 1, Erdgas	185	182	161	177	152	174	145	174	145
Methanol 2, erdölbasierte KW	1.692	1.656	1.431	1.629	1.387	1.613	1.343	1.613	1.343
Methanol 3, Klärschlamm	117	115	101	109	90	106	88	106	88
Polycarbonat	566	722	768	492	498	485	481	485	481
Polyethylen	1.148	1.250	973	989	737	974	717	974	717
Polypropylen	488	533	429	374	288	370	280	370	280
Polysulfone	684	877	1.100	622	757	616	738	616	738
Salpetersäure	3.116	3.117	3.119	1.855	848	1.126	371	1.126	371
Sauerstoff	1.309	1.290	969	1.128	663	953	577	953	577
Soda	1.041	1.020	887	951	814	947	805	942	800
TDI	835	1.072	1.189	697	756	675	737	675	737
Titandioxid 1, Sulfat	1.063	1.086	1.054	1.063	1.019	1.055	1.006	1.055	1.006
Titandioxid 2, Chlor	153	156	148	152	142	151	139	151	139
Summe	49.463	49.674	45.952	40.715	33.963	37.832	30.372	37.827	30.368

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 3-58: Resultierender Energie- und THG-Einsparpotenziale nach Prozessen

	Energie-Einsparpotenzial						**THG Vermeidung**		
	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brenn-stoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Grundstoffchemie	7,67	12,84	38,77	56,07	**16%**	**13%**	10.563	15.584	**28%**
Adipinsäure	-	-	-	-	**0%**	**0%**	5.008	8.517	**84%**
Ammoniak 1, Erdgas	0,41	0,49	10,38	11,59	**40%**	**52%**	679	657	**32%**
Ammoniak 2, andere KW	0,02	0,04	0,33	0,76	**11%**	**5%**	23	45	**2%**
Calciumcarbid	0,04	0,10	0,06	0,11	**6%**	**9%**	10	16	**5%**
Chlor, Membran-Verf.	1,63	3,58	-	-	**7%**	**0%**	273	391	**4%**
Ethylen 1, Naphtha	-	-	7,86	12,60	**0%**	**8%**	462	657	**7%**
Ethylen 2, gasförmige KW	-	-	0,50	0,82	**0%**	**9%**	30	43	**8%**
Ethylen 3, andere KW	-	-	1,95	3,16	**0%**	**7%**	115	165	**6%**
Industrieruß	0,07	0,12	1,98	3,44	**10%**	**8%**	128	192	**7%**
Methanol 1, Erdgas	-	-	0,13	0,31	**0%**	**10%**	8	16	**9%**
Methanol 2, erdölbasierte KW	0,03	0,08	0,64	1,53	**8%**	**6%**	43	88	**5%**
Methanol 3, Klärschlamm	0,00	0,00	0,14	0,23	**13%**	**12%**	8	13	**11%**
Polycarbonat	0,47	0,70	2,69	4,04	**33%**	**39%**	237	287	**29%**
Polyethylen	1,43	1,97	0,60	0,79	**25%**	**32%**	276	256	**17%**
Polypropylen	0,77	1,00	0,59	0,76	**34%**	**37%**	163	149	**23%**
Polysulfone	0,43	0,74	3,21	5,40	**35%**	**32%**	261	362	**26%**
Salpetersäure	-	-	0,02	0,02	**0%**	**-5%**	1.990	2.747	**88%**
Sauerstoff	1,97	3,44	0,12	0,31	**39%**	**0%**	337	391	**25%**
Soda	0,01	0,02	1,31	1,61	**5%**	**10%**	79	86	**8%**
TDI	0,33	0,44	5,81	7,74	**23%**	**41%**	397	451	**31%**
Titandioxid 1, Sulfat	0,05	0,09	0,40	0,73	**6%**	**4%**	32	48	**4%**
Titandioxid 2, Chlor	0,01	0,02	0,06	0,12	**6%**	**6%**	5	8	**5%**

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 3.1 bis 3.3 genannten Datenquellen und Annahmen

3.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren

3.5.1 Einführung

Die prozess- bzw. produktspezifischen Hemmnisse wurden in dem jeweiligen Kapitel behandelt. In diesem Kapitel werden die branchenspezifischen Hemmnisse untersucht, die sowohl bei der Errichtung neuer Anlagen als auch bei bestehenden Anlagen gelten können:

- Die oben erwähnten zukünftigen Aussichten und geringeren Margen in der Grundstoffchemie (Kapitel 2.4) führen zu Unsicherheiten und Zurückhaltung bei neuen Investitionen. Dies gilt auch für Energieeffizienzmaßnahmen.
- Bei allen, auch bei größeren Unternehmen, ist die Liquidität begrenzt. Energieeinsparmaßnahmen müssen mit anderen Investitionen, wie der Errichtung von neuen Produktionsanlagen, der Erschließung neuer Märkte usw. konkurrieren. Sie werden nur dann realisiert, wenn der wirtschaftliche Vorteil genauso groß bzw. größer als bei anderen Investitionsvorhaben ist. Mit anderen Worten, es werden die gleichen, relativ hohen Renditeerwartungen wie beim Kerngeschäft angelegt.
- Die Optimierung des Energieverbrauchs ist nicht das Hauptanliegen von Chemieunternehmen. Sie streben in der Regel die Optimierung der Ausbeute und der Selektivität an. Das Optimum der Ausbeute kann eventuell zum Ressourcenoptimum führen, aber nicht unbedingt zum Energieoptimum. Die Optimierung der Selektivität kann ebenfalls zum Ressourcenoptimum führen, hat jedoch meistens die Qualitätsverbesserung zum Ziel.
- Neuere Technologien müssen vor ihrem Einsatz von den Chemieunternehmen bewertet werden. Auch eine positive Entscheidung für eine Technologie kann Risiken nicht ausschließen. Unternehmen scheuen eventuell wegen Lieferverpflichtungen oder einer hohen Integration am Standort usw. solche Risiken.
- Eine starke Fluktuation der Energiepreise war in den letzten 10 Jahren zu beobachten. Dadurch entsteht eine Planungsunsicherheit. Manche Unternehmen legen einen perspektivischen Energiepreis aufgrund einer Analyse der Energiemärkte fest, der als Grundlage aller Planungsaktivitäten dient. Dieser Wert ist in vielen Fällen konservativ, da er einen Sicherheitszuschlag enthält. Andere gehen von dem aktuellen Energiepreis aus. Außerdem ist ein Anstieg des Strompreises aufgrund des Emissionshandels zu erwarten. Die Höhe ist aber noch nicht bekannt.
- Ein Hemmnis für Innovationen bei Anlagenbau-Unternehmen ist die notwendige Kooperation mit den Betreibern von Chemieanlagen. Man braucht in der Regel einen Partner für den Einsatz der Technologie (großtechnische Realisierung), denn der Anlagenbauer braucht eine Referenz für seine Technologie. Der Betreiber scheut manchmal das damit verbundene Risiko. So können Innovationen nicht realisiert werden.

- Es besteht bei den Chemieunternehmen eine große Unsicherheit über die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der Teilnahme am Emissionshandel ab 2013. Die Handhabung von bestimmten Anlagen mit hohen direkten THG-Emissionen, wie z. B. Salpetersäure- und Adipinsäureanlagen (beide mit N_2O-Emissionen), ist noch unbekannt.
- Eine geforderte Produktqualität kann eventuell einen größeren Energieverbrauch verlangen, z. B. durch zusätzliche Trennoperationen.
- Die Reduktion von Emissionen, z. B. von NO_x und SO_x, ist ein wichtiges Ziel in der chemischen Industrie, jedoch meistens mit zusätzlichem Energieverbrauch verbunden. Als Beispiel ist hier die Herstellung von Industrieruß zu nennen.

Einige Hemmnisse sind spezifisch für die Errichtung von neuen Chemieanlagen (siehe Kapitel 3.5.2), andere gelten für bestehende Anlagen (siehe Kapitel 3.5.3).

3.5.2 Hemmnisse bei der Errichtung neuer Chemieanlagen

Die Errichtung von neuen Anlagen für die Herstellung von Grundchemikalien wird in Zukunft in Deutschland eher die Ausnahme bleiben. Dabei stehen folgende Hemmnisse entgegen:

- Die vorherrschende Unsicherheit in der Grundstoffchemie wird dazu führen, dass die Chemieunternehmen den Ersatz von älteren Anlagen so weit wie möglich hinausschieben. Dies gilt vor allem für Anlagen, die nicht zum Kerngeschäft gehören. Sie werden eventuell überhaupt nicht ersetzt, sodass die Produktion aufgegeben wird. Für einige Produkte, wie Ammoniak, Methanol, Soda usw., ist die internationale Konkurrenz sehr groß. Nur bei steuerlich abgeschriebenen Anlagen ist man in der Lage mit modernen Anlagen an anderen Standorten auf der Welt zu konkurrieren, da die Herstellkosten nicht mehr durch die kapitalabhängigen Kosten belastet werden. Neue Anlagen würden meistens höhere Herstellkosten aufweisen, obwohl die Betriebskosten bedingt durch die höhere Ressourceneffizienz niedriger sind.
- Die meisten Anlagen der Grundstoffchemie in Deutschland sind in einem guten Zustand. Sie wurden regelmäßig modernisiert, um gesetzlichen Regelungen zu entsprechen, um die Kapazität anzupassen und/oder die Ressourceneffizienz zu steigern. Dadurch fehlt eine direkte Motivation für einen Ersatz der Anlagen.
- Der Ersatz einer bestehenden Anlage durch eine neuere Technologie kann bei integrierten Standorten die stoffliche und energetische Verflechtung negativ beeinflussen. So sind manche Produktionsanlagen auf ihre Folgeprodukte so abgestimmt, dass wenn sie durch energieeffizientere Prozesse ersetzt werden, die Folgeprodukte eventuell nicht mehr oder nur noch zu höheren Kosten hergestellt werden können. Als Beispiel ist hier eine Chloralkalielektrolyse-Anlage nach dem Diaphragma-Verfahren mit einer nachgeschalteten Anlage zur Herstellung von Propylenoxid genannt (vgl. Kapitel 3.2.2.1).

· Die mangelnde Verfügbarkeit eines Rohstoffes bzw. sein Preis kann ein Hemmnis bei der Auswahl eines energieeffizienteren Prozesses bzw. einer energieeffizienteren Prozessvariante sein (siehe beispielsweise Kapitel 3.3.3.4).

Die Konsequenz aus den oben genannten Hemmnissen könnte eine Entscheidung gegen die Errichtung einer neuen Anlage sein bzw. im Falle einer positiven Entscheidung, nicht unbedingt bei allen Komponenten energieeffiziente Technologien einzusetzen.

3.5.3 Hemmnisse bei bestehenden Anlagen

Wie oben beschrieben, sind hauptsächlich bestehende Anlagen Ziel von Energieeinsparmaßnahmen. Der Modernisierung von bestehenden Anlagen stehen folgende Hemmnisse entgegen:

· Modernisierungsmaßnahmen können sich bei älteren Anlagen nicht lohnen, wenn das Produkt nicht zum Kerngeschäft des Betreibers gehört.

· Manche Technologien passen nicht zu älteren Anlagen bzw. zu bestimmten Prozessvarianten. In diesem Zusammenhang sind N_2O-Abgas-Reinigungsanlagen zu nennen, die für N/N-Salpetersäure-Anlagen ungeeignet sind.

· Einige technische Maßnahmen können nur bei neuen Anlagen wirtschaftlich sinnvoll eingeführt werden. Dazu gehören beispielsweise bestimmte Wärmeintegrations- und Wärmerückgewinnungsmaßnahmen. Die Einführung von BVT-Maßnahmen ist in der Regel bei bestehenden Anlagen mit höheren Kosten verbunden als bei neuen Anlagen. Außerdem bestehen technische Grenzen für die Modernisierung von bestehenden Anlagen. Beispielsweise sind die RPR-Technologie und der Einbau einer zusätzlichen Gasturbine neuen Ammoniak-Anlagen vorbehalten. Der Platzmangel für die Energieeinsparmaßnahme kann ebenfalls ein Hemmnis sein.

· Für bestimmte Technologien sind nur wenige Anbieter vorhanden, wie z. B. bei Abgasbehandlungsanlagen für N_2O-Abgase.

· An kleineren, weniger integrierten Standorten sind die Potenziale für Standortwärmeintegration begrenzt.

3.5.4 Erfolgsfaktoren für die Steigerung der Energieeffizienz

Neben den oben genannten Hemmnissen sind einige Erfolgsfaktoren vorhanden, die die Diffusion von neueren Technologien fördern. Dazu gehören folgende Charakteristika der Grundstoffchemie:

· Ein Großteil der Grundstoffe wird in der Großchemie hergestellt. Diese verfügt über ausreichende finanzielle Mittel, genügend Know-how und organisatorische Fähigkeiten, um Energieanalysen durchzuführen und Energieeinsparmaßnahmen einzulei-

ten. Die organisatorischen Hemmnisse sowie Informationsdefizite sind im Vergleich zu kleinen und mittelständischen Unternehmen gering.

- Die Anlagen zur Herstellung von Chemiegrundstoffen stehen in der Regel an großen, integrierten Standorten, die eine Stoff- und Energieintegration ermöglichen.
- Energiesparmaßnahmen führen oft zu Ressourceneinsparungen. Diese sind ein höheres Ziel bei Chemieunternehmen, vor allem bei starker Konkurrenz und steigenden Energiepreisen.
- Die Verwendung innovativer Technologien zur Verbesserung der Produktqualität kann eventuell zu Energieeinsparung führen. In diesem Zusammenhang sind Katalysatoren mit höherer Selektivität zu nennen.
- In vielen Unternehmen der Grundstoffchemie in Deutschland sind zentrale Stäbe für Energieeffizienz gebildet worden. Diese verfügen über fundiertes Wissen und große Erfahrungen. Sie beraten die Werksleitungen bzw. die Planungsabteilungen bei Energieeffizienzfragen und können auf Energieeinsparpotenziale verweisen. Bei einigen großen Herstellern von Grundchemikalien hat man damit angefangen, die Energieeffizienz bei vorhandenen Produktionsanlagen systematisch zu analysieren.
- Das Image als energieeffizientes Unternehmen ist von großer Bedeutung für viele Chemieunternehmen. Diese legen Energieeffizienzziele fest, die öffentlich bekannt gegeben werden. Man sucht dann nach Möglichkeiten, um diese Ziele zu erreichen.

3.6 Branchenspezifische energiepolitische Instrumente

Die meisten energiepolitischen Instrumente gelten branchenübergreifend und damit auch für die chemische Industrie (siehe hierzu Kapitel 1). Sie werden hier nur soweit behandelt, wie sie chemiespezifisch wirken. Dabei wurden einige dieser Instrumente bereits eingeführt. Weitere sind geplant. Beide Gruppen werden in Kapitel 3.6.1 besprochen. In Kapitel 3.6.2 werden ausgehend von den oben beschriebenen Hemmnissen energiepolitische Instrumente vorgeschlagen, die zu ihrer Überwindung beitragen können.

3.6.1 Bestehende und geplante Instrumente

Bestehende und geplante energiepolitische Instrumente können auf der einen Seite in internationale, EU- und nationale Instrumente und auf der anderen Seite in rechtlich verbindliche Regelungen und freiwillige Verpflichtungen eingeteilt werden.

Auf internationaler Ebene gelten neben dem Kyoto-Protokoll einige Projekte und Initiativen, an denen sich Unternehmen freiwillig beteiligen können, wie z. B. das Carbon Disclosure Project (CDP) und Greenhouse Gas Protocol (GHG).

Auf EU-Ebene wurde eine Anzahl von Richtlinien und Regelungen verabschiedet, die direkt oder indirekt durch ihre nationale Umsetzung für die Grundstoffchemie von Bedeutung sind. Dazu gehören:

- IPPC-Richtlinie: Die Richtlinie 96/61/EG des Rates über „die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ (IPPC-Richtlinie) ist am 30.10.1996 in Kraft getreten und gilt für neue und bestehende IPPC-Anlagen. Die TA Luft, in der letzten Version vom 24. Juni 2002, gilt als die wichtigste Verwaltungsvorschrift für die chemische Industrie. Sie legt die maximal zulässigen Emissionswerte fest, z. B. für direkte THG-Emissionen.
- Der EU-Emissionshandel: Dieser gilt ab 2013 auch für die chemische Industrie. Die Umsetzung steht noch nicht genau fest, z. B. wie das Benchmarking gehandhabt wird, welche energieintensive Prozesse bzw. Produkte ausgenommen werden (Ausnahmeregelung), wie Prozesse zur Herstellung eines Produktes mit unterschiedlicher Rohstoffbasis gehandhabt werden usw. Die im Kyoto-Protokoll vorgesehene „Joint Implementation” ist ein Instrument des Emissionshandels. Es kann auch von der chemischen Industrie eingesetzt werden, um die Treibhausgase von Chemieanlagen zu vermindern (Beispiele hierzu in Kapitel 3.2.1.1).

Außerdem wurden in Deutschland bzw. in der EU Umweltziele, z. B. im Rahmen des „EU-Ziel 2007“ und des Koalitionsvertrags aus dem Jahr 2005 festgelegt, die die Realisierung der oben genannten Instrumente beeinflussen.

Außer den genannten Instrumenten beeinflussen mehrere nationale Gesetzte und Verordnungen die Energieeffizienz in der chemischen Industrie direkt oder indirekt, wie z. B. IEKP (2007), die KWK-Förderung, das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), die Ökosteuer auf Mineralöle, Erdgas und Strom sowie die Anreize für innovative Technologien durch Subventionen oder Steuernachlass (vgl. NEEAP 2007).

Zusätzlich ist die chemische Industrie in Europa bzw. in Deutschland einige freiwillige Verpflichtungen eingegangen, die direkt oder indirekt zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. zur Verringerung der THG-Emissionen beitragen:

- „Die chemische Industrie verpflichtete sich im Jahre 1995/96, die im Kyoto-Protokoll enthaltenen und für die chemische Industrie relevanten energiebedingten CO_2-Emissionen von 1990 bis zum Jahr 2012 um 45 – 50 % zu senken. Dies entspricht einer absoluten Reduktion von 91,2 Mt CO_2-eq. im Jahre 1990 auf 50 bis 46 Mt CO_2-Äquivalente im Jahre 2012.“ (www.VCI.de, abgelesen am 25.2.2010). Diese Selbstverpflichtung wurde dann im Jahre 2000 auf andere Treibhausgase erweitert. Nach dieser Verpflichtung sollen gegenüber 1990 als Bezugsjahr bis 2012 Emissionen von energiebedingtem CO_2 und von N_2O um zusammen 45 bis 50 % CO_2-eq. verringert werden (VCI 2010).
- Die europäische Chlorchemie hat sich freiwillig verpflichtet, alle Amalgam-Anlagen zur Chlor-Herstellung bis 2020 zu ersetzen bzw. stillzulegen (siehe Kapitel 3.3.3.1).

3.6.2 Empfehlungen für energiepolitische Instrumente für die Grundstoffchemie

Im Folgenden werden einige energiepolitische Instrumente für die Grundstoffchemie vorgeschlagen. Sie werden in vier Gruppen zusammengefasst:

Ordnungspolitik

- Die vorhandenen energiepolitischen Steuerungsinstrumente (EEG, KWKG usw.) sollen langfristig und nach Effizienz ausgerichtet werden.
- Es sollen einheitliche Standards für die Energieeffizienz auf europäischer Ebene, wie z. B. für elektrische Maschinen, geschaffen werden.

Förderung

- Die energierelevante Forschung und Entwicklung soll durch die Erhöhung der staatlichen Förderung gesteigert werden. Dabei soll der Energieeffizienz ein besonderes Augenmerk geschenkt werden.
- Die Verwendung von Biomasse für die Produktion von Chemierohstoffen und chemischen Produkten soll für eine Übergangszeit gefördert werden.
- Die Einführung von Energieeffizienzmanagementsystemen soll analog zu den Umweltmanagementsystemen gefördert werden.

Prämien und Subventionen

- Für die Energieeffizienz kontraproduktive Subventionen sollen abgebaut werden.
- Es sollen Instrumente eingeführt werden, um besonders energieeffiziente Technologien finanziell zu unterstützen, wenn sie zurzeit die Wirtschaftlichkeitsgrenze noch nicht überschritten haben. Dies kann in Form von Steueranreizen geschehen.

Marktinstrumente

- Das Image als energieeffizientes Unternehmen (grünes Image) ist von großer Bedeutung für viele Chemieunternehmen. Diese legen freiwillige Ziele und Vorgaben für Energieeffizienz fest, die öffentlich bekannt gegeben werden. Man sucht dann nach Möglichkeiten, um diese Ziele zu erreichen. Zu dieser Maßnahme kann auch ein Energieeffizienzwettbewerb gehören.

Außerdem können Maßnahmen durch Verbände, Normungsinstitute usw. zur Institutionalisierung des Energiemanagements eingeführt werden. Analog zu Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen können Unternehmen auf freiwilliger Basis daran teilnehmen.

Eine höhere Transparenz bezüglich des Zustands der Anlagen in Deutschland und möglicher Einsparpotenziale würden weitere Studien zur Energieeffizienz wesentlich erleichtern.

Auf betrieblicher Ebene wurden zahlreiche Instrumente eingeführt, die sich teilweise etabliert haben. Sie tragen wesentlich zur Steigerung der Energieeffizienz bei. Eine Aufzählung findet man im Abschnitt 3.9, Anhang B.

3.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die chemische Industrie in Deutschland ist die größte in Europa. Sie ist auch eine der energieintensivsten Industrien im Jahr 2007 mit ca. 5,22 % des gesamten Energieverbrauchs (AGEB 2007). Bemühungen zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs führten zu bedeutenden Steigerungen der Energieeffizienz. So konnten jährliche Steigerungsraten von 3,7 – 5,1 % erzielt werden (Saygin, Patel, Marscheider-Weidemann 2008, S. xi). Jedoch besteht noch immer Potenzial, den Energieverbrauch zu reduzieren.

Vorgehensweise

Repräsentativ für die chemische Industrie wurde in dieser Untersuchung die Grundstoffindustrie behandelt, die mehr als 85 % des Energieverbrauchs und 87 % der THG-Emissionen dieses Industriesektors für sich beansprucht. Wegen der großen Anzahl von Prozessen in der Grundstoffindustrie wurde eine Auswahl getroffen. Das Hauptkriterium dabei war der Gesamtenergieverbrauch für das Produkt. Außerdem wurden Prozesse mit bedeutenden Mengen an direkten CO_2-Emissionen (Prozess-CO_2) bzw. an anderen THG-Emissionen untersucht. Die ausgewählten Prozesse verbrauchen den größten Teil der Energie und können damit eine Aussage über den Energieverbrauch der Branche machen.

Zur Bestimmung des Energiebedarfs wurde eine Bottom-up-Analyse für das Jahr 2007 durchgeführt. Dabei wurde der eigentliche chemische Prozess (ISBL) als Black-Box betrachtet. Erfasst wurden die Input- und Outputströme für elektrischen Strom, Brennstoff und Dampf und damit die „Sekundärenergie“. Auf die Behandlung der Nebenanlagen (OSBL) wurde verzichtet. Für jeden Prozess wurden folgende Untersuchungsergebnisse zusammengestellt: Kurze Beschreibung der in Deutschland gebräuchlichen Prozessvarianten, Produktionszahlen für das Basisjahr 2007 sowie Energieverbrauch, Prozess-CO_2 und THG-Emissionen. Zur Kontrolle wurden die Ergebnisse mit Daten aus dem Top-down-Modell verglichen.

In einem weiteren Schritt wurden die technischen und wirtschaftlichen Energieeinsparpotenziale für die oben genannten Prozesse ermittelt. Ferner wurden prozessunabhängig chemierelevante Anlagenkomponenten, wie Reaktoren und Stofftrennapparate usw., und chemiespezifische Aspekte bei Querschnittstechnologien, wie die Prozessleittechnik, die Dämmstoffe usw., untersucht. Außerdem wurden Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs untersucht, wie z. B. die Wärmeintegration, energieeffiziente Prozesssynthese usw. Dann wurden chemiespezifische Szenarien zur Wirkung der Energieeinsparoptionen und -potenziale bis 2035 entwickelt.

Für jeden Prozess wurden dann folgende Untersuchungsergebnisse zusammengestellt: zukünftige Entwicklung der Produktion in Deutschland bis 2035, Beste Verfügbare Technik (BVT), Analyse der Energieeinsparoptionen und –potenziale und chemiespezifische Hemmnisse für die Steigerung der Energieeffizienz.

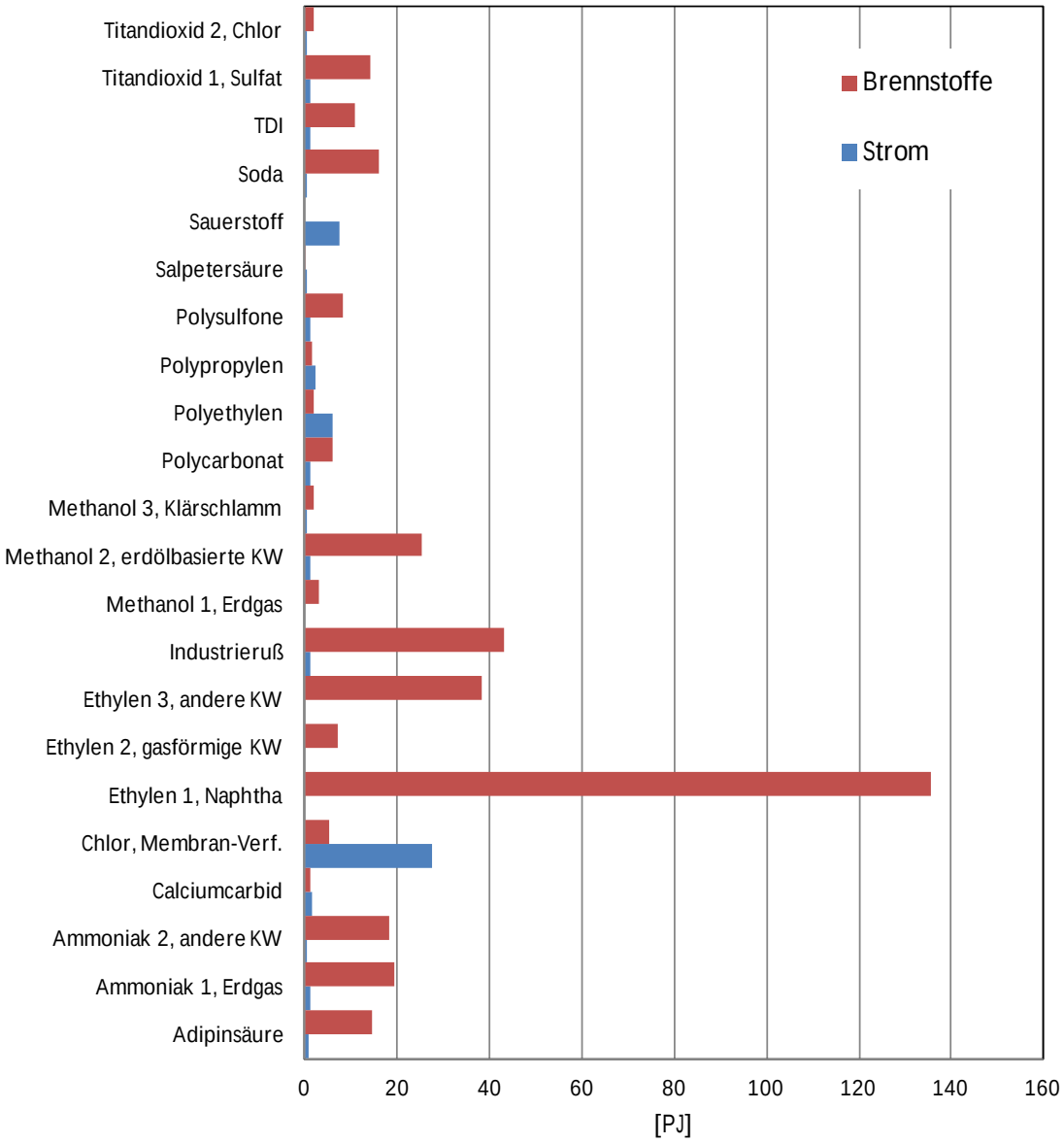
Anschließend wurden chemiespezifische Handlungsfelder sowie bestehende und geplante energiepolitische Instrumente identifiziert. Branchenspezifische energiepolitische Instrumente wurden dann vorgeschlagen.

Produktion und Energieverbrauch

Der Endenergieverbrauch der betrachteten Prozesse liegt bei 444,892 PJ/a. Zudem werden 2,0 Mt/a CO_2-Emissionen aus dem Prozess-CO_2 und 8,8 Mt/a CO_2-eq. aus N_2O-Emissionen emittiert. Die Summe aller CO_2-Äquivalente beträgt 46,68 Mt/a.

Der Energieverbrauch der Bottom-up-Analyse wird für alle Prozesse der Grundstoffchemie mit dem Gesamtenergieverbrauch aus der Top-down-Analyse verglichen. Der Stromverbrauch aller Prozesse nach der Bottom-up-Analyse liegt bei 58,16 % der Top-down-Analyse. Die Abweichung lässt sich auf den großen Verbrauch in den Nebenanlagen zurückführen. Der Verbrauch an Brennstoffen und Dampf aller Prozesse nach der Bottom-up-Analyse liegt bei 143,47 % der Top-down-Analyse. Der Grund dafür liegt hauptsächlich in der starken Standortintegration, dem unbekannten Stand der Modernisierung und der Zuordnung von einigen Produkten zu den Raffinerien. Weitere Gründe sind die unterschiedlichen Systemgrenzen für den energetischen und nichtenergetischen Verbrauch bei beiden Betrachtungsweisen. Zudem erfolgt die Erfassung des Sektorenenergieverbrauchs nach Wirtschaftzweigen. Der Strom- und Wärmeverbrauch der ausgewählten Prozesse wird für das Basisjahr 2007 in Abbildung 3-8 dargestellt.

Abbildung 3-8: Strom- und Wärmeverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007

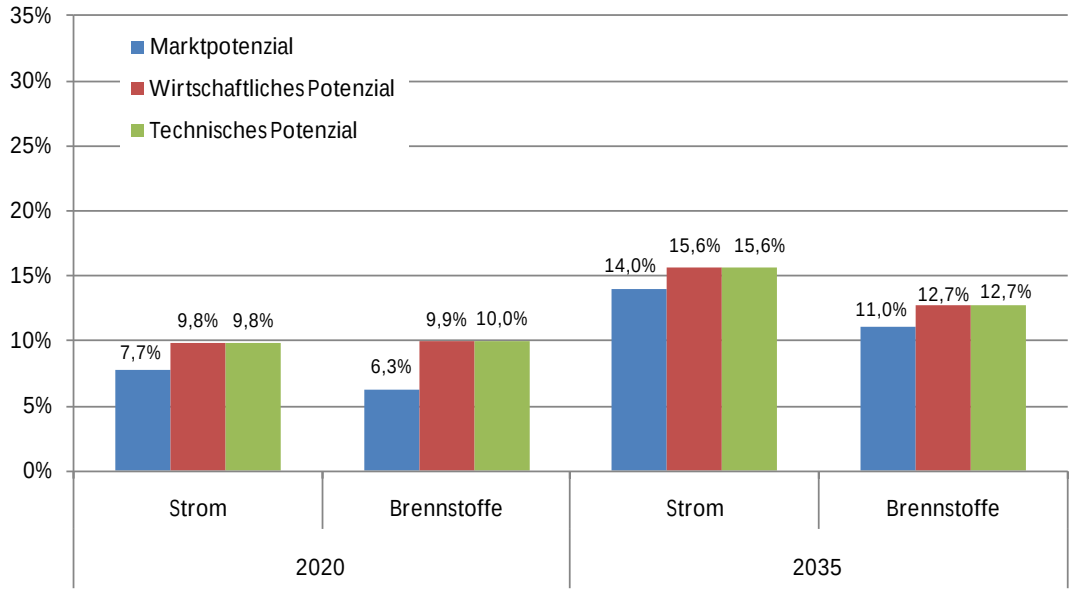


Energieeinsparpotenziale

Die Energieeinsparpotenziale in der Grundstoffchemie liegen für den Betrachtungszeitraum je nach Prozess zwischen 10 – 20 %, wenn Anlagen nicht im großen Stil ersetzt werden. Bei dieser Aussage werden mögliche Technologieschübe nicht berücksichtigt, die heute noch nicht bekannt oder wirtschaftlich sind. Da die Errichtung neuer Anlagen bzw. der Ersatz für bestehende Anlagen selten in Angriff genommen wird, ist die kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz das wahrscheinlichste Szenario für die Grundstoffchemie. Kapazitätsanpassungen erreicht man durch Kapazitätserweiterun-

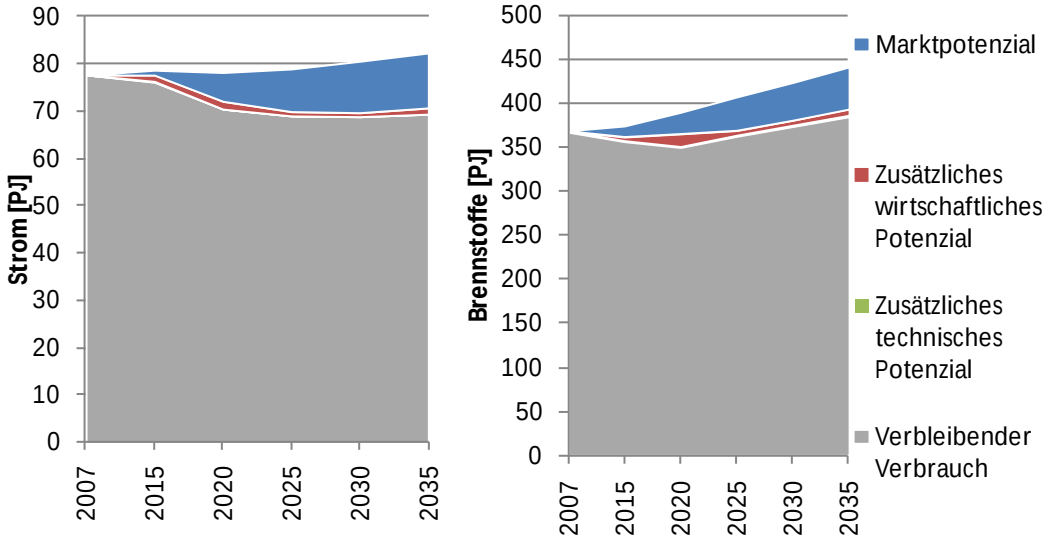
gen bei bestehenden Anlagen. Die Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe werden in Abbildung 3-10 für den Betrachtungszeitraum bis 2035 dargestellt.

Abbildung 3-9: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Grundstoffchemiesektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 2.1 bis 2.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Abbildung 3-10: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 2.1 bis 2.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Hemmnisse

Eine Anzahl von branchenspezifischen Hemmnissen steht der Diffusion von Energieeinsparmaßnahmen entgegen:

- Es herrscht eine große Unsicherheit über die Entwicklung der Grundstoffindustrie in Deutschland. Der erwartete moderate Anstieg der Nachfrage für Chemiegrundstoffe und die internationale Konkurrenz führen zu stagnierender Produktion und geringen Margen.
- Energieeinsparmaßnahmen müssen mit anderen Investitionsvorhaben konkurrieren. Es werden gleich hohe Renditeerwartungen angesetzt.
- Es besteht bei Chemieunternehmen eine Unsicherheit bezüglich des Emissionshandels. Dies führt dazu, dass Investitionsvorhaben zunächst zurückgestellt werden. (Anmerkung: Diese Ausage wurde zu eienr Zeit getroffen, als viele Elemente der dritten Periode des Emissionshandels (2013-2020) im Detail noch nicht festgelegt waren.
- Manche Produktionsanlagen sind auf ihre Folgeprodukte so abgestimmt, dass wenn sie durch energieeffizientere Prozesse ersetzt werden, die Folgeprodukte nicht mehr oder nur noch zu höheren Kosten hergestellt werden können.
- Manche Technologien passen nicht zu älteren Anlagen bzw. zu bestimmten Prozessvarianten.

Erfolgsfaktoren

Neben den oben genannten Hemmnissen sind einige Erfolgsfaktoren vorhanden, die die Diffusion von neueren Technologien fördern:

- Die Chemiegrundstoffe werden zum größten Teil durch große Unternehmen produziert. Diese verfügen über finanzielle Mittel und genügend Know-how und sind damit in der Lage, Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz durchzuführen
- Große, kontinuierliche Produktionsanlagen werden in der Grundstoffchemie verwendet. Diese sind eher für Energiesparmaßnahmen zugänglich.
- Die Anlagen zur Herstellung von Chemiegrundstoffen stehen in der Regel an großen Standorten, die eine Stoff- und Energieintegration ermöglichen.
- Energiesparmaßnahmen führen oft zu Ressourceneinsparungen und zu Qualitätsverbesserungen.
- Das Image als energieeffizientes Unternehmen ist von großer Bedeutung für viele Chemieunternehmen.

Instrumente

Einige energiespezifische Instrumente zur Steuerung der Energieeffizienz in der chemischen Industrie wurden bereits eingeführt. Dazu gehören hauptsächlich die IPPC-Richtlinie und der Emissionshandel. Die chemische Industrie wird außerdem durch das EU-Ziel zur Reduktion des Energieverbrauchs, das Erneuerbare-Energien-Gesetz und

die KWK-Förderung beeinflusst. Sie hat sich ferner freiwillig verpflichtet, die relevanten energiebedingten CO_2-Emissionen von 1990 bis zum Jahr 2012 um 45 – 50 % zu senken und bis 2020 alle Amalgam-Anlagen für die Chlor-Herstellung umzurüsten.

Weitere energiepolitische Instrumente sind aber denkbar: wie beispielsweise die Förderung von F&E für die Energieeinsparung, die Förderung des Einsatzes von Biomasse in der chemischen Industrie, die Förderung der Einführung von Energieeffizienzmanagementsystemen, der Abbau kontraproduktiver Subventionen, die Steueranreize und die Förderung des grünen Images.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Folgende Schlussfolgerungen können aus der Untersuchung der Grundstoffchemie gezogen werden:

- Eine relativ begrenzte Anzahl von Prozessen der Grundstoffchemie trägt zu mehr als 80 % des Energieverbrauchs bei.
- Die bestehenden Anlagen werden regelmäßig modernisiert und optimiert, um die Kapazität zu erweitern, die Ressourceneffizienz zu erhöhen und die Kosten zu reduzieren. Die Anlagen sind damit zum wesentlichen Teil in einem guten Zustand und können damit noch viele Jahre betrieben werden.
- Das ermittelte Energieeinsparpotenzial wurde seit den 70er Jahren fast zur Hälfte realisiert.
- Ein noch größeres Energieeinsparpotenzial kann man nur durch Ersatz bestehender Anlagen erreichen, da viele der bestehenden Anlagen nur begrenzte Modernisierungsmaßnahmen zulassen.
- Der Einsatz von alternativen Rohstoffen und Energieträgern könnte zur Reduktion der CO_2-Emissionen beitragen. Ein wirtschaftlicher Einsatz der Biomasse ist heute im großen Maßstab nicht möglich. Der Zeitpunkt eines Durchbruchs ist noch nicht absehbar.
- Die Studie untersucht zwar nur die Energieeffizienz, liefert aber in Wirklichkeit ein besseres Verständnis für die Ressourceneffizienz.
- Der Zustand der Anlagen und die letzten Modernisierungsmaßnahmen sind relativ wenig bekannt. Um zu genaueren Ergebnissen zu gelangen, benötigt man einen genaueren Einblick in den Zustand der Anlagen.
- Zum Vergleich von Prozessen oder Prozessvarianten empfiehlt es sich, den Primärenergieverbrauch einzusetzen.
- Die vorliegende Studie untersucht nur die eigentlichen Prozesse. In den Nebenanlagen stecken aber auch große Energieeinsparpotenziale. Eine weitere Standortintegration und die Abgabe von überschüssiger Energie in Form von Strom und Wärme könnten ebenfalls wesentlich zur Energieeinsparung beitragen.

3.8 Literatur

ACHEMA (2009): Energieeffizienz lohnt sich für Unternehmen. Energieeffiziente Antriebssysteme. Trendbericht Nr. 19, ACHEMA, Frankfurt/M.

AEA (2007): Analysis of the Simplification of the Titanium Dioxide Directives. Report to European Commission, AEA Energy & Environment, Didcot (UK)

AGE (2010): Arbeitsgruppe Emissionshandel zur Bekämpfung des Treibhauseffektes. Jahresbericht der Unterarbeitsgruppe 4 (UAG 4)

AGEB (2007): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 2007. Excel-Tabelle, AG Energiebilanzen e.V., 2007, www.ag-energiebilanzen.de

AGEB (2009a): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1990-2007 und Auswertungstabellen 1990-2008. Stand 28. Oktober 2009, AG Energiebilanzen, DIW Berlin, EEFA, Köln AG, Energiebilanzen e.V., www.ag-energiebilanzen.de

AGEB (2009b): Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2008, AG Energiebilanzen

Allplan (2005): Energieeffiziente Technologien und effizienzsteigernde Maßnahmen. Umweltbundesamt Österreich, Wien

Althaus, H.-J. et al. (2004): Life Cycle Inventories of Chemicals. EMPA, ETH, ESU, Chudacoff Ökoscience, Dübendorf

Appl, M. (1999): Ammonia. Wiley-VCH, Weinheim

Arpe, H.-J. (2006): Industrielle Organische Chemie. Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte. Verlag Chemie, Weinheim, New York

Arroyo Curras, T. (2010): To Investment in Energy Saving Technologies. Case Study for the Energy Intensive Chemical Industry in the Netherlands. MSc Thesis Report; University of Utrecht

Ausfelder, F.; Bazzanella, A. (2008): DECHEMA Diskussionspapier. Verwertung und Speicherung von CO_2. DECHEMA e.V., Frankfurt/M.

Bayer Climate Check (o.J.): Broschüre: Climate Footprint + Energieeffizienz Check.

Bowen, C. P. (2007): Development Trends for Ethylene Crackers: Existing Technologies and R&D. Workshop „Feedstock Substitutes, Energy Efficient Technology and CO_2 Reduction for Petrochemical Products", Paris, February 2007

Büchel, K. H.; Moretto, H.-H.; Wodisch, P. (1999): Industrielle anorganische Chemie. Wiley-VCH, Weinheim

Buttker, B.; Obermeier, Th. (o.J.): Methanol aus Klärschlamm in der SVZ Schwarze Pumpe GmbH.

Dittmeyer, R.; Keim, W.; Kreysa, G.; Oberholz, A. (Hrsg.) (2006): Winnacker·Küchler: Chemische Technik: Prozesse und Produkte. Band 6a Metalle, Willey-VCH Verlag Weinheim

Ecofys/Fraunhofer ISI/Öko-Institut (2009): Methodology of Free Allocation of Emission Allowances in the EU post 2012. Sector Report for the Chemical Industry. European Commission

Euro Chlor (2006): Chlorine Industry Review 2004-2005. Euro Chlor

EFMA (2000a): Production of Ammonia. Best Available Technique for Pollution Preventation and Control in the European Fertilizer Industry. EFMA, Brussels

EFMA (2000b): Production of Nitric Acid. Best Available Technique for Pollution Preventation and Control in the European Fertilizer Industry. EFMA, Brussels

ENTEC (2008): Support for the Development and Adoption of Monitoring Guidelines and Harmonised Benchmarks for N_2O Activities for Unilateral Inclusion in the EU ETS for 2008 - 12. European Commission

Enviros Consulting (2006): EU ETS Phase II. New Entrants Supporting Documentation: Petrochemicals. Enviros Consulting Limited, London

ESAPA (2004): Process BREF for Soda Ash. IPPC BAT Reference Document, European Soda Ash Producers Association, Brussels

Fraunhofer ISI, Enerdata, TU Vienna, Wuppertal Inst. (2009): Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries. for EC Directorate General Energy and Transport, Karlsruhe, Grenoble, Roma, Wien, Wuppertal, 15 March 2009

Forschungszentrum Jülich (2003): Methanol als Energieträger. Forschungszentrum Jülich

Geschäftsbericht Lanxess (2009), Leverkusen

Gielen, D.; Bennaceur, K.; Tam, C. (2006): IEA Petrochemical Scenarios for 2030 -2050. Energy Technology Perspectives, International Energy Agency, Paris

Gmehling, J.; Onken, U. (2005): Alcohols: Methanol. DECHEMA, Frankfurt/M.

Haberhauer, P. (2004): Polysulfone (PES/PSU). Kunststoffe, 10, 123 – 124

Häring, H.-W. (2008) (Hrsg.): Industrial Gases Processing. Wiley-VCH, Weinheim

Henig, M. (2009): Katalysatoren sollen Lachgas aus Adipinsäure-Anlage zersetzen. Process vom 15.4.2009, (www.process.vogel.de), abgelesen am 28.4.2010.

HLG (2008): High Level Working Group. Chemical Industry, Final Report, EU, Brussels

IEA (2007): Tracking Industrial Energy Efficiency and CO_2 Emissions. International Energy Agency Paris

IEA (2009): Energy Technology Transitions for Industry. International Energy Agency Paris

IVA (2009) (Hrsg.): Wichtige Zahlen: Düngemittel, Produktion, Markt, Landwirtschaft 2008 – 2009; Industrieverband Agrar e.V., Frankfurt/M.

IPTS (2001): Reference Document on Best Available Techniques in the Chlor-Alkali Manufacturing Industry. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla

IPTS (2003): Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemical Industry. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla

IPTS (2006): Reference Document on Economics and Cross – Media Effects. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla

IPTS (2007a): Reference Document on Best Available Techniques in Production of Polymers. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla

IPTS (2007b): Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Inorganic Chemical: Ammonia, Acids, Fertilizers. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla

IPTS (2007c), Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Inorganic Chemical: Solids and Other Industry. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla

IPTS (2008): Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. Institute for Prospective International Studies and Sustainability Unit, European IPPC Bureau, Sevilla

Jenssen, T. (2007): N_2O from the Production of Nitric Acid and Adipic Acid. 1st Meeting of the ECCP Working Group on the EU ETS Review, Brussels, 8-9 March 2007

JISC (2008a): Redundant Catalytic Decomposition of Residual Nitrous Oxide (N_2O) from the BASF Adipic Acid Plant in Ludwigshafen. Version 1, Joint Implementation Supervisory Committee, March 13th, 2008

JISC (2008b): Redundant Thermal Decomposition of Residual Nitrous Oxide (N_2O) from the LANXESS Adipic Acid Production in Krefeld-Uerdingen. Version 2, Joint Implementation Supervisory Committee, January 15th, 2008

Jones, M. (2009): Alternatives to Steam Cracking: Will the Steam Cracker Go the Way of the Dodo? 21. Ethylene Producers Conference, Tampa, Florida, April 26 – 30, 2009

Jopp, K. (2010): BASF gewinnt Cyclododekanon erstmals mithilfe von Lachgas als Rohstoff. Process vom 9.2.2010, (www.process.vogel.de), abgelesen am 28.4.2010

Karian, H. G. (2003): Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites. Marcel Dekker, New York

Keim, W. (2006): Kunststoffe. Wiley VCH, Weinheim

Kirk-Othmer (2004ff): Encyclopedia of Chemical Technology. Hrsg. Kroschwitz, J., 5. Auflage

Kreisel, E.; Jochem, E. (1996): Druckluft rationell erzeugen und nutzen. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart

Langner, M. (2009): Maßnahmen der chemischen Industrie zum Klimaschutz bei betriebstechnischen Anlagen. Eckdaten Dämmung der BASF SE Ludwighafen, FIW Wärmeschutztag

Lurgi (2006): Broschüre, Lurgi MegaMethanol, Frankfurt/M.

Maier, K.H.; Thomas, G. (2000): Energiekosten chemischer Basisprodukte. Internationaler Vergleich. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Band 50, Heft ½, 2000, Seite 42-46

Machhammer, O. (2006): Nutzung von Kohle in der chemischen Industrie: Kohle als Chemierohstoff. Foliensatz, BASF, Ludwigshafen

McKinsey (2006): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Sektorperspektive Industrie, Studie von McKinsey & Company Inc. im Auftrage des BDI

Moussallem, I.; Pinnow, S.; Turek, Th. (2009): Möglichkeiten zur Energierückgewinnung aus Wasserstoff bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse. Chem.-Ing.-Tech., 81, 4, 2009, 489-493

Nakamura, D. N. (2009): Global Ethylene Production Rises 7 Million tpy in 2008. Oil and Gas Journal, July 27, 2009

NEEAP (2007): Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan der Bundesrepublik Deutschland. Vorgelegt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, erstellt durch Prognos AG u. a.

Neelis, M. L.; Patel, M. K.; Bach, P. W.; Haije, W. G. (2005): Analysis of Energy Use and Carbon Losses in the Chemical and Refinery Industries – („PIE-Study"). Department of Science, Technology and Society/Copernicus Institute at Utrecht University, Utrecht and Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), Petten

Neelis, M; Worrell, E.; Masanet, E. (2008): Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Petrochemical Industry. Ernst Orlando Lawrence Berkley National Laboratory, Berkeley

Österreichische Energieagentur (2007a): Energieeffizienz in Antriebsystemen. Wien

Österreichische Energieagentur (2007b): Energieeffizienz in Kältesystemen. Wien

Österreichische Energieagentur (2007c): Energieeffizienz in Druckluftsystemen. Wien

Österreichische Energieagentur (o.J. a): Energieeffizienz in Pumpensystemen. Wien

Österreichische Energieagentur (o.J. b): Energieeffizienz in Ventilatorensysteme. Wien

Olah, G. A.; Geoppert, A.; Sura Prakash, G. K. (2006): Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy. Wiley-VCH, Weinheim

Pellervo Economic Research Institute (2008): The Effects of a Revision of the Emissions Trading Directive for the Period Starting 2013 on the European Nitrogen Fertilizer Industry. Helsinki

Ren, T.; Patel, M.; Blok, K. (2006): Olefins from Conventional and Heavy Feedstocks: Energy Use in Steam Cracking and Alternative Processes. Energy 31 (2006), 425–451

Rothert, A. (2005): Positionen zur Chemie mit Chlor, VCI, Frankfurt/M.

Saygın, D.; Patel, M. K.; Marscheider-Weidemann, F. (2008): Material and Energy Flows in the Chemical Sector by Processes and Subsectors. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

Sodawerk Staßfurt (2007): Sodawerk Staßfurt GmbH & Co. KG, Umwelterklärung

Statistisches Bundesamt (2008): Statistisches Bundesamt, Fachserie 4, Reihe 3.1, Produktion im Produzierenden Gewerbe 2007. Stand: 6.5.2008, Wiesbaden

Statistisches Bundesamt (2009a): Statistisches Bundesamt, Fachserie 4, Reihe 4.3, Kostenstrukturstatistik 2007. Stand: 18.5.2009, Wiesbaden

Statistisches Bundesamt (2009b): Statistisches Bundesamt, Erhebung über die Energieverwendung, Energieverbrauch nach Energieträgern, Berichtszeitraum 2007 sowie Stromerzeugungsanlagen 2007 der Betriebe im Bergbau und Verarbeitenden Bergbau, Brennstoffeinsatz für die Strom- und/oder Wärmeerzeugung nach Energieträgern. Wiesbaden

Stein, A. (2006): Ökonomische Überlegungen zur Bedeutung der Liberalisierung der Energiemärkte für die Perspektiven der chemischen Industrie am Standort Bundesrepublik, Dissertation, Universität Oldenburg

TA Luft (24. Juli 2002): 1. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft). 13. BimSchV – TA Luft

UBA (2001a): German Notes on the Production of Large Volume Gaseous and Liquid Inorganic Chemicals. Umweltbundesamt, Berlin

UBA (2001b): German Notes on the Production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals, Titandioxid. Umweltbundesamt, Berlin

UBA (2001c): German Notes on the Production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals, Soda. Umweltbundesamt, Berlin

UBA (2005): Emissionsfaktoren und Kohlenstoffgehalte. Umweltbundesamt, Dessau

UBA (2009): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009. Umweltbundesamt, Dessau

UBA (2010): National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2008. Dessau

UBA (2011): National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2009. Dessau

Uhde (2004): Broschüre „Nitric Acid". Dortmund

Uhde (2007): Broschüre „Urea". Dortmund

Uhde (2008a): Broschüre „Chloralkali Electrolysis Plants, Superior Membrane Process". Dortmund

Uhde (2008b): Electrolyser technology – Performance Improvements and Latest Developments. Dortmund

Uhde (2009a): Broschüre „Ammonia". Dortmund

Uhde (2009b): Broschüre „EnviNOx® – Setting Emission Standard for Nitric Acid Plants". Dortmund

Ullmann (2009): Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. Hrsg. Bailey, W., Verlag Chemie, Weinheim, 7. Aufl., Electronic Release

Valentino, B. (2009): Case Study of an EE Optimization Process being Implemented by a Foreign Company in China. Bayer China, Durban-China Energy Efficiency System Optimization Workshop, Durban Oct. 27, 2009

VCI (2008a): Chemiewirtschaft in Zahlen. Verband der Chemischen Industrie, Frankfurt/M.

VCI (2008b): Dokumentation energiesparender bzw. emissionssparender Maßnahmen der chemischen Industrie 2005 – 2007. Frankfurt/M.

VCI (2010): Dokumentation energiesparender bzw. emissionssparender Maßnahmen der chemischen Industrie 2009. Frankfurt/M.

VCI/DECHEMA (2009): Positionspapier Verwertung und Speicherung von CO_2. Frankfurt/M.

VDI 2055 (2008), Blatt 1, Wärme- und Kälteschutz für betriebs- und haustechnische Anlagen – Berechnungen. Stand September 2008

Weiss, M.; Neelis, M.; Patel, M. (2006): Estimating CO_2 Emissions from the Non-Energy Use of Fossil Fuels in Germany. Final Report, Umweltbundesamt, Berlin, Germany, Nov. 2006

Weiss, M. (2009): Learning in Carbon Accounting and Energy Efficiency. Dissertation, Universität von Utrecht

White, D. C. (2009): Olefin Plant Energy Saving through Enhanced Automation. AIChe Spring National Meeting, Tampa, Florida, April 26 – 30, 2009

Wiesenberger, H. (2001): State-of-the-Art for the Production of Nitric Acid with Regards to the IPPC Directive. Umweltbundesamt Österreich, Wien

Wiesmann, M. (2008): Lanxess setzt erstes industrielles Joint-Implementation-Projekt Deutschlands um. Process vom 21.5.2008, (www.process.vogel.de), abgelesen am 28.4.2010

Wittig, A. (2010): A New Technology Using BMS ODC on the Verge of Breakthrough for Industrial Production.

Worrell, E. et al. (2007): World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors.

Internetseiten:

www.ag-energiebilanzen.de

www.druckluft-energieeffizienz.de

www.finanzen.net

www.iva.de

www.process.vogel.de

www.unfccc.int/di/FlexibleQueries/Event.do?event=go

www.VCI.de

3.9 Anhang

Anhang 3.9.A

Tabelle 3-59: Standorte und Kapazitäten der Adipinsäure-Anlagen in Deutschland

Standort	**Errichtungsjahr**	**Kapazität (kt/a)**
Ludwigshafen	1956/Erweiterung 2002	330
Krefeld-Uerdingen Leverkusen	1987	68
Zeitz/ Tröglitz (Sachsen-Anhalt)	2001	80
Summe		478

Quelle: Ecofys/ISI/Öko-Institut 2009, S. 42, eigene Recherchen

Tabelle 3-60: Standorte und Kapazitäten der Ammoniak-Anlagen in Deutschland

Standort	**Kapazität**	**Jahr der Inbetrieb-nahme**	**Rohstoff/Prozess**
Brunsbüttel	2.000 t/d = 660 kt/a	1978	Destilationsrückstand/ partielle Oxidation Folgeprodukt: Harnstoff
Dormagen	900 t/d = 300 kt/a	1969/70	Erdgas/ Steam-Reforming
Gelsenkirchen	1.250 t/d = 400 kt/a	1973	Gasöl/partielle Oxidation
Ludwigshafen	2.400 t/d = 800 kt/a	1971/82	Erdgas/ Steam-Reforming, Folgeprodukt: Harnstoff (Lösungs-Kreislauf-Verfahren)
Piesteritz	3.300 t/d d = 1.100 kt/a	1974/75	Erdgas/ Steam-Reforming Folgeprodukt: zum Teil Harnstoff (Stamicarbon)
Summe/ Alter der Anlagen	9.850 t/d = 3.260 kt/a	Steam-Reforming: 36 a Partielle Oxidation: 34 a	

Quelle: Ecofys/ISI/Öko-Institut 2009/IPTS 2007b, S. 36 und eigene Recherchen

Tabelle 3-61: Standorte und Kapazitäten der Steam-Cracker in Deutschland

Standort	**Kapazität bezogen auf das Ethylen (kt/a)**	**Einsatzstoff**
Böhlen	565	Naphtha
Burghausen	450	Naphtha (84 %), gasförmige KW (16 %)
Gelsenkirchen – Scholven	580	Naphtha (78 %), Gasöl (12 %), gasförmige KW (10 %)
Gelsenkirchen – Scholven	480	Naphtha (65 %), Gasöl (26 %), gasförmige KW (9 %)
Heide	100	Gasöl
Köln-Worringen	550	Naphtha
Köln-Worringen	544	Naphtha
Ludwigshafen	220 (700 kt/a Naphtha)	Naphtha (90 %), gasförmige KW (10 %)(errichtet 1965)
Ludwigshafen	400 (1300 kt/a Naphtha)	Naphtha (errichtet 1980)
Münchmünster	320	Naphtha (53 %), gasförmige KW (47 %)
Wesseling	305	Hydrowax
Wesseling	738	Naphtha (90 %), Gasöl (10 %)
Wesseling	520	Naphtha
Summe	5.772	

Quelle: Nakamura 2009

Tabelle 3-62: Standorte und Kapazitäten der Methanol-Anlagen in Deutschland

Standort	**Kapazität (kt/a)**	**Errichtungsjahr/ Alter 2010**	**Prozess Synthesegas/ Einsatzstoff**
Gelsenkirchen	300	1973	Partielle Oxidation/ Destillationsrückstand
Leuna	660	1985	Partielle Oxidation/ Destillationsrückstand
Ludwigshafen	450	1978	Steam-Reforming/ kohlenwasserstoffhaltige Abgase
Schwarze Pumpe[46]	80	1995/96	Vergasung/ Klärschlamm
Wesseling	435	1969/2000	Partielle Oxidation/ Destillationsrückstand
Summe/ Durchschnittsalter	1.925	Steam-Reforming: 36 Jahre Partielle Oxidation: 33 Jahre Vergasung = 15 Jahre	

46 Buttker, Obermeier o.J.

Tabelle 3-63: Standorte und Kapazitäten der TDI-Anlagen in Deutschland

Standort	**Kapazität (kt/a)**
Brunsbüttel	80
Dormagen	80
Leverkusen	50
Schwarzheide	70
Summe	280

Quelle: IPTS 2003, S. 325

Tabelle 3-64: Standorte und Kapazitäten der Chloralkalielektrolyse-Anlagen in Deutschland [47]

Standort	**Verfahren**	**Kapazität (kt/a)**
Rheinberg	D	100
Stade	D	1.062
Summe Diaphragma-Verfahren		**1.162**
Brunsbüttel	HCl	210
Dormagen	HCl	80
Leverkusen	HCl	60
Summe HCl-Elektrolyse		**350**
Höchst/Frankfurt	Hg	167
Ibbenbüren	Hg	125
Ludwigshafen	Hg	160
Lülsdorf	Hg	136
Uerdingen	Hg	130
Wilhelmshaven	Hg	149
Summe Amalgam-Verfahren		**867**
Bitterfeld	M	88
Burghausen	M	50
Dormagen	M	400
Gendorf	M	172
Gersthofen	M	40
Knapsack	M	160
Knapsack	M	90
Leverkusen	M	300
Ludwigshafen	M	225

47 D = Diaphragma-Verfahren, Hg = Amalgam-Verfahren, M = Membran-Verfahren, HCl = HCl-Elektrolyse.

Standort	Verfahren	Kapazität (kt/a)
Marl	M	260
Rheinberg	M	100
Schkopau	M	250
Stade	M	523
Uerdingen	M	90
Summe Membran-Verfahren		**2.748**
Gesamtsumme ohne HCl-Elektrolyse mit HCl-Elektrolyse		 4.777 5.012

Quelle: Euro Chlor 2006, IPTS 2001, S. 122, und eigene Recherchen

Tabelle 3-65: Standorte und Kapazitäten der Soda-Anlagen in Deutschland

Produktionsstandort	Beginn der Produktion[48]	Anlagenkapazität (kt/a)	Bemerkungen
Rheinberg	1903	645	-
Bernburg	1883/1991	600	KWK, Wärme für die Stadt
Staßfurt	1886	450 (2008 auf 600 erweitert)	Strom und Dampf von einem benachbarten erdgasbasierten GuD-Kraftwerk, Wärme aus einer benachbarten Müllverbrennungsanlage
Ludwigshafen	-	65	aus der Caprolactam-Herstellung
Summe	-	1.760	-

Quelle: UBA 2001c, S. 2; ESAPA 2004, S. 17; Sodawerk Staßfurt 2007; IPTS 2007c, S. 35

48 Der Beginn der Produktion macht keine Aussage über das Alter der Anlagen, da sie regelmäßig modernisiert wurden.

Tabelle 3-66: Standorte und Kapazitäten der Titandioxid-Anlagen in Deutschland

Standort	**Produktionskapazität (kt/a)**	**Errichtungsjahr/ Alter (a)**	**Verfahren**
Leverkusen	30 100	1927 1972	Sulfat-Verfahren Chlorid-Verfahren
Nordenham	62	1969	Sulfat-Verfahren
Krefeld-Uerdingen	130	1957	Sulfat-Verfahren
Duisburg	100	1962	Sulfat-Verfahren
Summe: Chlorid-Verfahren Summe: Sulfat-Verfahren Gesamtsumme	100 322 422	Durchschnitt:38 Durchschnitt: 52	

Quelle: AEA 2007, S. 6; IPTS 2007c, S. 107; UBA 2001b, S. 1; eigene Recherchen

Anhang 3.9.B

Betriebliche Instrumente für die Steigerung der Energieeffizienz:

- Analyse der Energiedaten,
- Anwendung von Contracting-Modelle für bestimmte Energieträger, wie Druckluft, Heizung von Räumen, Beleuchtung usw.,
- Anwendung von modernen Optimierungsmethoden bei der Planung von Chemieanlagen,
- Ausbildung der Mitarbeiter,
- Auswahl von Apparaten nach energetischen Gesichtspunkten,
- betriebliches Energiemanagement: bessere Ausnutzung der Energie für ein Werk oder einen Standort, energetische Abstimmung der Energieverbraucher, Verwertung von Reststoffen mit niedrigem Heizwert, energetische Verwertung von Produktionsrückständen, Nutzung von Abwärmequellen, Pinch-Technologie,
- detaillierte Simulation in der Phase der Planung von Chemieanlagen: Ermittlung des Energieverbrauchs über den Lebenszyklus von Gesamtanlagen hinweg (Verringerung des Energieverbrauchs, z. B. durch Reduktion der Anzahl der Prozessschritte, Mikroverfahrenstechnik, Intensivierung des Wärme- und Stoffaustausches usw.), exergetische Betrachtungen,
- energetische Optimierung von einzelnen Apparaten und Maschinen,

- energetische Schwachstellenanalyse für bestehende Anlagen (Energiediagnose, Zustandsanalyse): Energiebilanzierung, Energieverbrauchsverhalten und Bestimmung der Energiekosten, Einführung von neuen Messstellen und ergänzende Simulation, Überprüfung wärmegedämmter Objekte,
- energetisches Benchmarking: Vergleich des Energieverbrauchs von Apparaten, Maschinen, Verfahrensstufen und Gesamtanlagen, internes und externes Benchmarking,
- energieeffiziente Automatisierung, Optimierung des Automatisierungsgrades im energetischen Sinne,
- Energieeffizienz-Controlling: Einführung von geeigneten Kennzahlen,
- Verwendung von Energiekostenrechnung: Zuordnung der Energiekosten zu den Energieverbrauchern,
- Einführung von Energieverbrauchsmonitoring sowie Inline-Messungen des Energieverbrauchs,
- Einführung von Energieeffizienzmanagementsystemen,
- Erstellung von CO_2-Bilanzen für Chemieanlagen
- Festlegung von Wartungszyklen unter energetischen Gesichtspunkten, z. B. Reinigung von Wärmetauschern, Gasfiltern, Austausch von Katalysatoren usw.,
- Intensivierung der Forschung und Entwicklung zu energieeffizienten Apparaten und Maschinen, Gesamtanlagen, Wärmedämmstoffen usw.,
- innerbetriebliche Aufklärung,
- Lebenszyklus-Betrachtungen: Genauere Kostenberechnungen über den gesamten Lebenszyklus von Apparaten, Maschinen, Verfahrensstufen sowie Gesamtanlagen unter Zugrundelegung von zukünftigen Preiserhöhungen für die Energie,
- Optimierung der Instandhaltung im energetischen Sinne,
- Prozessintensivierung.

4 Eisen- und Stahlindustrie

M. Arens, W. Eichhammer (Fraunhofer ISI)

4.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse

4.1.1 Hintergrund

Die Eisen- und Stahlindustrie zählt weltweit zu den größten industriellen Energieverbrauchern und CO_2-Emittenten.

Durch die Wirtschaftskrise in 2008/2009 ist die Produktion weltweit stark zurückgegangen. Konnte sich China relativ schnell erholen und die Produktion bereits im Mai 2009 wieder das Produktionsniveau von Juni 2008 erreichen, so belief sich die Stahlproduktion in der EU auch in 2009 nur auf 72 % der Jahresproduktion von 2008. Vorläufige Zahlen von 2010 berichten von einer Stahlproduktion in Deutschland auf einem Niveau von 90 % der Jahresproduktion von 2008; für China liegt dieser Wert bei 120 % (Stahl-online 2010). Die CO_2-Emissionen der Industrie in der EU sanken in 2009 um 11 % gegenüber 2008. Damit liegen die im Rahmen des europäischen EU-Emissionshandels zugeteilten Zertifikate aktuell über den tatsächlichen Emissionen. Durch den wirtschaftlichen Einbruch sind in 2009 bereits die Hälfte der Ziele für 2020 erreicht worden (EurActiv 2010).

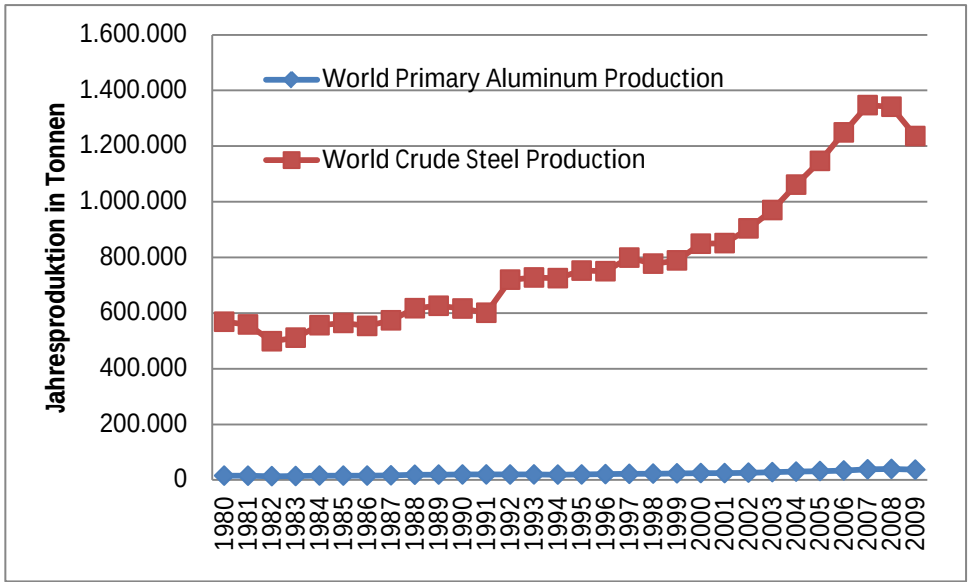
Langfristig wird eine steigende Stahlnachfrage und damit einhergehende steigende Stahlproduktion erwartet, die vor allem durch die Schwellenländer China, Indien und Brasilien gespeist wird. Für die Industrieländer wird mittelfristig eine stagnierende Stahlproduktion prognostiziert. Erneuerungen im Stahlsektor werden in den USA und in Europa erwartet.

Stahl ist der dominierende Werkstoff im Brückenbau, bei Hochhäusern, im Automobil- und Schiffbau, sowie im Schienenbau. Prognosen aus den 1990er Jahren, dass Stahl durch andere Werkstoffe wie zum Beispiel Aluminium ersetzt werde, haben sich nicht in dem Maße erfüllt. Abbildung 4-1 zeigt die Produktion in Tonnen von Aluminium und Stahl von 1980 bis 2009.

Das Recycling von Stahl mit dem Elektrischen Lichtbogenofen ist ein Verfahren, energieeffizienter Stahl zu produzieren. Weltweit liegt der derzeitige Anteil der Elektrostahlproduktion an der Rohstahlproduktion bei 31 %. Die Grenzen dieses Verfahrens liegen zum einen in der Verfügbarkeit von Schrott, da Stahl zumeist über Jahre hinweg in den Anwendungen gebunden ist. Zum anderen lässt sich aufgrund der im Schrott enthaltenen Legierungselemente nicht alle nachgefragten Stahlsorten herstellen. Die Begren-

zung der Qualität ist dabei durch den Ausgangsstoff Schrott gegeben. Wird in den Elektrischen Lichtbogenofen sauberer Schrott, Direct Reduced Iron (DRI) oder Hot Briquetted Iron (HBI) eingesetzt, können gleiche Stahlqualitäten wie über die Primärroute hergestellt werden. Dennoch wird die Erzeugung von Stahl über die Primärroute auf Basis des Rohstoffes Eisenerz voraussichtlich auch in Zukunft das dominierende Verfahren bleiben.

Abbildung 4-1: Produktion (weltweit) von Rohstahl und Aluminium



Quelle: World Steel Association 2012, International Aluminum Institute 2012

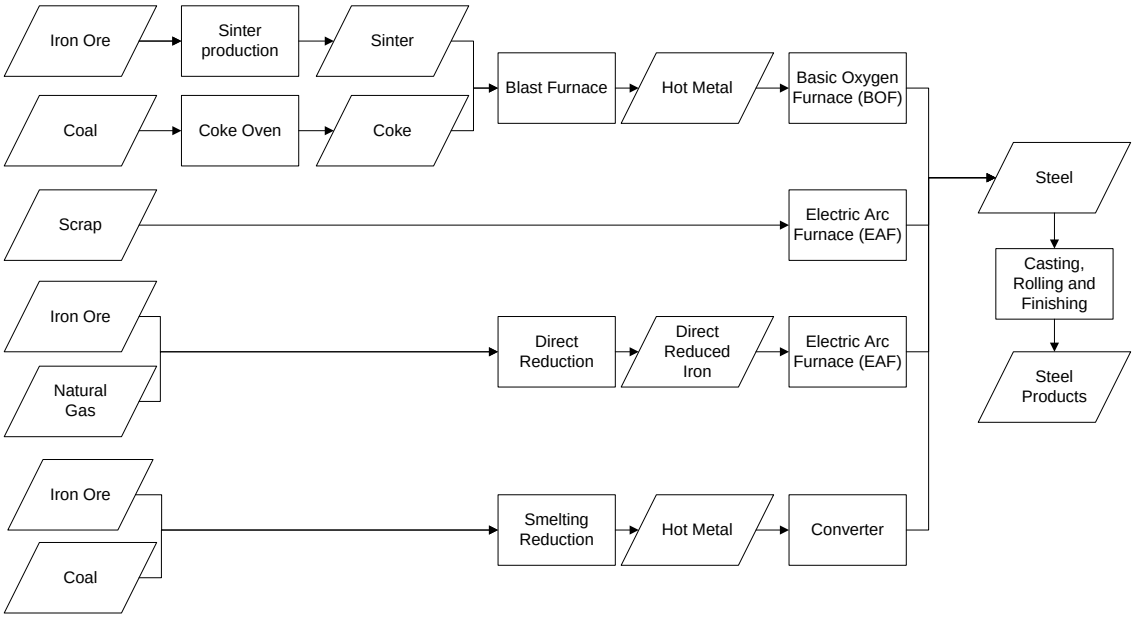
4.1.2 Beschreibung

In der Eisen- und Stahlindustrie ***dominieren*** aktuell ***zwei Herstellungsverfahren***. Zum einen ist das die Primärroute, bestehend aus Hochofen und dem Stahlwerk und zum anderen die Sekundärroute, in der Stahlschrott in einem Elektrischen Lichtbogenofen recycelt wird. Einen Überblick über die verschiedenen Stahlherstellungsprozesse gibt Abbildung 4-2.

Mit der ***Hochofenroute*** wird etwa zwei Drittel des weltweiten Rohstahls erzeugt. Koks, Eisenerz und Zuschlagstoffe werden von oben in den Hochofen geschichtet und in der Schmelzzone im unteren Bereich des Hochofens zu Roheisen umgewandelt. In einem zweiten Schritt wird dem Roheisen im Konverter durch das Zublasen von Sauerstoff Kohlenstoff entzogen, in dem er zu CO oxidiert. Durch diesen Schritt wird aus Roheisen Rohstahl. Roheisen enthält etwa 5 % Kohlenstoff und Stahl hingegen nur weniger als 2 %. Der energieintensivste Schritt in diesem Verfahren ist die Reduktion von Eisenerz (Fe_2O_3) zu Eisen im Hochofen. Der im Koks enthaltene Kohlenstoff verbindet

sich im Hochofen mit dem Sauerstoff des Eisenerzes zu Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO_2).

Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Stahlherstellungsprozesse für die Modellierung



Quelle: eigene Darstellung

Das andere dominierende Verfahren ist der ***Elektolichtbogenofen*** (EAF-Verfahren). In ihm wird zumeist Schrott unter dem Einsatz von Elektrizität zu Stahl verarbeitet. Dadurch, dass in diesem Verfahren das Eisenerz nicht zu Eisen reduziert werden muss, benötigt dieses Verfahren deutlich weniger Energie und verursacht daher geringere CO_2-Emissionen je Tonne Rohstahl als nach der Hochofenroute. Der energieintensivste Schritt in diesem Verfahren bildet das Aufschmelzen des Schrotts. Da in den meisten öffentlichen Statistiken die CO_2-Emissionen der Stahlindustrie nicht in diese beiden Verfahren unterschieden werden, kommt eine Erhöhung des Anteils von Elektrostahl einer Minderung der spezifischen CO_2-Emissionen je Tonne Rohstahl gleich. Derzeit liegen die spezifischen CO_2-Emissionen in Deutschland bei 1,3 t CO_2 pro Tonne Rohstahl (Stahlinstitut VDEh 2008/2009).

Eine bislang eher nachgeordnete Rolle spielt die ***Direktreduktion***. Sie stellt derzeit weltweit 4 % der Rohstahlerzeugung (Midrex 2008). Bei der Direktreduktion wird Eisenerz im festen Zustand zusammen mit Kohle oder Erdgas direkt zu Eisen reduziert. Im Gegensatz zu der Hochofenroute erfolgt die Reduktion des Eisenerzes ohne seine Aufschmelzung. Durch die Direktreduktion entsteht Eisenschwamm, der einen hohen Sauerstoffanteil hat. Er enthält Verunreinigungen, da diese durch das Fehlen einer

Schmelzphase nicht über die Schlacke abgebunden werden können. Aus dem erzeugten Eisenschwamm kann Stahl hergestellt werden. Meistens wird er jedoch als Grundstoff für das EAF-Verfahren verwendet, wo er bis zu 100 % des Schrottanteils ersetzen kann. In Deutschland gibt es nur eine Anlage zur Direktreduktion, die nach dem Midrex-Verfahren arbeitet und Erdgas benötigt. Stückiges Eisenerz wird mit einem wasserstoffreichen Reduktionsgasgemisch zu festem Eisenschwamm (Direct Reduced Iron, DRI) reduziert. Das wasserstoffhaltige Reduktionsgas wird durch die Spaltung von Erdgas erzeugt. Auch wenn in Deutschland der Anteil der Direktreduktion an der Eisen- und Stahlherstellung gering ist, so kann man international jedoch die Direktreduktion als etabliertes Verfahren betrachten.

Die ***Schmelzreduktion*** ist das einzige derzeit in der Entwicklung befindliche Verfahren, das den konventionellen Hochofen ablösen könnte, weil es wie der Hochofen flüssiges Roheisen erzeugt (Luiten 2001). Ausgangstoffe sind zum einen Kohle und zum anderen stückige oder mitunter gesinterte Eisenerze und Eisenerzpellts. Falls Feinerz in einer Wirbelschicht reduziert werden kann, kann auch auf das Pelletieren und Sintern verzichtet werden. Insgesamt würden die energieintensive Verkokung der Kohle sowie ggf. auch das Sintern und Pelletieren des Eisenerzes entfallen. Das erste kommerzielle Verfahren dieser Art ist der Corex-Prozess, welches Eisenerzpellets benötigt. Ein weiteres Verfahren ist der Finex-Prozess, der mit Feinerzen und nichtverkokbarer Kohle arbeitet. Beide Verfahren wurden bisher im Wesentlichen in Asien errichtet (Innovationsreport 2011).

Nach den beiden Schritten der Roheisenerzeugung im Hochofen und der Stahlerzeugung im Konverter folgen Sekundärmetallurgie, Urformen, Umformen und Oberflächenveredlung. Unabhängig von den ersten Erzeugungsschritten (Hochofen und Konverter, Elektrolichtbogenofen, Direktreduktion und Elektrolichtbogenofen, Schmelzreduktion) ist diese Abfolge an Prozessen gleich.

Neben den Prozessen, die in den Produktionslinien liegen, gibt es im integrierten Hüttenwerk (Hochofenroute) und im Stahlwerk (Elektrolichtbogenofen) Anlagen, die übergreifend zur Verfügung stehen. Darunter fällt zum einen – sofern vorhanden – das hütteneigene Kraftwerk und zum anderen Dampferzeugungsanlagen. Weitere Technologien, die in verschiedenen Prozessen eingesetzt werden, sind elektrische Antriebe.

Ein Indiz für die Energieeffizienz des Hochofens ist der Reduktionsmitteleinsatz (z. B. Koks, Kohle, Öl) je Tonne Roheisen. Seit den 1950er Jahren hat sich der Reduktionsmitteleinsatz der deutschen Eisen- und Stahlindustrie durch verschiedene technologische Neuerungen spezifisch mehr als halbiert. Dazu gehören unter anderem der Sauerstoffeinsatz und die Erhöhung der Heißwindtemperatur auf über 1.200 °C. Neben

technologischen Verbesserungen hat die Rohstoffqualität einen Einfluss auf die benötigte Menge von Reduktionsmitteln. So führte der Einsatz überseeischer Reicherze seit den 1960er Jahren zu einer weiteren Verringerung des Reduktionsmitteleinsatzes und somit zu einer Verringerung der CO_2-Emissionen. Die Frage nach dem theoretischen Minimaleinsatz von Reduktionsmitteln zur Stahlherstellung wurde in einem Gutachten der TU Clausthal untersucht (Scholz 2004, unveröffentlicht). Es wurde berechnet, dass aufgrund der chemischen Reaktion von Eisenerz zu Eisen pro Tonne Roheisen 333 kg Kohlenstoff notwendig sind. Im Roheisen selbst bleiben 47 kg Kohlenstoff pro Tonne gelöst. Weiterhin werden 34 kg Kohlenstoff für die Reaktionswärme benötigt oder gehen als thermische Verluste verloren. Pro Tonne Roheisen werden also 414 kg Kohlenstoff benötigt; dies entspricht einer Masse von 465 kg Koks. Der derzeitige Reduktionsmitteleinsatz liegt bei 486 kg pro Tonne Roheisen (Ameling 2007).

Im Rahmen des Klimaschutzes wird die CO_2-Abscheidung und unterirdische Speicherung auch für die Stahlindustrie thematisiert. Das europäische Konsortium ***ULCOS*** (Ultra Low CO_2 Steelmaking) hat sich zum Ziel gesetzt, Stahlherstellungsverfahren weiterzuentwickeln, bei denen mindestens 50 % weniger Kohlendioxid gegenüber den gegenwärtig effektivsten Technologien ausgestoßen wird (Ulcos 2009). Dazu haben sich 48 europäische Unternehmen zusammengeschlossen, die derzeit die Entwicklung von vier neueren Eisen- und Stahlherstellungsverfahren unterstützen. Das ULCOS-Projekt hat aktuell ein Finanzierungsvolumen von 70 Mio. €. Die Verfahren beruhen bis auf eines auf der Abscheidung und anschließenden geologischen Speicherung von CO_2 (CCS). Bei diesen neuen Verfahren werden die Prozesse so umgestaltet, dass aus den Kuppelgasen CO_2 ausgewaschen werden kann. Aufgrund der hohen Entwicklungskosten, des u. U. höheren Energieaufwandes und der Speicherung von CO_2 im Untergrund werden diese Technologien sich nur durch globale Abkommen im Klimaschutz durchsetzen können. Ferner sind sie an die Entwicklung der CCS-Technologie gekoppelt. Die Elektrolyse von Eisenerz zu Eisen kann bei CO_2-arm erzeugtem Strom auch ohne die Abscheidung und Speicherung von CO_2 ein klimafreundliches Eisenherstellungsverfahren sein. Dieses Verfahren befindet sich allerdings noch am Anfang der Entwicklung.

4.1.3 Auswahl der Prozesse

Der Energieverbrauch zur Herstellung von Oxygenstahl liegt etwa dreimal höher als von Elektrostahl. Aktuell wird in Deutschland etwa 80 % der Energie in der Hochofenroute und 20 % in der Sekundärroute verbraucht. In der Hochofenroute wird etwa 80 % der Energie im Hochofen verbraucht.

Für die gesamte Stahlindustrie wird das Energieeinsparpotenzial auf 5 bis 15 % geschätzt.

In der Literatur finden sich weitere Effizienzmaßnahmen für die Eisen- und Stahlherstellung. Deren Einsparpotenzial wird in manchen Fällen nicht beziffert und manchmal liegen die Potenziale unter 1 % des Energiebedarfs pro Tonne Stahl. Ein Beispiel sind veränderte Abstichsysteme für Konverter und Elektrolichtbogenöfen (Kirschen 2009).

Im Rahmen dieses Vorhabens werden folgende Prozesse betrachtet: Kokerei, Sinteranlage, Hochofen und Stahlwerk; Elektrolichtbogenofen; Umformen; Übergreifende Maßnahmen; Direktreduktion; Schmelzreduktion.

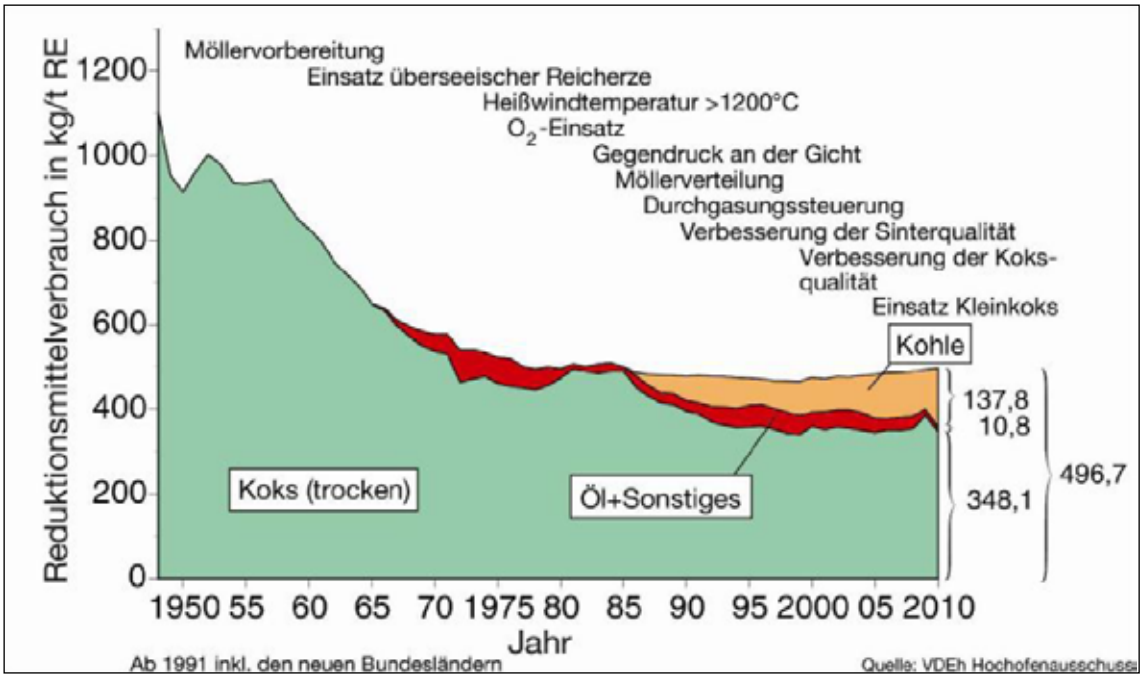
4.2 Analyse der Prozesse

4.2.1 Kokerei

Koks ist ein für den Hochofen nur begrenzt ersetzbarer Stoff, da er durch seine Porosität die Permeabilität im Hochofen ermöglicht. Er wird in den Kokereien aus Kokskohle unter Temperaturen von ca. 1.300 bis 1.350 °C 17 bis 25 Stunden lang gebacken (Brauer 1996). 50 % der eingesetzten Energie in einer Kokerei bleibt als fühlbare Wärme im Koks enthalten. Im Anschluss an den Wärmebehandlungsprozess wird der Koks abgekühlt. Dies geschieht konventionell mit Wasser, wobei die im Koks gespeicherte Energie ungenutzt verloren geht. Je Tonne Oxygenstahl wird etwa 1 GJ für die Kokserzeugung aufgewendet, was etwa 5 % des Energiebedarfs für die Herstellung einer Tonne Stahl entspricht. Aufgrund des hohen Energieaufwands für die Koksherstellung wird der Kokseinsatz im Hochofen seit Jahrzehnten reduziert. So konnte der Kokseinsatz je Tonne Roheisen von ca. 1.000 kg in den 1950er Jahren auf aktuell ca. 350 kg reduziert werden (Abbildung 4-3).

Insbesondere durch den Einsatz von Kohle im Hochofen seit den 1980er Jahren konnte der Koksbedarf weiter gesenkt werden. Im Integrierten Hüttenwerk ist die Kokerei in den Energieverbund eingebunden, in dem das wasserstoffreiche Koksofengas zur Unterfeuerung der Kokerei, für die Zündöfen der Sinteranlagen, zur Stromerzeugung im Kraftwerk und zur Beheiung Walzwerköfens eingesetzt wird. Umgekehrt wird Hochofengas zur Unterfeuerung der Kokerei, zur Behzeiung der Winderhitzer und zur Stromerzeugng genutzt.

Abbildung 4-3: Entwicklung des Reduktionsmitteleinsatzes bei der Roheisenerzeugung im Hochofen



Quelle: VDEh Hochofenausschuss

4.2.2 Sinteranlage

Neben Koks benötigt der Hochofen Eisenerz, welches mit möglichst ähnlichen physikalischen Eigenschaften, d. h. in ähnlichen Größenmaßen vorliegen muss. Feinerze mit Korngrößen von 0,1 bis 6,3 mm werden in Sinteranlagen stückig gemacht (agglomeriert). Sinteranlagen stehen im Allgemeinen direkt im Integrierten Hüttenwerk. Dahingegen befinden sich Pelletieranlagen, die Feinsterze (Korngrößen < 0,2 mm) zu Pellets agglomerieren, bei den Eisenerzproduzenten. In Deutschland liegt der Anteil agglomerierter Erze bei rund 80 %. Je Tonne Oxygenstahl werden etwa 1,3 bis 1,4 GJ an festen Brennstoffen und Gasen für die Sintererzeugung aufgewendet, was etwa 11 % des Energiebedarfs je Tonne Stahl entspricht (VDEh 2008).

Die Feinerze werden mit Koksgrus und weiteren Zuschlägen auf Bandsinteranlagen geführt. Von der Oberfläche aus werden die Brennstoffe gezündet. Aufgrund eines Unterdrucks an der Unterseite des Bandes wandert der Backprozess von oben nach unten durch die Feinerzschicht. Anschließend wird der Sinter schonend gekühlt.

Abwärmequellen bei Sinteranlagen sind zum einen das Abgas des Backprozesses und zum anderen die Abwärme des Sinterkühlers. Die Abgastemperatur liegt nach Brauer (1996) bei Temperaturen von 200 und 300 °C, wobei eine Abwärmenutzung zusätzlich

zu den relativ geringen Temperaturen durch die abrasiven und korrosiven Elemente erschwert wird. Etwa 45 % des Energieeinsatzes ist in den Abgasen enthalten, weitere 40 bis 45 % verbleiben in der Sinterkühlerabluft (Brauer 1996).

Der spezifische Einsatz von festen Brennstoffen (Kohle, Anthrazit, Koksgrus) lag in 2007 bei 48,5 kg/t Sinter (VDEh 2008)

4.2.3 Hochofen und Stahlwerk

Der Hochofen und das Stahlwerk verbrauchen zusammen etwa 12 GJ/ t Rohstahl. Zuzüglich des Energieverbrauchs für die notwendigen Ausgangsstoffe Koks und Sinter werden je Tonne Oxygenstahl etwa 15 GJ/t Stahl aufgewendet (IISI 1998). Etwa 80 % des Energieverbrauchs findet bis zum Stahlwerk statt. Die verbleibenden 20 % der Energie werden in den nachfolgenden Schritten des Gießens und Umformens statt. Der Reduktionsmittelbedarf wurde seit den 1950er Jahren kontinuierlich verringert. So konnte in Deutschland der Reduktionsmittelbedarf seit 1950 um 46 % von etwa 900 auf 486 kg/Tonne Roheisen gesenkt werden. Nach einem Gutachten der TU Clausthal, welches den theoretischen Minimalbedarf bestimmte, können noch 21 kg Koks (oder 4 %) je Tonne Roheisen eingespart werden.

4.2.4 Elektrolichtbogenofen

Der Energiebedarf je Tonne Elektrostahl hängt stark von der zu erzeugenden Qualität ab. Die CO_2-Emissionen je Tonne Rohstahl liegen damit in einer Bandbreite von 355 bis 445 kg CO_2/t Elektrostahl (Zuliani Scipolo Born 2009).

Die Energieeffizienz bei der Elektrostahlerzeugung kann zum einen durch Prozessoptimierung erhöht werden. Der Stromverbrauch liegt bei ca. 500 bis 600 kWh je Tonee Elektrostahl. In Einzelfällen konnte er auf 400 kWh je Tonne Elektrostahl gesenkt werden. Der Strombedarf hängt von der Zugabe an chemischer Energie in Form von Kohlenstoff und Sauerstoff ab. Eine höhere Zugabe von Sauerstoff und Kohlenstoff senkt den Stromverbrauch. Zur Bestimmung des Energieverbrauchs je Tonne Elektrostahl ist somit eine Bilanzierung von elektrischer und chemischer Energie erforderlich.

Im Bereich der Prozessoptimierung liegen weitere Potenziale in der Nachverbrennung von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid im Elektrolichtbogenofen. Problematisch ist hier die Bestimmung des Kohlenmonoxid-Gehaltes im Ofen. Aufgrund der hohen Temperaturen sowie des aggressiven Milieus im Ofen gibt es derzeit keine Messmethode mit der man den Kohlenmonoxid-Gehalt bestimmen kann. Die Bestimmung des Kohlenmonoxid-Gehaltes im Abgasstrang des Ofens zeigt bisher wenig Erfolg, da im Abgasstrang eine Nachverbrennung stattfindet und somit der CO-Gehalt dort nicht mit dem

im Ofen übereinstimmt. Weiterhin ist die Synchronisierung schwierig. Von der Auswertung der Messergebnisse bis zur Einstellung der Sauerstoffzuführung in den Ofen sollten nur wenige Sekunden vergehen. Bei aktuellen Systemen dauert dieser Vorgang über eine halbe Minute. Wenn im Elektrolichtbogenofen kein Kohlenmonoxid mehr vorhanden ist, dann führt die weitere Zufuhr von Sauerstoff zu einer Verbrennung des Eisens und somit zu einer Effizienzminderung.

Weitere Effizienzpotenziale bei der Herstellung von Elektrostahl liegen im Bereich der Nutzung der Verlustenergie (Abwärme). Die Abgastemperaturen im Elektrolichtbogenofen betragen bis zu 1.400 °C, im Abgasstrang im Durchschnitt etwa 1.000 °C. Die Abgasrohre werden mit einem Kühlwasserkreislauf auf 90 °C gekühlt. Hier fällt somit eine große Menge an Kühlwasser auf einem Temperaturniveau von 90 °C an, welches derzeit nicht genutzt wird. Die Nutzung der Wärme des heißen Abgases gestaltet sich schwierig. Zum einen muss das Abgas schnell auf 200 °C abgekühlt werden, damit eine Dioxinbildung unterbunden wird. Zum anderen ist die Nutzung des heißen Abgases beispielsweise über einen Wärmetauscher schwierig, da das Abgas selbst hoch reaktiv ist und somit die Lebensdauer der Wärmetauscher stark verkürzen würde. Die schnelle Kühlung des Abgases erfolgt über die Zugabe von Kühlwasser in das Abgas. Damit findet nicht eine Wärmeübertragung auf einen weiteren Wärmestrom statt, dessen Wärme genutzt werden könnte.

Als eine Effizienzmaßnahme wurde und wird die Schrotterwärmung durch das heiße Abgas des Elektrolichtbogenofens propagiert. Hier liegt die Schwierigkeit zum einen in dem Batchprozess (d. h. nicht kontinuierlicher Prozess), der hohe Anforderungen an die Abwärmenutzungstechnologie stellen würde und zum anderen in der Dioxinbildung, da durch den langsamen Wärmeübergang von dem Abgas auf den Schrott keine schnelle Abkühlung des Abgases erfolgt. Damit bilden sich Dioxine, die in einer Nacherhitzung verbrannt werden müssen. Der Strombedarf für das Einschmelzen des Schrotts verringert sich durch eine Vorerwärmung des Schrotts zwar auf etwa 300 kWh/t Elektrostahl, die Nacherhitzung des Abgases zur Verbrennung der Dioxine verbraucht jedoch ca. weitere 80 kWh. Damit liegt der gesamte Stromverbrauch über dem aktuellen Minimum von 365 kWh. In Europa gibt es laut Expertenaussagen nur eine Anlage mit Schrotterwärmung in der Schweiz, die dann eine Nacherwärmung des Abgases durchführt. In anderen Ländern, in denen die Gesetze zum Immissionsschutz nicht für die Emittierung von Dioxinen gelten (bspw. Indien) wird vermehrt die Schrotterwärmung durch das heiße Abgas des Elektrolichtbogenofens durchgeführt.

4.2.5 Sekundärmetallurgie, Urformen, Umformen, Oberflächenbehandlung

In der Hochofenroute wird im Hochofen Roheisen und im anschließenden Konverter Rohstahl erzeugt. Im Wesentlichen handelt es sich bei diesen Prozessen um die Reduzierung von Eisenerz zu Eisen und um die Entkohlung und Entphosphorung von Roheisen hin zum Rohstahl. Um aber gezielt Festigkeits- und Materialeigenschaften zu erreichen, sind weitere Behandlungsschritte, wie Wärmebehandlungen oder die Zugabe von Legierungselementen, notwendig. Ein Anlagentyp sind Vakuumanlagen, die dem Rohstahl Gase und Elemente wie Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoff, Schwefel oder Sauerstoff entziehen. In Pfannenöfen wird die Temperatur für die anschließende Stranggußanalge eingestellt. Die Zugabe von Legierungselementen kann in beiden Analgentypen stattfinden.

Weitere Behandlungsschritte auf dem Weg zum Stahlprodukt sind Urformen also das Vergießen von flüssigem Stahl z. B. in Strangussanlagen und das Umformen, z. B. das Walzen von Brammen zu Bändern, oder das Pressen zu Rohren.

Sind die Prozesse bis zur Flüssigstahlerzeugung relativ übersichtlich, so fächern sie sich danach aufgrund der Produktvielfalt stark auf. Die größten Anteile an Energie werden bei der Roheisenerzeugung im Hochofen, bei der Elektrostahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen, sowie für die Koks- und Sinterherstellung verbraucht. Die Prozesse die auf die Flüssigstahlerzeugung folgen, verbrauchen etwa weitere 2 GJ/t Stahl, was etwa 12 % des gesamten Energiebedarfs zur Herstellung einer Tonne Stahl entspricht. Größte Energienachfrager sind hier die Walzwerke. Effizienzoptionen sind Technologien die aus flüssigem Stahl direkt Endprodukte erzeugen und damit verschiedene Behandlungs- und Wärmprozesse vermeiden.

4.2.6 Übergreifende Maßnahmen

Neben den prozessspezifischen Effizienzoptionen gibt es in der Eisen- und Stahlindustrie Maßnahmen, die prozessübergreifend wirken und dennoch für die Eisen- und Stahlindustrie im weiten Maße spezifisch sind. Als erstes ist hier der Hüttengasverbund zu nennen, der die Abgase der verschiedenen Prozesse sammelt und zum Teil zum hüttenwerkseigenem Kraftwerk leitet. Die Erneuerung der hüttenwerkseigenen Kraftwerke ist zudem eine Effizienzoption. Da die Stahlindustrie bei Temperaturen bis 1.400 °C arbeitet, ist Abwärmenutzung ein zentrales Effizienzthema. Bei der Stahlproduktion fällt Ausschuss, also Schrott, in relativ großen Mengen an. In Deutschland lag der Schrottanfall in den Stahlwerken in den letzten Jahren zwischen 10,3 und 10,5 % der produzierten Stahlmenge (VDEh 2009/2010). Die Verringerung von Ausschuss ist damit eine weitere Effizienzoption. Querschnittstechnologien werden in diesem Vorhaben nicht untersucht; dennoch soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Er-

neuerung und richtige Dimensionierung von elektrischen Antrieben von den Experten als Effizienzmaßnahme in der Eisen- und Stahlindustrie gesehen wird.

4.2.7 Direktreduktion

Bei Direktreduktionsverfahren findet die Reduktion des Eisenerzes unterhalb der Schmelztemperatur, also im festen Zustand, statt. Das Produkt ist das sog. DRI (Direct Reduced Iron), welches einen Eisengehalt von 85-94 % hat. DRI ist meist sehr pyrophor ist (d. h. es neigt zur Reoxidation), weshalb es zum Transport zu sog. HBI (Hot Briquetted Iron) kompaktiert wird. Es wird in der Regel in Elektrolichtbogenöfen eingesetzt, wo es z. T. den benötigten Schrott substituiert. Weit verbreitet sind Direktreduktionsverfahren auf Erdgasbasis, weshalb sie verstärkt in erdölreichen Ländern (Venezuela, Saudi Arabien) zu finden ist. Als weiteres Reduktionsmittel kann Kohle eingesetzt werden. Dieses Verfahren ist in Ländern ohne Erdöl-/Erdgasvorkommen aber mit Kohlevorkommen und bei bislang zu geringer akkumulierter Schrottmenge (z. B. Indien) verbreitet.

Es lassen sich vier Typen von Direktreduktions-Verfahren unterscheiden. Zum einen gibt es Schachtöfen (z. B. Midrex, HYL III) auf Erdgasbasis, Drehrohröfen (z. B. SL/RN) auf Kohlebasis, Wirbelschichtanlagen auf Gasbasis (z. B Finmet).- oder Kohlebasis und Drehherd-Verfahren, die Kohle als Reduktionsmittel und Gas als Brennstoff einsetzen.

(a) Schachtöfen auf Erdgasbasis (z. B. Midrex, HYL III): Das am weitesten verbreitete Verfahren ist das Midrex-Verfahren. Weltweit sind rund 200 Anlagen mit einer Kapazität von rund 45 Mio. t DRI/Jahr installiert (Midrex 2011).

(b) Drehrohöfen auf Kohlebasis (z. B. SL/RN): Vor allem in Indien werden zahlreiche SL/RN-Anlagen betrieben, die in einem Drehrohrofen stückiges Eisenerz, Pellets oder Feinerze mit Kohle reduzieren. Weitere Anlagen gibt es in Südafrika und Neuseeland. Die Kapazität von Drehrohröfen ist durch die Länge und den Durchmesser und aufgrund mechanischer Instabilität begrenzt.

(c) Wirbelschichtanlagen auf Gas- und Kohlebasis: Einsatz von Feinerzen ist möglich. Wirbelschichtanlagen auf Gasbasis: In Trinidad gibt es eine Circored-Anlage die mit Erdgas Eisenerz direkt reduziert. Das Circored-Verfahren nutzt Wasserstoff, der aus Erdgas in einem Reformer gewonnen wird, zur Produktion von DRI. Anschließend kann das DRI heiß in einen Elektrolichtbogenofen chargiert werden oder zu HBI agglomeriert und verschifft werden. Wenn der benötigte Strom für das Einschmelzen CO_2-frei erzeugt wird, dann ist dieses Stahlerzeugungsverfahren nahezu CO_2-frei. Dafür muss aber auch eine möglichst CO_2-freie Wasserstoffbereitstellung gewährleistet sein. Wirbelschichtanlagen auf Kohlebasis: Das Circofer-Verfahren ist eine Direktreduktion, die auf der integrierten Vergasung von Kohle basiert.

(d) Drehherdverfahren (Kohle als Reduktionmittel, Erdgas als Brennstoff). Einsatz von Feinerzen ist möglich.

4.2.8 Schmelzreduktion

Die Schmelzreduktion wird als Konkurrenztechnologie zum Hochofen gewertet, da sie ohne die energieintensiven Produkte Koks und Sinter auskommen könnte und wie der Hochofen flüssiges Roheisen erzeugt. Das erste kommerzielle Verfahren (Corex) benötigt allerdings immer noch Anteile an Eisenerzpellets. In der Entwicklung befinden sich verschiedene Verfahren (z. B. Finex), die Roheisen direkt aus Kohle und unpelletierten Erzen (Feinerzen) herstellen sollen.

Das einzige kommerzielle Schmelzreduktionsverfahren ist der Corex-Prozess. Bisher gibt es zwei Anlagen in Afrika, vier in Indien und zwei in China (Siemens VAI 2011). Das Corex-Verfahren benötigt Sinter (IEA 2006). Als Erweiterung zum Corex-Verfahren wird der Finex-Prozess entwickelt, der mit Feinerzen arbeiten soll (IEA 2006). Zwei Anlagen wurden bisher in Korea errichtet.

4.2.9 Zusammenfassung: THG-Emissionen und Energieverbrauch

Die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs in der Eisen- und Stahlindustrie ist aufwendig und nicht eindeutig. In Abhängigkeit der Berechnungsgrenzen ergeben sich unterschiedliche Größen. So kann z. B. die Kokerei, bzw. der Energiebedarf für die Herstellung von Koks mit in den spezifischen Energieverbrauch der Stahlerzeugung eingerechnet werden. Es kann aber auch angenommen werden, dass die Herstellung von Koks dem Umwandlungssektor zugerechnet wird und damit nicht der Stahlerzeugung zugeschlagen wird. Weitere Berechnungsvarianten liegen im hütteneigenen Kraftwerk, in der Erzeugung von Dampf und Sauerstoff und in der Behandlung der Kuppelgase, als auch in der Annahme der Brennwerte für die Energierohstoffe. Die Liste lässt sich verlängern. Für ein vertiefendes Verständnis sei hier beispielsweise auf das Benchmark der EU für Eisen und Stahlindustrie (Ecofys 2009) als auch auf eine Veröffentlichung von Tanaka (2008) verwiesen.

Tabelle 4-1 zeigt die spezifischen und gesamten Brennstoff-, Strom- und Endenergieverbräuche der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland 2007 unter folgenden Annahmen:

- Energieaufwand für die Koksherstellung 4.200 MJ/t Koks
- Energieaufwand für die Dampferzeugung 1.000 MJ/t
- Energieaufwand für die Sauerstofferzeugung 1.080 MJ/1.000 m³(n)
- Gutschrift für die Gicht- und Koksgasnutzung 1.504 MJ/t RE
- Energieaufwand für die Sintererzeugung 1.939 MJ/t RE.

Tabelle 4-1: Brennstoff-, Strom- und Endenergieverbräuche (spezifisch und absolut) der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland nach Prozessen im Jahr 2007

	Eisen- und Stahlindustrie, Deutschland 2007					
	Brennstoffe spezifisch		**Strom spezifisch**		**Endenergie spezifisch**	
Hochofenbetriebe	18.034	MJ/t RE	284	MJ/t RE	18.319	MJ/t RE
Elektrostahlwerk	525	MJ/t ES	1.919	MJ/t ES	2.444	MJ/t ES
Warmwalzbetriebe	1.232	MJ/t RS	450	MJ/t RS	1.682	MJ/t RS
Gesamt	15.752	MJ/t RS	1.714	MJ/t RS	17.466	MJ/t RS
	Brennstoffe gesa7mt		**Strom gesamt**		**Endenergie gesamt**	
Hochofenbetriebe	497.933	TJ	8.861	TJ	506.794	TJ
Elektrostahlwerk	7.883	TJ	28.815	TJ	36.698	TJ
Warmwalzbetriebe	59.797	TJ	21.858	TJ	81.656	TJ
Gesamt	764.751	TJ	83.218	TJ	847.969	TJ
(RE: Roheisen, ES: Elektrostahl, RS: Rohstahl)						

Quelle: Statistisches Bundesamt 2010; Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 4-2 zeigt die spezifischen und gesamten Brennstoff-, Strom- und Endenergieverbräuche der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland 2007 unter folgenden geänderten Annahmen für Koks, Dampf und Sauerstoff:

- Energieaufwand für die Koksherstellung 0 MJ/t Koks
- Energieaufwand für die Dampferzeugung 0 MJ/t
- Energieaufwand für die Sauerstofferzeugung 0 MJ/1.000 m³(n)
- Gutschrift für die Gicht- und Koksgasnutzung 1.504 MJ/t RE
- Energieaufwand für die Sintererzeugung 1.939 MJ/t RE.

Es ist zu erkennen, dass die getroffenen Annahmen die Ergebnisse über die verschiedenen Energiebedarfe stark beeinflusst. Der Endenergiebedarf nach den beiden unterschiedlichen Methoden unterscheidet sich um etwa 10 %.

Abbildung 4-4 zeigt den Strom- und Brennstoffverbrauch der einzelnen Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie im Jahr 2007. Der dominierende Energieverbraucher ist der Hochofen; er verbraucht ca. 80 % der in der Eisen- und Stahlindustrie eingesetzten Energie. Mit großem Abstand folgen Walzwerke und Sinteranlagen, Kokereien und schließlich die Elektrolichtbogenöfen.

Die Verteilung der Treibhausgasemissionen in der Eisen- und Stahlindustrie je Prozess (Abbildung 4-5) bietet ein ähnliches Bild wie die Verteilung des Energieverbrauchs (Abbildung 4-4): Auch hier ist der Hochofen kombiniert mit dem Oxygenstahlwerk der

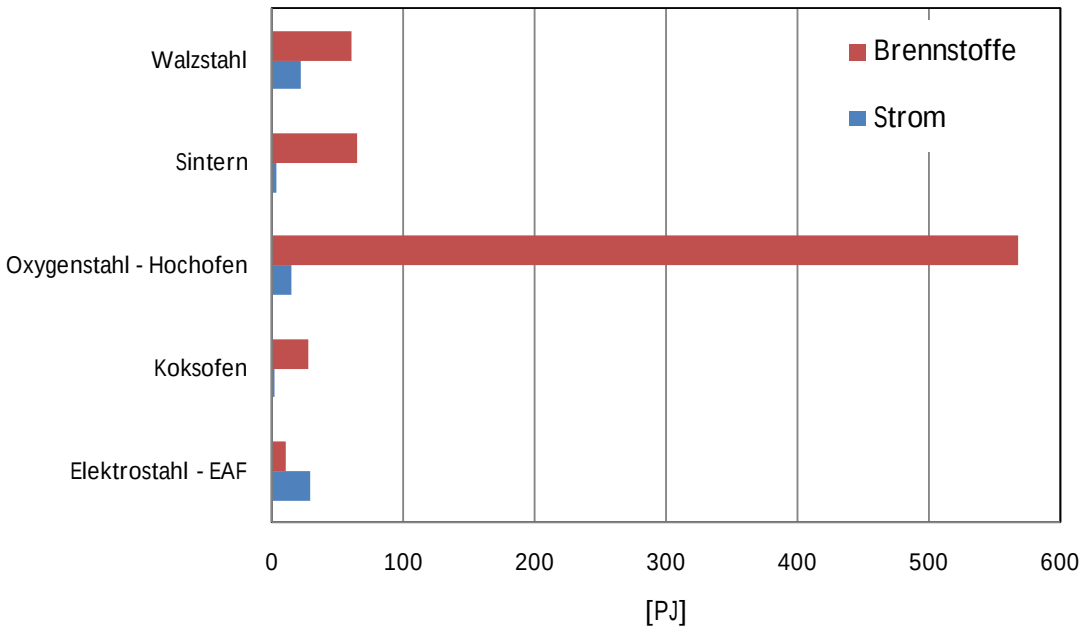
mit Abstand größte THG-Emittent. Ihm folgen die Walzwerke, Sinteranlagen, Elektrolichtbogenöfen und schließlich Koksöfen.

Tabelle 4-2: Brennstoff-, Strom- und Endenergieverbräuche (spezifisch und absolut) nach Prozessen und gesamt der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland, 2007

	Eisen- und Stahlstatistik 2007					
	Brennstoffe spezifisch		**Strom spezifisch**		**Endenergie spezifisch**	
Hochofenbetriebe	16.208	MJ/t RE	284	MJ/t RE	16.493	MJ/t RE
Elektrostahlwerk	472	MJ/t ES	1.919	MJ/t ES	2.391	MJ/t ES
Warmwalzbetriebe	1.198	MJ/t RS	450	MJ/t RS	1.648	MJ/t RS
Gesamt	14.047	MJ/t RS	1.714	MJ/t RS	15.761	MJ/t RS
	Brennstoffe gesamt		**Strom gesamt**		**Endenergie gesamt**	
Hochofenbetriebe	447.536	TJ	8.861	TJ	456.397	TJ
Elektrostahlwerk	7.086	TJ	28.815	TJ	35.901	TJ
Warmwalzbetriebe	58.143	TJ	21.858	TJ	80.002	TJ
Gesamt	681.971	TJ	83.218	TJ	765.189	TJ
(RE: Roheisen, ES: Elektrostahl, RS: Rohstahl)						

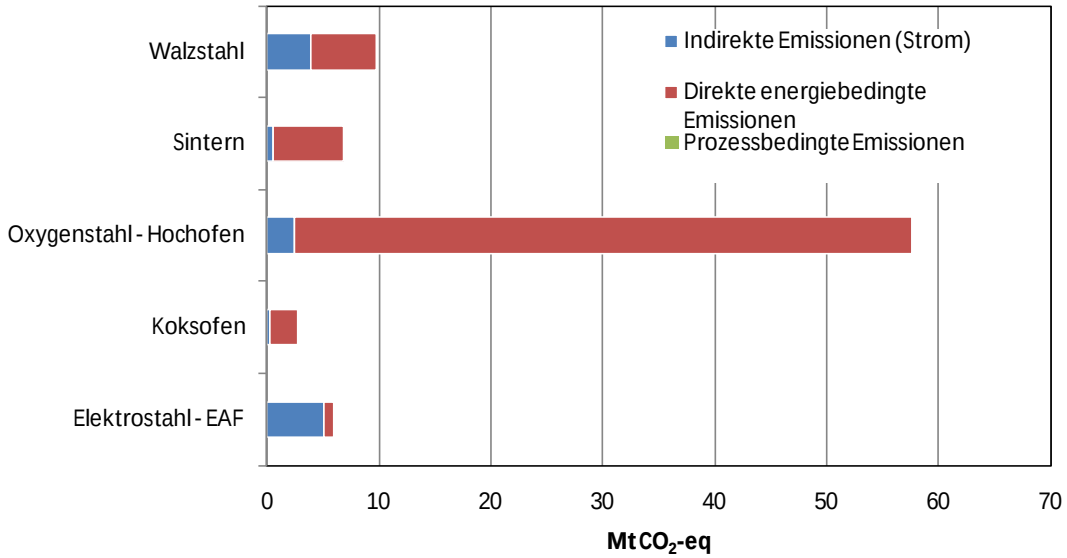
Quellen: Statistisches Bundesamt 2010; Berechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 4-4: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Statistisches Bundesamt 2010; Berechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 4-5: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Statistisches Bundesamt 2010; Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 4-3: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO_2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Elektrostahl - EAF	28,24	10,17	-	5,06	0,99
Koksofen	1,15	26,89	-	0,21	2,61
Oxygenstahl - Hochofen	14,08	568,28	-	2,52	55,10
Sintern	3,50	64,35	-	0,63	6,24
Walzstahl	22,17	60,13	-	3,97	5,83

Quelle: Statistisches Bundesamt 2010; Berechnungen Fraunhofer ISI

4.3 Analyse der Einsparoptionen

Die Einsparoptionen werden folgenden Prozessen zugeordnet: Hochofenroute, Elektrolichtbogenofen, Walzen und Beizen, Andere Verfahren, Übergreifende Maßnahmen. Besonders relevante Einsparoptionen wurden in das Modell aufgenommen; es sind folgende Maßnahmen: Wärmerückgewinnung am Elektrolichtbogenofen, Kokstrockenkühlung, Optimierung des Hüttengasverbundes, Gichtgasrückführung, Abwärmenutzung Hochofenschlacke, Gas-Rezirkulierung an Sinteranlagen, Abwärmenutzung an brennstoffbeheizten Anlagen/Walzwerksöfen, endabmessungsnahes Gießen, Schmelzreduktion, Direktreduktion.

4.3.1 Hochofenroute

4.3.1.1 Gas-Rezirkulierung an Sinteranlagen

Beim Sintern wird Eisenerz bei Temperaturen um 1000 C bis 1300 °C gebrannt. Die Rezirkulierung der Abwärme bietet eine Effizienztoption. Schwierigkeiten bei der Verbreitung von Abwärmenutzungstechnologien an Sinteranlagen beruhen zum einen auf den höheren Schadstoffkonzentrationen im Abgas (trotz gleichbleibender absoluter Schadstoffmenge), den Investitionen sowie die Veränderung der Produkteigenschaften (z. B. Veränderung der Korngröße).

4.3.1.2 Kokstrockenkühlung (CokeDryQuenching)

In einer Kokerei wird bei Temperaturen von 900 bis 1.400 °C Kohle zu Koks umgewandelt. Direkt im Anschluss wird der Koks abgekühlt, wobei die in ihm enthaltene latente Wärme meist ungenutzt verloren geht. Bei der in Europa üblichen Koksnasskühlung wird etwa die Hälfte der zur Verkokung eingesetzten Energie nicht genutzt, sondern geht als Wasserdampf verloren (Brauer 1996). Bei der Kokstrockenkühlung wird der Koks mit einem inerten Gas (Stickstoff) gekühlt und ausgebracht. Das Gasgemisch aus Stickstoff und anderen Komponenten erwärmt sich auf etwa 880 °C. Über eine Gasreinigung und einen Abhitzekessel kann Dampf oder Strom erzeugt werden, womit bis zu 90 % der fühlbaren Wärme des Kokses zurückgewonnen werden können. Durch dieses Verfahren lassen sich etwa 1.400 MJ/t trockenen Kokses in Form von Dampf zurückgewinnen (Brauer 1996). Dies entspricht etwa 40 % des Energieverbrauchs derzeitiger Anlagen. Bezogen auf den Herstellungsprozess von Oxygenstahl sind dies Einsparungen von 0,5 GJ/t Oxygenstahl oder rund 3 %. Neben der Energieeinsparung sind auch geringere Schadstoffbelastungen als Vorteil zu nennen.

Der großen Energieeinsparung stehen hohe Investitionen in einer Größenordnung von 100 Mio. € oder etwa 20 % der Investitionen der Kokerei gegenüber (Schätzung Sparlinek 2010). Da Anlagen der Kokstrockenkühlung aufgrund der höheren Wartungsarbeiten zeitlich weniger zur Verfügung stehen als die Kokerei, muss eine Nasskühlung als Ersatztechnologie bereitgestellt werden. Dies sind zusätzliche Kosten, die bei einer Nasskühlung nicht anfallen. Eine Nachrüstung an bereits bestehende Kokereien ist aufwendig, da der Maschinensatz (Löschwagen etc.) angepasst werden müsste.

Dennoch ist die Kokstrockenkühlung in anderen Ländern weiter verbreitet. In Japan sind 90 % der Kokereien mit einer Kokstrockenkühlung ausgestattet, in China sollen bis 2005 laut dem 10. Fünfjahresplan 60 % der Kokereien mit dieser Technologie ausgestattet werden (Sakamato 2005). Gründe für die höhere Diffusion der Kokstrocken-

kühlung in diesen Ländern werden zu einen in höheren Strompreisen (Japan) gesehen (bzw. in zu geringen Gutschriften für die Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland/Europa) (UBA Workshop 2010). Sakamato (2005) führt andere Zahlen an: Die Investitionen für eine Kokstrockenkühlung liegen nach seiner Veröffentlichung bei 20 bis 40 Mio. USD mit einer Amortisationszeit von drei bis fünf Jahren. Er führt als weitere Vorteile der Kokstrockenkühlung folgende Aspekte an: Verbesserte Qualität und Festigkeit des Kokses, Vermeidung von Luftverschmutzung (SO_x, Staub u. a.) und die Verringerung des Wasserverbrauchs.

Die stärkere Diffusion von Kokstrockenkühlung in China und Japan ist zum einen in anderen Rahmenbedingungen zu sehen, wie Kosten für Strom und Wasser. Weiterhin wird aber auch von staatlicher Seite deren Verbreitung gefordert (Chinas 10. Fünfjahresplan). Lokale Regierungen drängen auf die Einhaltung der Luftqualität und des Wasserverbrauchs. Japan hat zudem den Technologietransfer von Kokstrockenkühlung in China im Rahmen von Demonstrationsanlagen und verschiedener Joint Ventures gefördert (Sakamato 2005).

4.3.2 Optimierung des Hüttengasverbundes, Energiemanagement

Hüttengasnetze können Gicht-, Konverter- und Kokereigasnetze zusammenfassen. Die energetische Optimierung des Hüttengasverbundes minimiert die Fackelverluste, indem Erzeugung und Verbrauch aufeinander abgestimmt werden. Auch die optimale Auslegung von Speichern, Armaturen und Reglungstechnik vermindert energetische Verluste (Werner, Sparlinek, Schumlechner et al. 2009).

Integrierte Hüttenwerke sind weitgehend energetisch optimiert. Allerdings bestehen bei der Optimierung des Hüttengasverbundes weitere Effizienzpotenziale, u. a. auch durch moderne Prozesssteuerungen/Sensorik/IT. Diese Potenziale bestehen hauptsächlich in der Abstimmung von Produktion und Einsatz der Hüttengase an den verschiedenen Produktionsanlagen. Die unterschiedlichen verbrennungstechnischen Eigenschaften der Hüttengase wie Heizwert und adiabate Verbrennungstemperatur müssen beim Einsatz der Gase berücksichtigt werden. So hat z. B. das Hochofengas eine Verbrennungstemperatur von rd. 1.200°C und kann so nicht an Walzwerksöfen verwendet werden, die eine Temperatur von ca. 1.300°C benötigen.

4.3.3 Gichtgasrückführung

Das im Hochofenprozess mit Gichtgasrückführung entstehende Gichtgas enthält jeweils ca. 22 % Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2), ca. 50-60 % Stickstoff. Weitere Anteile sind Wasserstoff (VDEh 2007). Bei der Gichtgasrückführung wird das

CO_2 des Gichtgases zunächst abgeschieden, das verbleibende Gas wird aufgewärmt und als Reduktionsmittel über zwei Ebenen zurück in den Hochofen geleitet. Im Vergleich zum konventionellen Hochofen wird anstatt von heißer Luft kalter Sauerstoff über die untere Blasformenebene zugeführt. Das Einblasen von heißem Reduktionsgas in den unteren Schachtbereich des Hochofens soll einen sehr hohen Vorreduktionsgrad der Eisenerze vor Eintritt in den unteren Bereich des Hochofens bewirken, was ein deutliches Zurückdrängen der stark Wärme verbrauchenden Boudouard-Reaktion zur Folge hat. Dies führt zu einer Verringerung des Kohlenstoffbedarfes um rd. 24 %. Durch die Nutzung des Gichtgases im Hochofenprozess gehen rd. 80 % der beim konventionellen Hochofenbetrieb dem Energieverbund eines integrierten Hüttenwerkes zur Verfügung gestellten Energiemenge verloren. Dabei ist zusätzlich der Energieaufwand für die Erhitzung des Reduktionsgases zu berücksichtigen. Für eine massive CO_2-Minderung bei dieser Verfahrensvariante ist eine Endlagerung des separierten CO_2 erforderlich. Das ausgewaschene Gas enthält neben rd. 92 % CO_2 noch CO (6 %) sowie geringe Anteile H_2 und N_2. Für eine Endlagerung dürfte zur CO_2-Anreicherung eine cryogene Behandlung erforderlich sein. An einem kleinen experimentellen Hochofen mit einem Gestelldurchmesser von 1,3 m der LKAB in Lulea wurde in mehreren Versuchen das Funktionieren dieser Verfahrensvariante bestätigt. Die Umsetzung an einem industriellen Hochofen muss allerdings erst durch entsprechende Betriebsversuche noch bestätigt werden.

In Eisenhüttenstadt wird eine Pilotanlage zur Gichtgasrückführung installiert (BMU 2009). Durch das Einblasen von Sauerstoff wird der im Hochofen befindliche Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid oxidiert. Das Gichtgas wird oben am Hochofen erfasst und gereinigt. Dabei wird das Kohlenmonoxid vom Kohlendioxid getrennt und nochmals in den Hochofen eingeblasen, um zu Kohlendioxid zu reagieren. Dadurch wird die Konzentration von Kohlendioxid im Gichtgas derart erhöht, dass eine CO_2-Abscheidung möglich wird. Durch die Rückführung des Kohlenmonoxids in den Hochofen wird der Bedarf an Koks verringert. So können die CO_2-Emissionen im Hochofen um bis zu 16 % reduziert werden. Bei einer flächendeckenden Installation dieses Verfahrens in Deutschland könnten jährlich 6,9 Mio. t CO_2 eingespart werden (BMU 2009).

4.3.3.1 Abwärmenutzung Hochofenschlacke

Pro Tonne Roheisen bilden sich im Hochofen etwa 0,3 t Schlacke die bis zu 1.450°C heiß ist. Derzeit wird dieser Energieinhalt nicht genutzt. Die Hochofenschlacke wird lediglich für andere Industriezweige (beispielsweise für den Straßenbau) aufgearbeitet. Pro Tonne Rohstahl enthält die dazugehörige Schlacke etwa 0,5 GJ an Wärmeenergie, was bei einer Jahresproduktion von 30 Mio. t Roheisen in Deutschland ein Potenzial

von 15 PJ ergibt. Bisher befinden sich die technologischen Entwicklungen in diesem Bereich noch am Anfang.

4.3.3.2 Branchenübergreifende Energieverbünde

Im Stahlwerk wird Wärmeenergie meist bei einem Temperaturniveau von 1.200 bis 1.500 °C benötigt. Eine synchronisierte Abgabe an und Nutzung von einem benachbarten Industriebetrieb, der Wärmeenergie in einem Temperaturbereich von unter 1.000 °C benötigt, wäre eine sehr gute Effizienzmaßnahme. Branchenübergreifende Energieverbünde können daher zum einen Wärmeabgabe an Dritte beinhalten. Schwierigkeiten liegen vor allem in der Gewährleistung der Lieferung bzw. Abnahme der Wärme.

Daneben gibt es Ideen, branchenübergreifende Energieverbünde zwischen der Stahl- und der Chemieindustrie herzustellen. So könnte zum Beispiel das wasserstoffreiche Koksofengas, als auch das kohlenmonoxidreiche Konvertergas als Ausgangsstoffe für die chemische Industrie verwendet werden. Arbeiten dazu befinden sich erst in den Anfängen.

4.3.3.3 Kohlenstaubeinblasen

Durch das Einblasen von Kohlenstaub kann bis zu 30 % Koks im Hochofen eingespart werden. Dadurch ergeben sich zwar keine Einsparungen im Hochofen, wohl aber in der Kokerei. Allerdings wird eine gewisse Menge an Koks im Hochofen benötigt, da der poröse Koks ein stützende Funktion zwischen den Koks- und den Erzschichten hat. Kohlenstaub kann daher nicht den Koks komplett ersetzen. Der Kokseinsatz in Deutschland in Deutschland wurde in den vergangenen Jahren weitest möglich durch das Einblasen von Kohlenstaub verringert (siehe dazu auch Abbildung 4-3). Es ist daher davon auszugehen, dass in Deutschland dieses Potenzial weitestgehend ausgeschöpft ist.

4.3.3.4 Alternative Reduktionsmittel

Der Einsatz von alternativen Reduktionsmitteln im Hochofen wie Altplastik oder Biomasse ist eine Option, einen Teil der CO_2-Emissionen neutral zu emittieren. Im Hochofen kann jedoch auch in absehbarer Zeit nicht auf Koks verzichtet werden. Alternative Reduktionsmittel haben damit nur ein geringes Potenzial zur Diffusion. In dem europäischen Forschungsprojekt Ulcos wurde ermittelt, dass die Fläche Belgiens in einer klimatischen Region wie Brasilien mit Eukalyptus bepflanzt werden müsste, um den Energiebedarf der europäischen Stahlindustrie zu decken.

4.3.3.5 Erneuerung der Hüttenkraftwerke

In den Kraftwerken der Integrierten Hüttenwerke in Deutschland werden jährlich rund 8 Mio. kWh Strom erzeugt. Verschiedene Experten geben die Wirkungsgrade dieser Kraftwerke mit etwa 33 % an, was für einen Erneuerungsbedarf und somit für ein Effizienzpotenzials spricht.

4.3.4 Elektrolichtbogenofen

4.3.4.1 Abwärmenutzung am Elektrolichtbogenofen

Eine Effizienzmaßnahme bei dem Elektrolichtbogen ist die Nutzung der Abwärme des Ofens zur Vorerwärmung des Schrotts. Schwierigkeiten liegen hier in der Koordination des apparativen Aufbaus (Förderbänder) hinsichtlich der Energieeffizienz, der Aufheizzeiten, der Kunststoffbeimengungen und giftiger Komponenten im Abgas. Eine andere Wärmenutzungsmöglichkeit ist die Verstromung der Wärme z. B. mit einer ORC-Anlage (Zuliani Scipolo Born 2009).

Abwärmenutzung am Elektrolichtbogenofen (Richtung Stromerzeugung): Große Abwärmemengen werden am Elektrolichtbogenofen freigesetzt. Diese Abwärme wurde zeitweise zur Schrottvorwärmung genutzt. Dies führte aufgrund der Verunreinigungen des Schrotts zu einer erhöhten Bildung von Schadstoffen wie Dioxinen und Furanen im Abgas, das dann zur Zersetzung der Dioxine und Furane einer Nachverbrennung bei Temperaturen von > 800 °C unterzogen werden musste, wodurch der energetische Vorteil wieder zunichte gemacht wurde. Die Verstromung der Abwärme im Elektrostahlwerk bietet im Gegensatz zum Integrierten Hüttenwerk eine attraktive Wärmenutzung, da hier weniger Dampf benötigt wird. Derzeit gibt es in diesem Bereich verschiedene Entwicklungen, z. B. zu Dampf- und Thermoöl-Kreisläufen sowie zur Thermoelektrik, die sich jedoch noch im Labormaßstab befindet. Allgemein gilt: Je höher der jeweilige Strompreis ist, desto attraktiver ist für die Stahlerzeugung die Wärmerückgewinnung in Kombination mit einer Verstromung.

Bereits etabliert ist die Nutzung von Abwärme an Konvertern über dampfgekühlte Abgaskamine. Hierbei wird die Wärme aus dem heißen Abgas in den Abgaskaminen, die aus Membranwänden bestehen, in Dampf umgewandelt. Der Dampf kann dann gut in anderen Prozessen (z. B. Antrieb von Vakuum-Dampf-Strahlpumpen, DRI-Anlagen, Wasseraufbereitung, …) genutzt werden und so den extra in Dampferzeugern generierten Dampf substituieren. Die gleiche Technologie befindet sich im Bereich der E-Stahlerzeugung nun in der Markteinführung – erste Referenzen sind aufgebaut bzw. befinden sich derzeit im Bau. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, Abwärmeströme weiter zu reduzieren.

4.3.4.2 Modelle zur Vorhersage der Schrottzusammensetzung

Die Bestimmung der Anteile an Legierungselementen in Stahlschrotten ist wesentlich für die Qualität des erzeugten Elektrostahls sowie für einen effizienten Einsatz der Legierungselemente. Bisher sind solche Modell noch nicht kommerziell verfügbar. Genauere Kenntnis über die Zusammensetzung des Schrotts ist wesentlich für die Erreichung bestimmter Stahlqualitäten. Modelle zur Vorhersage der Schrottzusammensetzung können damit die Qualität der Elektrostähle steigern.

4.3.4.3 Sauerstoffeinblasen im EAF

Durch die Anoden und Kathoden im Elektrolichtbogenofen tritt Kohlenstoff in die Stahlschmelze ein, der üblicherweise während der Sekundärmetallurgie entfernt werden muss. Durch das Einblasen von Sauerstoff könnte er durch die Umwandlung zu Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid bereits in der Schmelze abgeschieden werden. Probleme bei der Umsetzung dieses Verfahrens sind in dem apparativen Aufbau sowie in der Sicherstellung eines stabilen Prozesses zu sehen. Obwohl Sauerstoffeinblasung beim EAF-Prozess bereits überwiegend eingesetzt wird, gibt es dennoch gibt es hier auch weitere Verbesserungsmöglichkeiten beispielsweise in Kombination mit Brennern und in der Steuerung (siehe beispielsweise Grant et al., 2010).

4.3.4.4 Process Control beim EAF

Die Energieeffizienz beim Elektrolichtbogenofen wird zum Teil durch die Wartezeiten zwischen den Schmelzprozessen bestimmt und zum Teil durch die Dauer der Schmelzzeiten. Verschiedene Prozesskontrollsysteme können diese Abläufe effizienter gestalten und so z. B. die Schmelzzeiten von 39 Minuten auf 36,3 Minuten verkürzen. Auch über den Einsatz von heißem Roheisen wird als Effizienzoption berichtet (Opfermann/Grosse/Baumgartner et al. 2009).

4.3.5 Walzen und Beizen

4.3.5.1 Endabmessungsnahes Gießen

Neue Gießverfahren bieten hohe Einsparpotenziale, denn mit ihnen soll aus dem flüssigen Stahl möglichst nahe die Form des gewünschten Endprodukts wie z. B. Bleche, I- oder T-Träger abgebildet werden. Dadurch wird das wiederholte Aufwärmen überflüssig und die dafür benötigte Energie eingespart. Derzeit sind verschiedene Verfahren in der Entwicklung. Neben dem konventionellen Brammengießen gibt es u. a. Dünnbrammengießen (50 bis 150 mm Dicke), Vorbandgießen (5 bis 50 mm Dicke) oder Bandgießen (2 bis 3 mm Dicke). Eine weitergehende Entwicklung könnte zu

Draht- und Profilgießen führen. Je dünner der Stahl gegossen werden kann, umso größer ist die Energieeinsparung im Vergleich zu Stahlblechen, die aus Brammen gefertigt werden. Für Bleche, die mit dem Bandgießverfahren hergestellt werden, wird nur ein Zehntel der Energie (200 MJ/t Stahl) benötigt als für Bleche, die aus Brammen gearbeitet werden (2.100 MJ/t Stahl) (Fandrich 2009). Hier sind folglich erhebliche Effizienzpotenziale verborgen, die bis zu 40 PJ pro Jahr betragen können. Derzeit gibt es weltweit nur zwei Bandgießanlagen und nur zwei weitere befinden sich in Planung. Schwierigkeiten sind vor allem in der Sicherstellung der Qualität der Stahlerzeugnisse zu sehen. Können bei Brammen die Oberflächen aufgrund von Versetzungen oder Verunreinigungen nachbehandelt werden, so ist dies bei Blechdicken von wenigen Millimetern schwierig oder nicht möglich. Weitere problematische Fragestellungen liegen in den Erstarrungsvorgängen sowie in den Seitenprofilen. Diese Aspekte fallen unter die Prozessstabilität, die gewährleistet werden muss.

Das endabmessungsnahe Gießen umfasst verschiedene Technologien, die zu einer erheblichen Prozessverkürzung auf dem Weg vom flüssigen Stahl bis zum Stahlprodukt führen. Endabmessungsnahes Gießen ersetzt somit die Stranggussanlage, Wärmöfen und einen Teil der Walzgerüste. Nach Brauer (1996) reduziert sich der Wärmebedarf je Tonne Warmband von 1,2 bis 1,5 GJ/t auf 0,1 bis 0,5 GJ. Durch die verringerte notwendige Verformungsarbeit reduziert sich zudem der Bedarf an elektrischer Energie von 80 bis 100 kWh/t Warmband auf 30 bis 60 kWh/t. Da die Warmwalzwerke einen wesentlichen Energieverbraucher im Integrierten Hüttenwerk darstellen, könnte sich Energieverbrauch durch Verfahren des endabmessungsnahen Gießens im gesamten um 5 bis 7 % reduzieren.

Bislang haben die Verfahren des endabmessungsnahen Gießen noch nicht einen kommerziellen Status erreicht. Verschiedene Schwierigkeiten behindern die Entwicklung bzw. bieten endabmessungsnahe Gießwalzverfahren nicht nur Vorteile gegenüber konventionellen Strangguss- und Walzanlagen. Zum einen ist die Herstellung von Warmband direkt aus flüssigem Stahl eine technische Herausforderung. Weiterhin lassen sich aktuell mit diesen Verfahren nicht alle Materialgüten erzeugen, bzw. ist eine Nachbehandlung von Warmband aufgrund seiner Dicke schwierig. Kontinuierliche Gießwalzverfahren werden konventionelle Strangguss- und Walzanalgen nicht vollständig ersetzen können, da der Konverter, in dem aus Roheisen Rohstahl erzeugt wird, diskontinuierlich arbeitet. Zudem ist derzeit nicht absehbar, dass kontinuierliche Gießwalzverfahren die Kapazitäten von Warmwalzstraßen erreichen werden. Trotz der technischen und logistischen Herausforderungen werden endabmessungsnahe Gießverfahren als eine sinnvolle Entwicklung gewertet.

Im Juni 2009 ging die Arvedi ESP-Anlage in Cremona, Italien, in Betrieb, die aus flüssigem Stahl Warmband mit Dicken, die bis zu 0,8 mm herunterreichen, produziert werden. Vorteile der Anlagen sind zum einen die Qualität der Produkte als auch ökonomische Aspekte, wie Energie- und Platzersparnis. Die Länge der Arvedi ESP-Anlage beträgt mit 160m nur etwa die Hälfte der Länge typischer Warmbreitbandstraßen. Die Produktpalette umfasst alle Standard-Kohlenstoffstähle sowie HSLA (hochfeste, niedriglegierte)-Stähle und Mehrphasen-Stähle. Die Produkte der Arvedi ESP-Anlage eignen sich für den Einsatz in der Automobilindustrie, im Haushaltsgerätebau und im Bauwesen sowie für die Herstellung von Rohren, Profilen, Maschinen und anderen mechanischen Ausrüstungen (Siemens VAI 2009).

Ein anderes Verfahren ist das Bandgießen von hochfesten HSD-Stählen für die Automobilindustrie, welches gerade bei der Salzgitter AG weiterentwickelt wird (BMU 2010). Die Bandgießtechnologie ist eine Alternative zum herkömmlichen Strangguss- und Walzprozess und reduziert durch das endabmessungsnahe Gießen (10-20 mm Dicke) die Anzahl der Walz- und Umformschritte die nötig sind, um die geforderten Warmbandabmessungen zu erreichen. Damit reduzieren sich auch die Erwärmungsvorgänge und die Wärmeverluste, sodass sich in der Kombination von weniger Umformarbeit und Reduzierung der Wiedererwärmungsvorgänge der Energieeinsatz von 3,5 GJ/t auf 0,8 G/t reduziert. Das Bandgießverfahren wird aktuell für die Produktion von HSD-Stählen ausgerichtet, deren Anteil an der gesamten Stahlerzeugung vorläufig nur einen kleinen Anteil ausmacht (ca. 100.000 Tonnen pro Jahr). Das Verfahren eignet sich jedoch generell für die meisten Stahlsorten (in Abhängigkeit von der geforderten Enddicke) und ist auf Grund seiner geringen Investitionskosten und günstigen Erzeugungskosten für kleine Produktionsmengen ein interessantes und wirtschaftliches Verfahren.

Beim dem CSP-Verfahren wird flüssiger Stahl in einem kontinuierlichen Prozess direkt zu dünnem oder ultra-dünnem Warmband, also mit Dicken unter 1,0 mm verarbeitet. Weltweit sind derzeit 26 Anlagen in Betrieb. Durch die Einsparung verschiedener Wärme- und Oberflächenbehandlungsschritte ist dieses Verfahren energieeffizienter als der Weg über Brammengießen, Warmwalzen und Oberflächenbehandlung. Angaben, die den Energieverbrauch bemessen, sind nicht veröffentlicht. Wie das Castrip-Verfahren, kann auch mit dem CSP-Verfahren nur ein kleines Segment der Stahlprodukte dargestellt werden.

Das Castrip-Verfahren ist die weltweit erste kommerzielle Anlage zur Produktion von ultra-dünnem Gussband über eine Zwillingsrollenanlage. Sie stellt aus flüssigem Stahl direkt ein festes Band mit einer Dicke von 0,8 bis 1,5 mm her. Dadurch werden die sonst üblichen Erwärmungsschritte überflüssig. Im Vergleich zum Brammengießen/ Warmwalzroute wird nur ein Sechstel der Energie benötigt (Schlichting 2009). Auch

diese Anlage ist nur auf ein beschränktes Segment der derzeit produzierten Stahlprodukte anwendbar.

4.3.5.2 Abwärmenutzung an brennstoffbeheizten Anlagen

Neben der Abwärmenutzung am Elektrolichtbogenofen wird auch die Abwärmenutzung an brennstoffbeheizten Anlagen, wie z. B. Walzwerke und Gießereien als Effizienzoption angesehen. Anlagen zur Wärmerückgewinnung und Brennstoffvorerwärmung stellen einen zusätzlichen Investitionsbedarf dar und können u. U. mit dem Produktionsprozess interagieren. Die Abwärmenutzung von heißen Abgasen mit Temperaturen über 900 °C ist Stand der Technik, jedoch wird dabei aufgrund des Wirkungsgrades der Abwärmenutzungstechnologie nur ein Teil der Wärme genutzt. Üblicherweise wird die Brennluft auf Temperaturwerte von rund 300 bis 500 °C vorgewärmt. Eine höhere Brennluftvorwärmung und damit eine bessere Energienutzung ist mit moderner regenerativer Technik möglich, jedoch sind hierfür erhebliche Anpassungsarbeiten an existierenden Anlagen notwendig, sodass diese Technik üblicherweise nur an neuen Öfen zum Einsatz kommt.

4.3.5.3 Hydrothermal Acid Regeneration Plant

Die Altsäure (Salzsäure) von Beizanlagen wird üblicherweise in Hochtemperatur-Prozessen (Wirbelschicht- und Sprührost-Verfahren) bei ca. 700 bis 900 °C regeneriert. Der Energieverbrauch ist entsprechend hoch. In einem neuen Verfahren wird die Regeneration auf nass-chemischem Weg bei Temperaturen von max. 170 °C erreicht. Hierdurch und durch Nutzung der Energie aus exothermen Reaktionen für endotherme Reaktionen können ggü. den herkömmlichen Verfahren rd. 40 % Energie eingespart werden. Eine erste großtechnische Anlage geht im Herbst 2010 in Betrieb.

4.3.6 Andere Verfahren

4.3.6.1 Direktreduktion auf Wasserstoffbasis

Eine Möglichkeit weitgehend CO_2-frei Stahl zu produzieren ist die Kombination von Direktreduktion mit Wasserstoff und einem anschließenden Elektrolichtbogenofen, der mit CO_2-freiem Strom betrieben wird. Damit könnte mit aktuell verfügbaren Stahlherstellungstechnologien CO_2-frei Stahl erzeugt werden. Ungeklärt ist die Bereitstellung von nicht fossil erzeugtem Wasserstoff.

4.3.6.2 Schmelzreduktion

Seit dem Aufkommen der Schmelzreduktion wurden eine Reihe verschiedener Verfahren entwickelt, von denen bisher das Corex- und das Finex-Verfahren einen kommerziellen Entwicklungsstand erreicht haben. Bislang sind etwa ein halbes Dutzend Corex-Anlagen in Betrieb (Südafrika, Indien, Korea, China). Das Corex-Verfahren ist zweistufig. Zunächst wird das Eisenerz zu DRI (Direct Reduced Iron) vorreduziert, um dann in einem zweiten Schritt im Schmelzreduktionsbad zu Roheisen reduziert zu werden. Schmelzreduktionsverfahren sollen ohne Koks und ohne pelletiertes Eisenerz arbeiten können. Damit würde der Energieaufwand von etwa 3 GJ pro Tonne Roheisen zur Herstellung dieser Eingangsstoffe entfallen. Dem gegenüber stehen im Vergleich zum Hochofen höhere Wärmeverluste, die im Apparateaufbau begründet sind.

4.3.6.3 Elektrolyse

Derzeit wird als Reduktionsmittel für die Reduktion von Eisenerz zu Eisen Kohlenstoff eingesetzt. Alternativen zum Kohlenstoff können Wasserstoff (siehe Direktreduktion auf Wasserstoffbasis) oder Elektrizität sein. Die Reduktion von Eisenerz zu Eisen mittels elektrischen Stroms würde in einer Elektrolyse erfolgen, bei der sich Eisen an der Kathode und Sauerstoff an der Anode abscheidet. Als Nebenprodukt erhielte man also Sauerstoff und nicht wie bisher üblich Kohlendioxid. Die Entwicklungen zur Elektrolyse von Eisenerz befinden sich noch am Anfang und werden u. a. im europäischen Ulcos-Programm betrieben. Bei einer erfolgreichen Entwicklung wird die Einführung dieses Verfahrens frühestens ab 2040 prognostiziert. Offen sind noch die Bereitstellung der benötigten Elektrizität aus CO_2-freien Quellen, die Weiterverarbeitung des reinen Eisens und die Anlagenkonzeption mit der die Durchsatzkapazitäten in der Größenordnung eines Hochofens bei einem ähnlichen Platzbedarf erreicht werden können. Unter diesen Gesichtspunkten wird die Elektrolyse derzeit nicht als Ersatz für den Hochofen gewertet.

4.3.6.4 Direktreduktion auf Erdgasbasis

Diese Verfahren haben sich vor allem in Ländern mit geringem eigenem Schrottaufkommen und vergleichsweise billigem Erdgas durchgesetzt (z. B. Mittlerer Osten, Russland, Indien (hier erste Anlagen mit Reduktionsgas aus der Kohlevergasung), Venezuela). Dem Produkt DRI (Direct Reduced Iron) oder HBI (Hot Briquetted Iron) wird bei diesen Verfahren der in den eingesetzten Eisenerzen enthaltene Sauerstoff weitgehend entzogen, allerdings enthält es die Gangartbestandteile der Erze. DRI und HBI werden im Elektrolichtbogenofen zur Stahlherstellung eingesetzt. Mit Einsatz von DRI oder HBI können über den Elektrolichtbogenofen Stähle in allen Qualitäten, u. a. auch

für Flachprodukte, hergestellt werden, jedoch mit geringeren CO_2-Emissionen durch den erhöhten Beitrag von Wasserstoff zur Reduktion des Eisens. Der Energieaufwand für ein gasbasiertes Schachtverfahren beträgt rund 10 GJ/t DRI. Aufgrund der Energieversorgungslage wird in Europa keine Wirtschaftlichkeit für die Direktreduktion auf Erdgasbasis gesehen.

4.3.7 Übergreifende Maßnahmen

4.3.7.1 Abwärmenutzung übergreifend

Die Stahlherstellung findet bei Temperaturen bis zu 1.400 °C statt. Ein Großteil der daraus resultierenden Abwärme wird nicht genutzt. Nach Untersuchungen von Werner, Sparlinek, Schumlechner et al. (2009) fallen 65 % der eingesetzten Energie in einem Integrierten Hüttenwerk als Abwärme an. Abwärmenutzung bietet damit ein großes technisches Effizienzpotenzial. Werner, Sparlinek, Schumlechner et al. (2009) heben folgende Effizienzmaßnahmen hervor: Optimierung der Gichtgasschluckfähigkeit im Kraftwerk, Optimierung der Tiegelgasgewinnung, Verbesserung des Dampfverbundes, prozessintegrierte Abwärmenutzung, Abwärmegewinnung durch Abhitzekessel, Kälteerzeugung aus Abwärme. Die Erzeugung von Strom aus Abwärme mit ORC-Anlagen bietet beispielsweise ein großes technisches Potenzial; aus wirtschaftlichen Gründen werden sie jedoch nur in seltenen Fällen umgesetzt. Hemmnisse sind vor allem der geringe Strompreis für die industrielle Abnehmer und damit einhergehender langer Amortisationszeiten.

4.3.7.2 Process Control/Elektrische Antriebe übergreifend

Laut Expertenmeinung können in der Eisen- und Stahlindustrie etwa 5 bis 10 % der Energie durch weitere Effizienzmaßnahmen eingespart werden. Einen wesentlichen Beitrag können Systeme zur Prozesssteuerung leisten. Ziel ist die Führung der Prozesse an ihrem verfahrenstechnischen Optimum. Das kann z. B. die genaue Bestimmung einer Temperatur sein, die eine Überhitzung überflüssig macht. Dadurch können Wärmebehandlungen gekürzt und Ausschuss verringert werden. Dazu zählt auch die Erneuerung und richtige Dimensionierung von elektrischen Antrieben.

4.3.7.3 Ausschuss verringern

Das Schrottaufkommen durch den Eigenanfall in den Stahlwerken lag in den Jahren von 2002 bis 2008 bei 10,1 bis 10,6 % der Rohstahlproduktion (VDEh 2009/2010). Eine Verringerung des Ausschusses ist eine Effizienzmaßnahme.

4.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

Für die Berechnung der Einsparpotenziale wurden die einflussreichsten Effizienztechnologien ausgewählt, die Tabelle 4-7 zu entnehmen sind. In der Eisen- und Stahlindustrie sind bis 2030 vor allem Einsparungen des absoluten Brennstoffverbrauchs möglich. Grund hierfür ist neben Effizienzverbesserungen vor allem die Verlagerung der Produktion von Oxygenstahl zu dem energieeffizienteren Recyclingverfahren, dem Elektrolichtbogenofen (Abbildung 4-7). Diese Verlagerung wurde im Folgenden jedoch nicht quantifiziert, da sie im engeren Sinne nicht als Effizienzverbesserung eines Prozesses einzuordnen ist, sondern als Prozesssubstitution. Sie findet sich jedoch bereits in der Frozen-Efficiency-Entwicklung in Abbildung 4-7 wieder.

Betrachtet man hingegen die relativen Einsparpotenziale (im Vergleich zur Frozen-Efficiency-Entwicklung), so zeigt sich, dass auch beim Stromverbrauch noch erhebliche Verbesserungen möglich sind (Abbildung 4-6).

Tabelle 4-5 zeigt die resultierenden spezifischen Energieverbräuche je Prozess und je Szenario. Größte spezifische Einsparungen ergeben sich beim Walzen aufgrund des Bandgießverfahrens. Die Potenziale beim Hochofen sind eher begrenzt. Weitere größere Potenziale sind beim Elektrolichtbogenofen, bei der Kokerei und der Sinteranlage zu finden.

Tabelle 4-4: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse

	Produktion [kt]					
Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Direktes Reduktionsverfahren	593	593	593	593	593	593
Elektrostahl - EAF	15.015	16.192	17.018	17.886	17.797	17.010
Koksofen	8.441	7.543	7.180	6.746	6.141	5.554
Oxygenstahl - Hochofen	33.535	30.171	28.721	26.985	24.565	22.214
Schmelzreduktionsverfahren	0	0	1.000	2.000	3.000	4.000
Sintern	29.470	28.505	27.079	25.384	23.042	20.766
Walzstahl	41.999	40.107	40.432	40.547	39.241	37.391

Tabelle 4-6 stellt die resultierenden absoluten Energieverbräuche und THG-Emissionen je Prozess und je Szenario dar. In dieser Betrachtung sind die Verlagerungseffekte von Oxygenstahl zu Elektrostahl einflussreicher als Effizienzmaßnahmen, wobei der Einfluss der Effizienzmaßnahmen dennoch signifikant ist.

Tabelle 4-7 zeigt die resultierenden Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption. Größte prozentuale Einsparpotenziale finden sich beim Walzstahl, bei der Kokerei und am Elektrolichtbogenofen. Auch beim Hochofen gibt es nach den Berechnungen weitere Einsparoptionen, die aufgrund der Energieintensität des Hochofens zu wesentlichen Einsparungen beitragen.

Abbildung 4-6: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Metallerzeugungssektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario

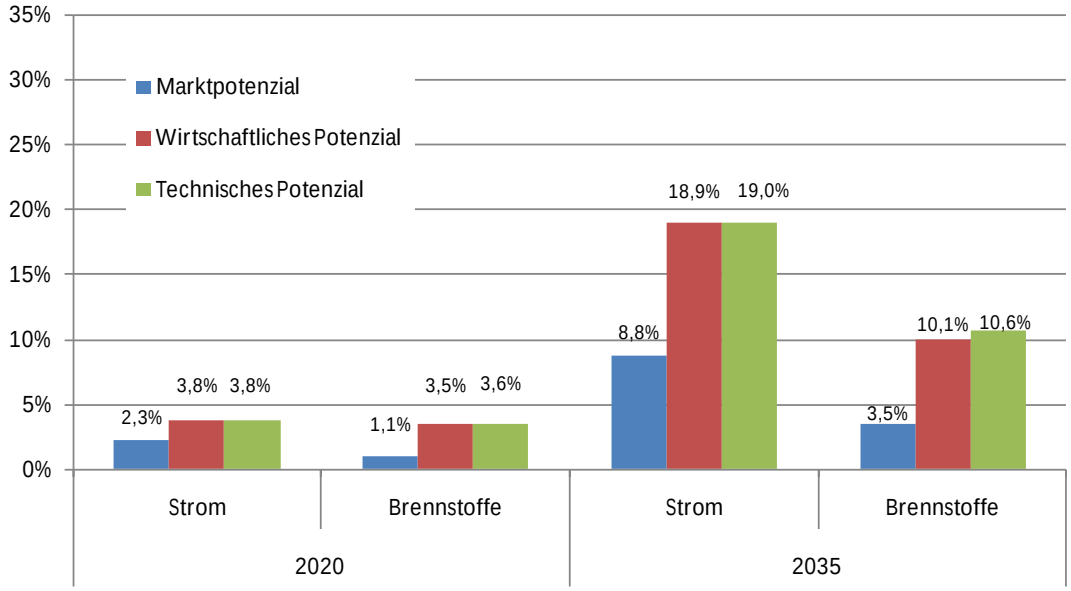


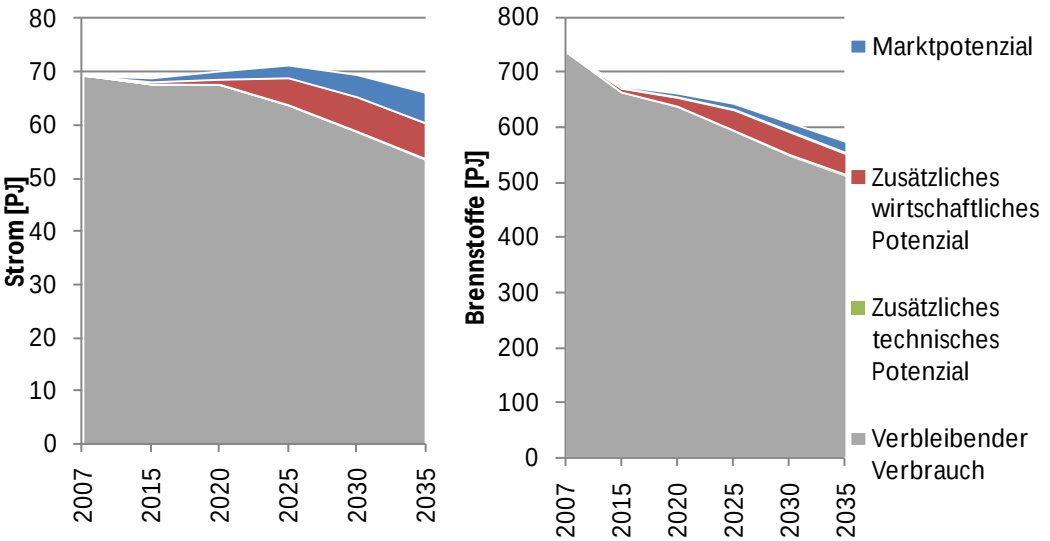
Tabelle 4-5: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess nach Szenario

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Direktes Reduktionsverfahren	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Elektrostahl - EAF	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,8	1,6	1,8	1,6
Koksofen	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Oxygenstahl - Hochofen	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Schmelzreduktionsverfahren	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Sintern	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Walzstahl	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,3

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Direktes Reduktionsverfahren	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Elektrostahl - EAF	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,6
Koksofen	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	2,7	2,2	2,7	2,2
Oxygenstahl - Hochofen	16,9	16,9	16,9	16,8	16,6	16,5	15,9	16,5	15,8
Schmelzreduktionsverfahren	-	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Sintern	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,0	2,1	2,0
Walzstahl	1,4	1,4	1,4	1,4	1,1	1,3	0,8	1,3	0,8

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 4.1 bis 4.3 genannten Datenquellen und Annahmen (gilt für Abbildung und Tabelle)

Abbildung 4-7: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035



Strom [PJ]	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	69,4	69,0	70,3	71,4	69,6	66,2
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,8	1,6	2,4	4,2	5,8
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	0,5	1,1	5,2	6,5	6,7
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1

Brennstoffe [PJ]	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	738,7	674,8	662,0	643,3	608,3	573,4
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	3,2	7,1	10,6	15,6	20,2
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	7,0	15,9	37,0	41,1	37,6
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,0	0,7	1,3	2,4	3,3

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 4.1 bis 4.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 4-6: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Direktes Reduktionsverfahren	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Elektrostahl - EAF	28,24	32,01	32,00	31,38	29,15	31,38	26,93	31,38	26,93
Koksofen	1,15	0,98	0,76	0,98	0,76	0,87	0,59	0,87	0,59
Oxygenstahl - Hochofen	14,08	12,06	9,33	11,99	9,17	11,86	8,93	11,85	8,86
Schmelzreduktionsverfahren	0,00	0,42	1,68	0,42	1,68	0,42	1,68	0,42	1,68
Sintern	3,50	3,22	2,47	3,22	2,47	3,11	2,28	3,11	2,28
Walzstahl	22,17	21,35	19,74	20,46	16,94	19,73	13,01	19,73	13,01
Summe	69,40	70,28	66,22	68,69	60,41	67,62	53,68	67,61	53,61

	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Direktes Reduktionsverfahren	8,89	8,89	8,89	8,89	8,88	8,88	8,87	8,88	8,87
Elektrostahl - EAF	10,17	11,52	11,52	11,27	10,37	11,27	9,48	11,27	9,48
Koksofen	26,89	22,88	17,69	22,88	17,69	19,21	12,03	19,21	12,03
Oxygenstahl - Hochofen	568,28	486,71	376,44	483,19	368,42	475,02	353,58	474,32	350,31
Schmelzreduktionsverfahren	0,00	15,00	60,00	15,00	59,92	14,99	59,84	14,99	59,84
Sintern	64,35	59,13	45,35	59,13	45,35	57,20	41,89	57,20	41,89
Walzstahl	60,13	57,88	53,53	54,61	42,59	52,42	29,97	52,42	29,97
Summe	738,72	662,02	573,42	654,96	553,22	639,01	515,66	638,30	512,39

	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Direktes Reduktionsverfahren	907	904	890	904	888	903	887	903	887
Elektrostahl - EAF	6.041	6.495	4.604	6.364	4.183	6.364	3.855	6.364	3.855
Koksofen	2.813	2.382	1.798	2.382	1.798	2.009	1.230	2.009	1.230
Oxygenstahl - Hochofen	57.624	49.218	37.514	48.865	36.720	48.052	35.255	47.981	34.931
Schmelzreduktionsverfahren	0	1.525	6.000	1.525	5.993	1.524	5.985	1.524	5.985
Sintern	6.867	6.274	4.665	6.274	4.665	6.070	4.311	6.070	4.311
Walzstahl	9.799	9.199	7.342	8.732	5.976	8.398	4.324	8.398	4.324
Summe	84.051	75.998	62.814	75.045	60.222	73.320	55.846	73.249	55.523

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 4.1 bis 4.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 4-7: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (Technisches Potenzial)

	Energie-Einsparpotenzial						THG Vermeidung		
	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brenn-stoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Metallerzeugung	2,68	12,61	23,71	61,03	**19%**	**11%**	2.749	7.291	**11%**
Elektrostahl - EAF	0,63	5,06	0,26	2,04	**16%**	**18%**	131	750	**11%**
Wärmerückgewinnung	0,63	5,06	0,26	2,04			131	750	
Koksofen	0,11	0,17	3,66	5,66	**22%**	**32%**	373	567	**31%**
Kokstrockenkühlung	0,11	0,17	3,66	5,66			373	567	
Oxygenstahl - Hochofen	0,22	0,47	12,39	26,12	**5%**	**7%**	1.237	2.584	**7%**
Abwärmenutzung Hochofenschlacke	0,03	0,11	1,41	5,44			141	540	
Gichtgasrückführung	0,04	0,13	2,39	7,40			239	732	
Maßnahmenpaket	-	-	1,55	2,40			150	233	
Optimierung des Hüttengasverbundes	0,14	0,22	7,04	10,88			706	1.080	
Sintern	0,10	0,18	1,93	3,45	**7%**	**8%**	204	355	**7%**
Gas Rezirkulation	0,10	0,18	1,93	3,45			204	355	
Walzstahl	1,62	6,73	5,46	23,56	**34%**	**44%**	801	3.018	**35%**
Abwärmenutzung an Walzwerksöfen	0,40	2,24	1,82	10,10			244	1.223	
Endabmessungsnahes Gießen	1,21	4,49	3,64	13,46			557	1.794	

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 4.1 bis 4.3 genannten Datenquellen und Annahmen

4.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren

Zur Einordnung der branchenspezifischen Hemmnisse muss erwähnt werden, dass alle Befragten, sowohl seitens des Verbandes als auch der Industrie, die Metallerzeugung als bereits sehr effizient einstufen. Weitere Effizienzpotenziale werden in einer Größenordnung von 5 bis maximal 10 % vermutet, wobei man hier zumeist den aktuellen Technologiestand zu Grunde legt. Für den energieintensivsten Schritt, also die Reduktion von Eisenerz zu Eisen, die derzeit im Hochofen stattfindet, wird kurzfristig kein radikal energieeffizienteres Verfahren erwartet.

Als branchenspezifische Hemmnisse wurden folgende identifiziert.

Die Metallerzeugung im Integrierten Hüttenwerk findet in einem historisch gewachsenen, optimierten und eng verzahnten Energie- und Stoffnetz statt. Neuerungen erfordern damit fast immer eine erneute Optimierung des Gesamtsystems. Vor diesem Hintergrund stellt z. B. der sog. Heißeinsatz logistische Schwierigkeiten dar. Üblicherweise werden die Brammen aus der Strangussanlage erkaltet und vor dem Einsatz im Walzwerk wieder erwärmt. Der Einsatz heißer Brammen würde eine Effizienzmaßnahme darstellen, die aber aufgrund der Abläufe und räumlichen Anordnung der Anlagen im Integrierten Hüttenwerk eine neue Gesamtoptimierung erfordert.

In der Eisen- und Stahlerzeugung gibt es ungenutzte Effizienzpotenziale, die derzeit aufgrund der technologischen Reife einzelner Technologien nicht genutzt werden können. So liegt z. B. der Energieinhalt der Hochofenschlacke bei ca. 0,5 GJ je Tonne

Roheisen (bei einer Produktion von 30 Mio. t Roheisen pro Jahr in Deutschland ergibt sich ein Potenzial von 15 PJ pro Jahr). Derzeit gibt es keine verfügbare Technologie, mit der man die in der Hochofenschlacke gespeicherte Energie zurückgewinnen könnte. Ähnliches gilt für die Abwärmenutzung am Elektrolichtbogenofen, wobei die Entwicklungen hier bereits weiter fortgeschritten sind. Die Bildung branchenübergreifender Energieverbünde, beispielsweise zwischen der Chemie- und der Eisen- und Stahlindustrie, befinden sich am Anfang der Entwicklung.

Als ein Hemmnis für die Verbreitung von Abwärmenutzungstechnologien an Sinter- und Pelletieranlagen sind zum Teil ordnungsrechtliche Bestimmungen zu sehen. An Sinteranlagen kann beispielsweise die Sinterabwärme rezirkuliert werden, sodass die Abwärme genutzt wird. Dabei wird die Abgasmenge reduziert, was bei gleichbleibender Schadstoffmenge zu einer Erhöhung der Schadstoffkonzentration führt. Die Genehmigungen für diese Anlagen würden aber in Abhängigkeit der Schadstoffkonzentration erteilt. Hier müssten ggf. dann auch Maßnahmen zur weitergehenden Reduzierung der Schadstofflasten parallel zur Reduzierung der Volumina erfolgen.

Ein niedriger Energiepreis wird von fast allen Befragten als Hemmnis zur Steigerung Energieeffizienz gewertet, vor allem wenn es die Implementierung von Abwärmenutzungstechnologien betrifft. Gerade in der Eisen- und Stahlindustrie wird bei derart hohen Temperaturen gearbeitet, wie in keiner anderen Branche. Entsprechend groß ist der Anteil an Abwärme. Aktuell sind verschiedene Abwärmenutzungstechnologien verfügbar, die z. B. Abwärme in Dampf umwandeln, deren Kosten aber nicht mit dem Erdgaspreis konkurrieren können. Ähnliches gilt für die Verstromung von Abwärme. Auch hier wird derzeit keine Wirtschaftlichkeit gesehen.

Das europäische Forschungsprojekt Ulcos (Ultra Low CO_2 Steelmaking) wurde von einigen wenigen Befragten als zu einseitig ausgerichtet gewertet, da es zum einen die technologischen Entwicklung auf CCS ausrichtet, das für die energieintensiven Industrien noch nicht als gesetzt angesehen werden kann. Somit würden andere technologische Entwicklungen in den Hintergrund gedrängt. Zum anderen veranschlagt es Zeithorizonte, die zum Teil deutlich schneller erreicht werden könnten. Hier wurde als Beispiel das Direktreduktionsverfahren genannt, welches im Rahmen von Ulcos entwickelt wird. Der Entwicklungsstand verschiedener anderer Direktreduktionsverfahren sei bereits deutlich weiter fortgeschritten.

Der Bilanzierungsrahmen des Europäischen Emissionshandels, der zwischen direkten und indirekten Emissionen unterscheidet, führt u.U. bei den Stahlherstellern zu höher veranschlagten indirekten Emissionen durch Verlagerungseffekte. Am Beispiel des direkten Einsatzes von Primärenergie zum Schrotteinschmelzen (PEM-Verfahren) wird

deutlich, dass über die gesamte Prozesskette vom Kraftwerk (Wirkungsgrad des Kraftwerkes <40 %) bis zum Einsatz am Elektrolichtbogenofen durch die Vermeidung von Verlusten weniger Primärenergie eingesetzt werden muss. Damit werden die CO_2-Emissionen deutlich reduziert. Jedoch muss der Betreiber aus heutiger Sicht CO_2-Zertifikate zukaufen, da er durch den direkten Einsatz von Primärenergie mehr CO_2 im Stahlwerk emittiert als vorher. Die CO_2-Einsparung (die ja nur anteilig an den Energiepreis gekoppelt ist) könnte das Kraftwerk nutzen, um an der Börse Zertifikate zu verkaufen. Aus Sicht des Betreibers macht der Vorgang für ihn keinen Sinn, da der eingesparte Strompreis für den Einschmelzvorgang durch den zusätzlichen Einsatz von Erdgas und Sauerstoff kompensiert wird und er gleichzeitig höhere Aufwendungen für CO_2-Zertifikate hat. Diese einfache Sichtweise der industriellen Akteure berücksichtigt jedoch nicht, dass auch Strom mit dem CO_2-Preis belastet ist, der dann auf den Kunden von den Stromversorgern übergewälzt wird. Insofern wird der industrielle Kunde auch bei Substitution von fossilen Energieträgern mit Strom belastet.

4.6 Branchenspezifische politische Instrumente

4.6.1 Bestehende Instrumente

4.6.1.1 Ökosteuer

Die erste Stufe der ökologischen Steuerreform wurde 1999 eingeführt, die u. a. als ein umweltpolitisches Lenkungsinstrument wirken sollte. Aufgrund politischer Widerstände wurden die energieintensiven Industrien weitgehend durch Steuervergünstigungen bei Heizstoffen und Strom von der Ökosteuer ausgenommen. Ein spürbarer Anpassungsdruck aufgrund der Ökosteuer besteht daher für die Eisen- und Stahlindustrie nicht.

Nach Berechnungen des DIW (Bach 2009) hat die Branche Metallerzeugung und –bearbeitung (WZ 93 Nr. 27) im Jahr 2003 ein Steuermehraufkommen von 132 Mio. €. Durch Entlastungen im Sozialversicherungsbereich in Höhe von 74 Mio. € ergibt sich eine Nettobelastung von 58 Mio. € für diese Branche. Dies entspricht 0,09 % der Bruttoproduktion und ist somit als gering einzustufen (Bach 2009). Aufgrund der Steuervergünstigungen liegen die Steuerbelastungen durch die Ökosteuer in den energieintensiven Industrien deutlich unter denen des Dienstleistungssektors und der privaten Haushalte. Die durch die Ökosteuer induzierten Anreize Energie einzusparen, fallen somit in der Eisen- und Stahlindustrie gering aus. Durch die Energiesteuerreform von 2006 als auch durch die allgemeinen Steuerermäßigungen für das Produzierende Gewerbe werden die energieintensiven Prozesse kaum belastet. Unter Anreizgesichtspunkten sind diese Steuervergünstigungen als ungünstig zu bewerten (Bach 2009).

4.6.1.2 Selbstverpflichtung

Im Rahmen der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge vom 09.11.2000 hat sich die deutsche Wirtschaft dazu verpflichtet die spezifischen CO_2-Emissionen bis 2012 um 28 % gegenüber 1990 zu verringern. Für die Eisen- und Stahlindustrie bedeutet dies eine Verringerung der spezifischen CO_2-Emissionen bis 2012 um 22 % gegenüber 1990. Im Gegenzug hat die Bundesregierung zugesagt bei Erfüllung der Vereinbarung auf ordnungsrechtliche Maßnahmen zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele sowie auf verbindliche Energieaudits zu verzichten. Unberührt davon bliebe die Umsetzung von EU-Recht (Deutsche Wirtschaft 2000).

Aufgrund der Prozessstruktur in der Eisen- und Stahlindustrie, die sich zum einen in die Stahlherstellung über den Hochofen und zum anderen über den Elektrolichtbogen aufteilt, kann man davon ausgehen, dass die Reduzierung der spezifischen CO_2-Emissionen im betrachteten Zeitraum zum großen Teil auf die anteilsmäßige Zunahme der Elektrostahlproduktion zurückzuführen ist. Die Reduzierung der spezifischen CO_2-Emissionen ist somit zunächst nicht im Wesentlichen durch Effizienzverbesserungen der einzelnen Prozesse zu erklären.

4.6.2 Weitere Empfehlungen zu Instrumenten

Zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Reduzierung der CO_2-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie werden verschiedene Empfehlungen gegeben.

Große Effizienzpotenziale liegen im Bereich der Abwärmenutzung. Wie die Untersuchungen jedoch zeigten, scheitert deren Nutzung zumeist an der Wirtschaftlichkeit. Daher ist die Zurücknahme der Aufhebung der Ausnahme energieintensiver Industrien von der Ökosteuer im Oktober 2010 als ungünstig zu werten. Derzeit beträgt die Belastung durch die Ökosteuer für die energieintensiven Industrien in Deutschland etwa 5 % von der eigentlichen Steuer. Im Rahmen des Sparpakets der Bundesregierung wurde eine Erhöhung auf 20 % beschlossen, die dann im Oktober 2010 wieder zurückgenommen wurde. Damit werden nach Auffassung des Projektteams falsche Signale gesetzt. Die Zurücknahme hätte über dem vorigen Satz der Ökosteuerbelastung liegen müssen. Es wird daher empfohlen, die Ökosteuer-Belastung für die energieintensiven Industrien in einem ersten Schritt auf 8 bis 10 % zu erhöhen.

In Japan sind nahezu alle Kokereien mit der Effizienztechnologie Kokstrockenkühlung ausgestattet; in China nimmt die Verbreitung stetig zu. Gründe hierfür liegen neben höheren Energiepreisen (Japan) auch in der Einforderung von staatlicher Seite (China). In Deutschland ist keine der aktuellen Kokereien mit Kokstrockenkühlung ausge-

stattet. Darüber hinaus wurden Pläne für eine Kokstrockenkühlung in der Kokerei Schwelgern im Jahr 2000 wieder zurückgenommen. Es wird daher empfohlen, zu prüfen, ob bei Neubau oder wesentlichen Umbauarbeiten von Kokereien bei gegebener Wirtschaftlichkeit der Einbau einer Kokstrockenkühlung von staatlicher Seite eingefordert werden kann.

Ein weiteres mögliches Instrument ist die Schärfung der Kommunikation zur Darstellung von Effizienzverbesserungen. Bisher veröffentlicht der Verband jährlich die Entwicklung des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen je Tonne Rohstahl und je Tonne Walzstahl. Hier handelt es sich um die Zusammenfassung zweier energetisch unterschiedlich zu bewertender Verfahren. Daher wird empfohlen, die jährliche Veröffentlichung in weitere Produkte zu untergliedern. Empfohlen wird die jährliche Veröffentlichung des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen je Tonne Roheisen, je Tonne Oxygenstahl, je Tonne Elektrostahl, je Tonne Walzstahl, je Tonne Koks und je Tonne Sinter bei Angabe der Systemgrenzen und der Annahmen, die zur Berechnung erforderlich sind.

Eine radikale Reduzierung des Energieverbrauchs in der Eisen- und Stahlindustrie ist in den nächsten Jahrzehnten nicht zu erwarten. Die Frage, ob eine radikale Reduzierung der CO_2-Emissionen der Eisen- und Stahlindustrie durch die CCS-Technologie möglich und sinnvoll ist, ist noch nicht beantwortet. Zudem würde sie auch nicht zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs führen, sondern lediglich die CO_2-Emissionen in die Atmosphäre verringern. Es wird daher empfohlen, die Effizienz- und CO_2-Reduktionsziele zweigleisig zu verfolgen. Zum einen sollte geprüft werden, inwiefern CCS zur Erreichung der Klimaschutzziele für die Eisen- und Stahlindustrie eine sinnvolle Option ist. Zum anderen sollte den Erfolgen der schrittweisen Effizienzverbesserung weiterhin ausreichend Bedeutung und Förderung zugemessen werden.

Eine Option CO_2-frei Stahl aus dem Rohstoff Eisenerz zu erzeugen, bietet die Direktreduktion auf Wasserstoffbasis mit einem nachgeschalteten Elektrolichtbogenofen, der mit CO_2-frei erzeugtem Strom betrieben wird. Sowohl die Direktreduktionstechnologie als auch der Elektrolichtbogenofen sind Stand der Technik. Kritisch ist die Bereitstellung von CO_2-frei erzeugtem Wasserstoff. Es wird empfohlen, eine Pilotanlage zu bauen, die regenerativ Wasserstoff erzeugt, der dann in die Direktreduktionsanlage gespeist wird und anschließend im Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl verarbeitet wird.

4.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland hat seit den 1950er Jahren den Reduktionsmittelverbrauch je Tonne Roheisen um über 60 % verringert. Einen großen Anteil an der Energieeffizienz hat die Betriebsführung des Hochofens, der etwa 80 bis 90 % des Energiebedarfs der gesamten Branche verbraucht. Drastische Effizienzverbesserungen, die zu einer Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs je Tonne Stahl von über 10 % führen würden, sind mit aktuell eingesetzten und besten verfügbaren Technologien nicht absehbar.

Der Verband der Eisen- und Stahlindustrie VDEh (Verband deutscher Eisenhüttenleute) hat sich im Rahmen der Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft aus dem Jahr 2000 dazu verpflichtet die spezifischen CO_2-Emissionen bis 2012 um 21 % gegenüber 1990 zu senken. Zudem veröffentlicht der Verband Zahlen, nachdem der spezifische Energieverbrauch je Tonne Rohstahl im ähnlichen Maße sinkt. Diese Darstellung lässt auf eine Steigerung der Energieeffizienz der verschiedenen Prozesse und Technologien schließen. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich aber um die Zusammenfassung zweier unterschiedlicher Verfahren, die energetisch nicht vergleichbar sind. Diese beiden Verfahren sind die Hochofenroute und der Elektrolichtbogenofen. Bei der Hochofenroute wird aus dem Rohstoff Eisenerz zunächst Roheisen und im anschließenden Konverter Rohstahl erzeugt. Die Reduzierung des Eisenerzes zu Eisen ist der energieintensivste Schritt in der Eisen- und Stahlindustrie, was zudem dadurch zum Ausdruck kommt, dass der Hochofen etwa 80 bis 90 % der Energie der gesamten Branche verbraucht. Im Elektrolichtbogenofen hingegen wird Stahlschrott eingeschmolzen und zu neuem Stahl recycelt. Der Energieaufwand für diesen Prozess liegt etwa bei einem Viertel des Hochofenprozesses. Der Einsatz des Elektrolichtbogenofens hängt von der Verfügbarkeit von Stahlschrott ab. Auch wenn mit diesem Verfahren nicht alle Stahlqualitäten erzielt werden können, so kann man doch davon ausgehen, dass ein weitestgehender Anteil des geeigneten und verfügbaren Stahlschrotts recycelt wird. Triebkräfte für den Einsatz des Elektrolichtbogenofens sind also weniger im Bereich der Energieeffizienz zu sehen, als in wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Fasst man den spezifischen Energieverbrauch von beiden Verfahren zusammen, so reduziert sich dieser bei einer Erhöhung des Anteils des Elektrolichtbogenofens. Anhand der vom Verband veröffentlichten Zahlen kann man davon ausgehen, dass die Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs in großen Teilen auf die anteilsmäßige Erhöhung des Elektrolichtbogenofens an der gesamten Stahlproduktion zurückzuführen ist und nachrangig aufgrund von Effizienzverbesserungen in den einzelnen Verfahren.

Zusammenfassend lassen die Untersuchungen darauf schließen, dass weitere Effizienzpotenziale weniger im Bereich der Reduzierung des Energieeinsatzes zu suchen sind, als in der besseren Ausnutzung der eingesetzten Energie, wie z. B. Abwärmenutzung an Sinteranlagen, an Kokereien (Kokstrockenkühlung), an Öfen oder übergreifende Energieverbünde. Zudem bieten Prozessverkürzungen, wie z. B. endabmessungsnahes Gießen und eventuell die Schmelzreduktion weitere Einsparpotenziale. Bei der Ausschöpfung dieses theoretischen Potenzials sind langfristig weitere signifikante Einsparungen möglich.

Die Eisen- und Stahlindustrie steht im Spannungsfeld des internationalen Wettbewerbs und der Industrie- und Umweltpolitik auf nationaler und europäischer Ebene. Hier sind vor allem die in Deutschland erhobene Ökosteuer und der Europäische Emissionshandel zu nennen. Obwohl Unternehmen der Stahlindustrie noch weitgehend kostenlose Allokation erhalten (ab 2013 über Benchmarks), können beide Instrumente zunehmend Kostenfaktoren für die Eisen- und Stahlindustrie bedeuten. Jedoch werden die Energieträger für die Industrie subventioniert. Aus der Sicht der Verbesserung der Energieeffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie ergibt sich aus diesem Konstrukt ein Dilemma: Auf der einen Seite werden die Energiepreise für die Eisen- und Stahlindustrie (derzeit) von staatlicher Seite gering gehalten (Befreiung von der Ökosteuer, Subventionierung von Energieträgern). Auf der anderen Seite wertet der Verband die langen Kapitalrücklaufzeiten als Hemmnis für die Diffusion von Effizienztechnologien (z. B. Kokstrockenkühlung). Hier würden klare und langfristige Regelungen von staatlicher Seite Abhilfe schaffen können.

4.8 Literatur

Ameling, D. (2007): Die Stahlindustrie und das Kyoto-Protokoll. Fachtagung Kokereitechnik Essen

Aichinger, H. M.; Steffen, R. (2006): Maßnahmen zur CO_2-Minderung bei der Stahlerzeugung. Chemie Ingenieur Technik 27, Nr. 4

Bach, S. (2009): Zehn Jahre ökologische Steuerreform: Finanzpolitisch erfolgreich, klimapolitisch halbherzig. Wochenbericht des DIW Berlin Nr. 14/2009

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2009): Gabriel fördert umweltgerechte Modernisierung des Stahlwerks Eisenhüttenstadt mit 30 Mio. Euro. Pressemitteilung Nr. 248/09, Berlin

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2010): Energieeinsparungen durch Bandgießen von Leichtbaustahl. April 2010, http://www.bmu.de/foerderprogramme/pilotprojekte_inland/doc/45940.php (19.10.2010)

Brauer, Heinz (Hrsg.) (1996): Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik, Bd. 2)

Degner, M.; Fandrich, R.; Endemann, G., et. al (2007): Stahlfibel. Verlag Stahleisen Düsseldorf

Deutsche Wirtschaft (2000): Vereinbarung zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge. 9.11.2000, Berlin

Ecofys; Fraunhofer ISI; Öko-Institut (2009): Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. By order of the European Commission

EurActiv (2010): EU CO_2 emissions fell by 11 % in 2009. Pressemitteilung 2.4.2010, www.euractiv.com

Grant, M. G. K.; Januard, F.; Joumani, Y.; Labegorre, B.; Laurent, J. (2012): Combined Burner and Lance Apparatus for Electric Arc Furnaces. Patent application number: 20100282021, http://www.faqs.org/patents/app/20100282021 (24.4.2012)

Innovationsreport (2011): Siemens receives third Finex order from Posco. 26.9.2011. http://www.innovations-report.de/html/berichte/unternehmensmeldung/bericht-182706.html (1.5.2012)

International Energy Agency (IEA) (2006): Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050.

International Iron and Steel Institute (IISI) (1998): Energy Use in the Steel Industry. Committee on Technology. Brussels

Kirschen, M.; Badr, K.; Cappel, J.; Drescher, A. (2009): A cost-effective method to reduce energy consumption and CO_2 emissions in steelmaking. Stahl und Eisen 129 (2009) Nr. 9. S. 20-29

Luiten, E. (2001): Beyond Energy Efficiency. Actors, networks and government intervention in the development of industrial process technologies. Dissertation, Universität Utrecht

Midrex (2011): World Direct Reduction Statistics.

Opfermann, A.; Grosse, A.; Baumgartner, S.; Riedinger, D. (2009): Improvement of energy efficiency. Stahl und Eisen 129, Nr. 9. S. 30-37

Sakamato, T. (2005): Case Study of Technology Transfer between Japan and China in iron/steel industry. http://www.resourcesaver.com/file/toolmanager/O105UF1311.pdf (12.10.2010)

Schlichting, M.; Ondrovic, J.; Woodberry, P.; Michael, D. (2009): Energy and environmental advantages with the Castrip Process. Stahl und Eisen 129, Nr. 9, S. 44-51

Scholz, R. (2004): Stoffliche Nutzung von Kohlenstoff im Hochofenprozess. Gutachten im Auftrag des Stahlinstituts VDEh, Clausthal-Zellerfeld, 2.1.2004

Siemens VAI (2009): Weltpremiere: Start der industriellen Endlosband-Produktion auf der Arvedi ESP-Anlage. Pressemitteilung. Linz, Österreich, 12.8.2009. http://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/?press=/de/pressemitteilungen/2009/industry_solutions/iis200908458.htm (18.10.2010)

Siemens VAI (2011): SIMETAL Corex technology. The profitable and environmentally friendly direct smelting reduction process. Siemens VAI, Austria

Sparlinek, W. (2010): Expertengespräch am 12.10.2010

Stahlzentrum (2010). www.stahl-online.de, Aufruf der Seite am 6.4.2010

Statistisches Bundesamt (2010): Brennstoff-, Gas- und Stromwirtschaft der Hochofen-, Stahl- und Walzwerke sowie Schmiede-, Press- und Hammerwerke einschließlich der örtlich verbunden sonstigen Betriebe (ohne Kokerei) für die Jahre 2003-2008. Wiesbaden

Tanaka, K. (2008): Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. Energy Policy 36, pp. 2887-2902

UBA Workshop (2010): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen von industriellen Branchentechnologien. Frankfurt am Main, 15. Juni 2010

Ulcos (2009): www.ulcos.org, Aufruf der Seite am 18.10.2009

VDEh (2008): 7. CO_2-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland.

VDEh (2007): Stahl-Fibel. Verlag Stahleisen

Wietschel, W.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Markewitz, P.; Möst, D.; Scheufen, M. (2010): Energietechnologien 2050. Technologiebericht. Fraunhofer Verlag Stuttgart

Wirtschaftsvereinigung Stahl; Stahlinstitut VDEh (2009): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2009/2010. Verlag Stahleisen GmbH Düsseldorf, 2009

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (2009): Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial. Wupppertal, Juni 2009

Zuliani, D.-J.; Scipolo, V.; Born, C. (2009): Opportunities to reduce costs and lower GHG emissions in EAF and BOF steelmaking. Stahl und Eisen 129, Nr. 9. S. 10-18

5 Nichteisenmetall-Industrie

C. Rohde, F. Cebulla (Fraunhofer ISI)

5.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse

5.1.1 Branchenbeschreibung

Zu den Nichteisenmetallen (NE-Metalle) zählen u. a. Aluminium, Kupfer, Zink, Blei und Edelmetalle, wobei die Produktion von Aluminium, Kupfer und Zink unter den mengenmäßig bedeutenden NE-Metallen die energieintensivsten sind.

Sowohl die Produktion als auch die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Primärproduktion von Aluminium wurden in den letzten Jahren zunehmend ins Ausland verlagert, während beim Kupfer das Produktionsniveau gehalten und in modernisierte Anlagen investiert wurde. Allerdings können die derzeit existierenden Aluminiumelektrolysen noch über weite Strecken profitabel betrieben werden, da es sich entweder um abgeschriebene Anlagen handelt, oder durch lokale Prozessintegration Flexibilität für die Weiterverarbeitung durch kurze Transportwege ermöglicht wird. In Deutschland sind zurzeit noch eine Primärkupfer- und drei Primäraluminiumhütten in Betrieb. Aufgrund des hohen Anteils der Stromkosten für die Elektrolyse an den gesamten Produktionskosten hat die Aluminiumindustrie selbst ein großes Interesse an der Senkung des Stromverbrauchs. Daher wurde von unternehmerischer Seite bereits in bedeutendem Umfang in die Forschung und Entwicklung von Maßnahmen der Energieeffizienz investiert.

Aluminium ist ein relativ neuer Werkstoff, dessen Verbrauch insbesondere seit den 1970er Jahren zugenommen hat. Die Herstellung von Aluminium ist sehr energieintensiv. 40 % der Herstellungskosten entfällt auf den Energieverbrauch (Jochem, Schön 2004). Daher wird die Produktion von Hüttenaluminium häufig in Standortnähe zu Wasserkraft- und Kernkraftwerken betrieben. Aufgrund des europäischen Binnenmarktes für Strom ist eine direkte Zuordnung zu den einzelnen Erzeugungsarten in der Regel nicht möglich. . Ein weiterer Zubau von Kapazitäten für die Aluminiumproduktion in Deutschland ist aufgrund der Energieversorgungsstruktur nicht wahrscheinlich.

In Deutschland wird seit den 1970er Jahren kein Bauxit mehr abgebaut; für die Produktion von Primäraluminium muss es importiert werden. Weiterhin decken weder die Produktion von Tonerde in Deutschland noch die Produktion von Aluminium den landeseigenen Bedarf. Sowohl Rohstoffe, als auch Vorstoffe und Aluminium selbst werden in Deutschland netto importiert.

Aluminium wird zu großen Teilen im Transportsektor und hier vor allem im Automobilsektor verwendet. Weitere Abnehmer sind das Bauwesen, der Maschinenbau und der Verpackungssektor.

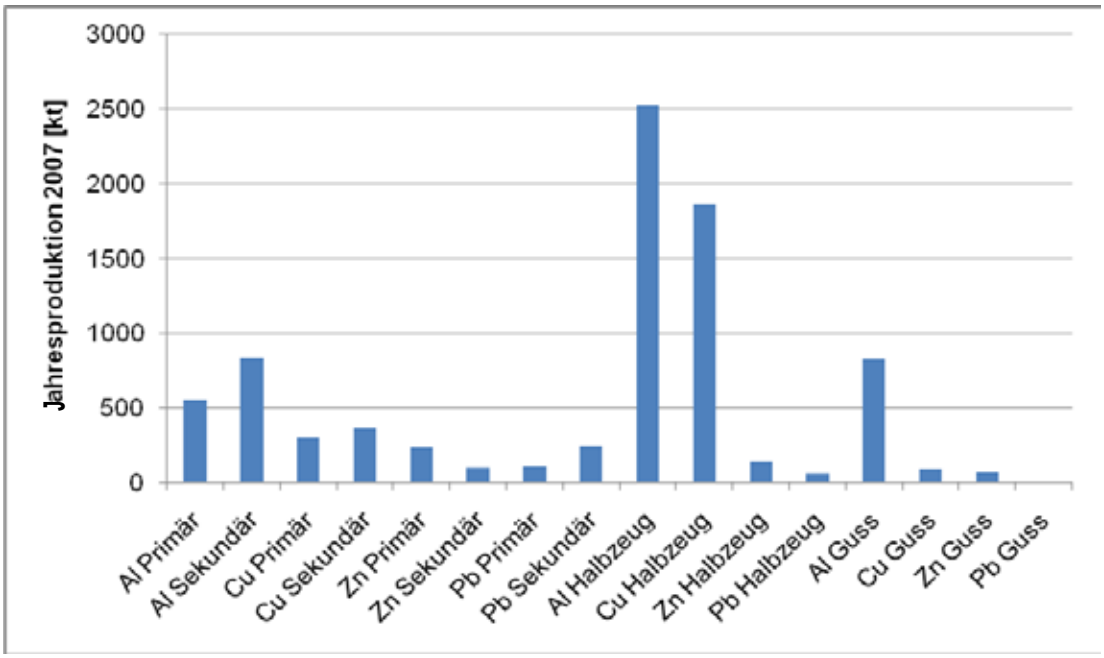
Tabelle 5-1 zeigt die Produktion von NE-Metallen in Deutschland im Jahr 2007. Abbildung 5-1 fächert die Produktion nach Primär- und Sekundärerzeugung auf, sowie die erste Verarbeitungsstufe (Halbzeugwerke) und den NE-Metallguss. Abbildung 5-2 zeigt die Entwicklung der Produktion des energieintensivsten NE-Metalls Aluminium aufgegliedert nach Primär-(Hütten-) und Sekundär-Aluminium in Deutschland im zeitlichen Verlauf.

Tabelle 5-1: Produktion der mengenmäßig wichtigsten NE-Metalle in Deutschland, 2007

	Produktion in 1.000 Tonnen
Primäraluminium	551
Sekundäraluminium	836
Kupfer	666
Zink	335
Blei	355

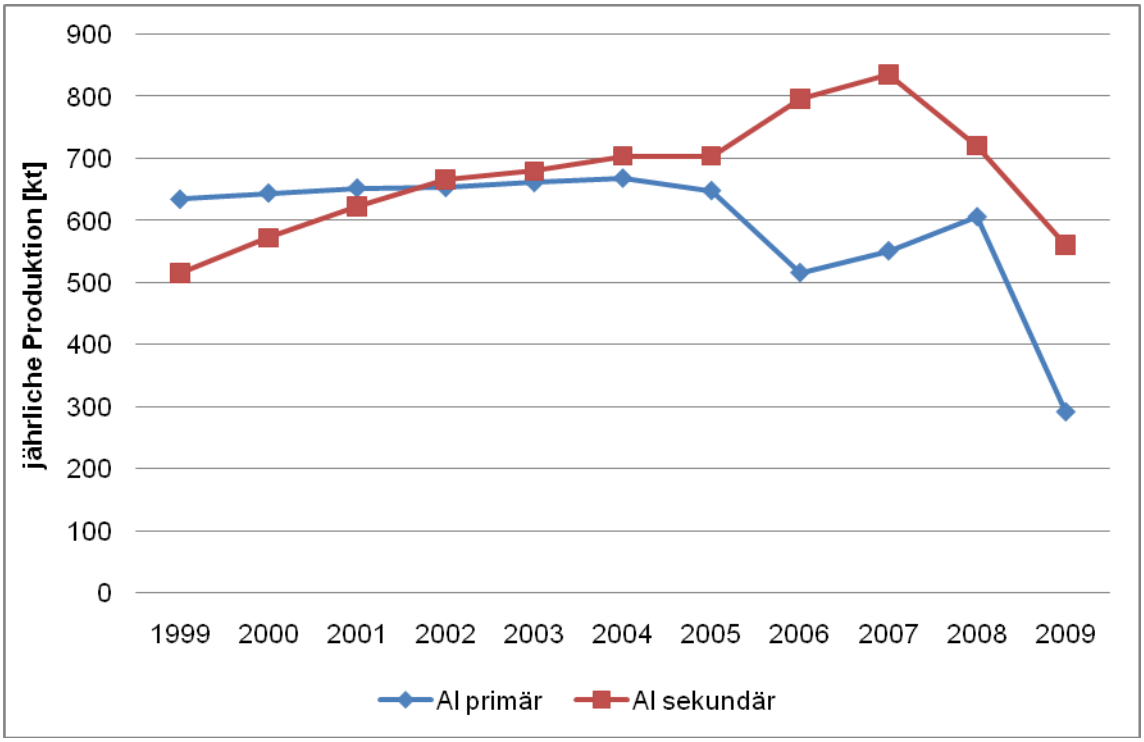
Quelle: WVM 2009

Abbildung 5-1: Produktion von primären und sekundären NE-Metallen sowie Produkten der ersten Verarbeitungsstufe und NE-Metallguss, 2007



Quelle: WVM 2009

Abbildung 5-2: Produktion von Hütten- und Sekundäraluminium (in t) in Deutschland



Quelle: World Bureau of Metal Statistics 2009

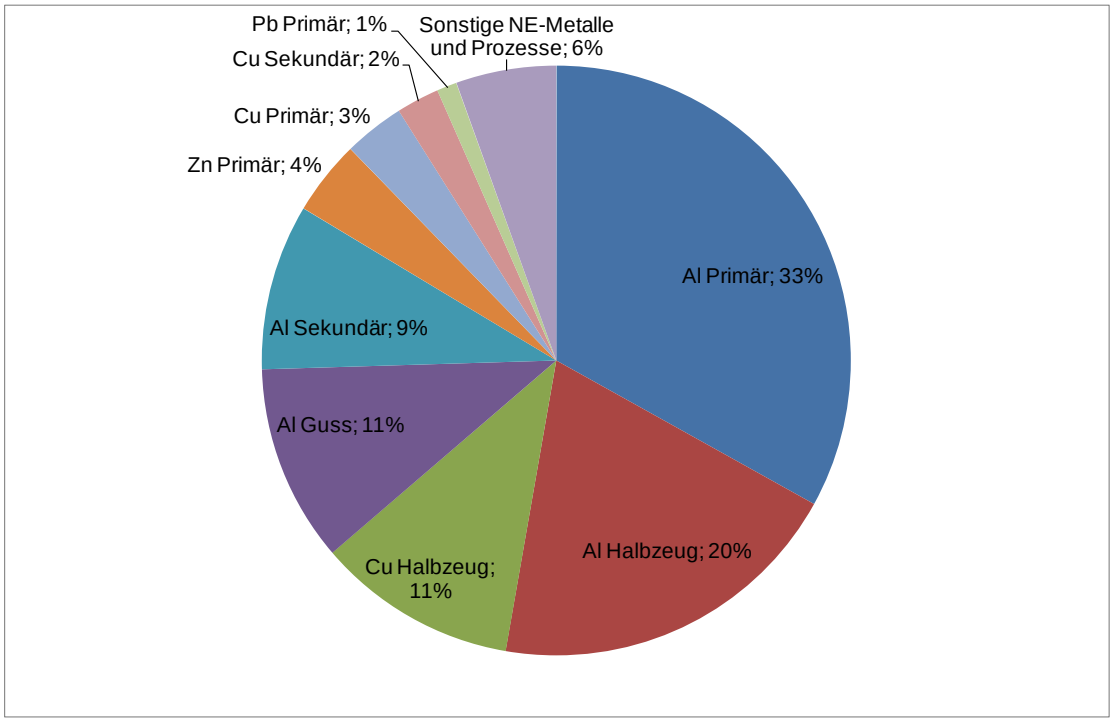
5.1.2 Auswahl der Prozesse

Im Rahmen dieses Vorhabens werden folgende Prozesse untersucht:

- Erzeugung von Primäraluminium
- Produktion von Sekundäraluminium
- Kupfer
- Zink
- Nachgelagerte Prozesse: erste Verarbeitungsstufe der NE-Metalle (Aluminium- und Kupferhalbzeuge) sowie NE-Metallguss (Aluminiumguss).

Die Auswahl dieser Prozesse beruht auf ihrem Anteil am gesamten Energieeinsatz der NE-Metallbranche (definiert als 27.4 + 27.53/27.54 nach der NACE Rev1/WZ2003 bzw. als 24.4 + 24.53/24.54 nach der NACE Rev2/WZ2008, siehe hierzu auch Abschnitt 5.2.11). Hieraus ergibt sich, dass mit der Summe der 15 Produktgruppen knapp 98 % des Energieeinsatzes der Branche erklärt wird, und dass mit den ersten neun Prozessen bereits knapp 95 % abgebildet werden (Abbildung 5-3).

Abbildung 5-3: Prozentualer Anteil des (End-)Energieeinsatzes für einzelne Produktgruppen der NE-Metallbranche (einschließlich erster Weiterverarbeitung und NE-Gießereien) 2007



Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Destatis 2008, WVM 2008, AG Energiebilanz

5.2 Analyse der Prozesse

5.2.1 Primäraluminium

Gewinnung von Bauxit: Der Abbau von Bauxit findet fast ausschließlich im Tagebau statt. Bauxitfördernde Länder sind Brasilien, Jamaica, Australien und Guinea. In Deutschland wird seit 1976 kein Bauxit mehr abgebaut. Trotz der Tatsache, dass Förderstätten und Weiterverarbeitungsbetriebe geographisch of sehr weit auseinander liegen, ist der Anteil des Transports und des bergbaulichen Prozesses als vergleichsweise gering einzustufen. (Krone 2000) beziffert den endenergetischen Anteil mit rund 10 GJ/t (18 %), (Quinkertz 2002) gar nur mit 2,5 %.

Vorbereitung der Hilfstoffe: Zur Herstellung von Aluminiumoxid, dem Ausgangstoff für Aluminium, werden Branntkalk und Natronlauge benötigt. Branntkalk wiederum wird aus Kalkstein im Bergbau gebrochen, anschließend getrocknet und gemahlen. In einem Drehrohofen wird der Kalk zu Branntkalk gebrannt. Für die Herstellung von einer Tonne Kalk werden etwa 1,9 Tonnen Kalkstein benötigt, da im Verlauf der Herstellung Kohlendioxid und Wasser ausgetrieben werden. Natronlauge wird meistens aus Natri-

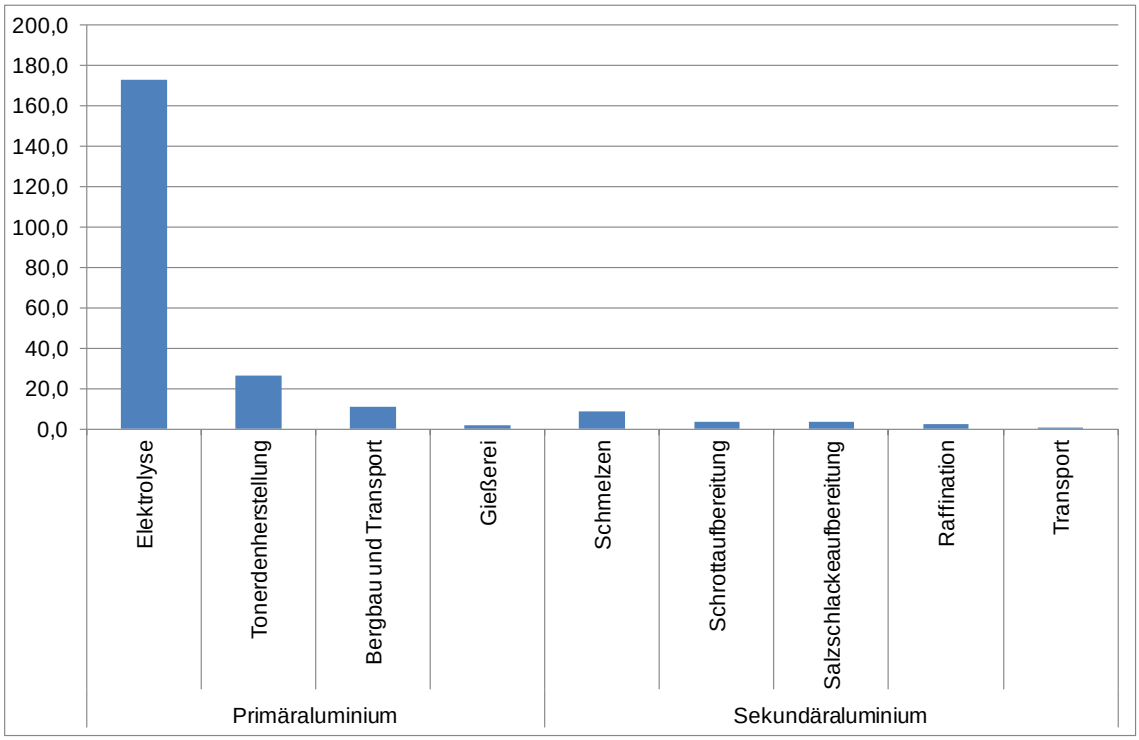
umchlorid (Steinsalz) hergestellt. Je Tonne Natronlauge (50%ig) werden etwa 300 kg Steinsalz benötigt.

Gewinnung von Tonerde: Zur Herstellung von einer Tonne Tonerde (Aluminiumoxid) werden etwa 2,1 Tonnen Bauxit, 0,12 Tonnen Natronlauge und 0,082 Tonnen Kalk benötigt (Jochem, Schön 2004). Das Bauxiterz wir gewaschen, zermahlen und mit Natronlauge versetzt. Bei Temperaturen von bis zu 270 °C und Drücken von bis zu 40 bar wird diese Mischung in beheizbaren Druckbehältern (sog. Autoklaven) verrührt. Während dieses Prozesses löst sich das Aluminiumoxid in der Natronlauge unter Bildung von Natriumaluminat. Da das Bauxit sich nicht vollständig in der Natronlauge löst, bleibt ein sog. Rotschlamm übrig, der neben Bauxitrückständen auch Eisen- und Siliziumoxide und Wasser enthält. Während der Rotschlamm auf den Grund des Behälters sinkt und dort abgezogen wird, schwimmt die Natriumaluminatenlösung obenauf. Sie wird verdünnt und auf etwa 100 °C abgekühlt. In einem Rührbehälter wird Aluminiumhydroxid abgeschieden. In Drehrohröfen und in Wirbelschichtöfen wird es bei 1000 bis 1.300 °C kalziniert, wobei das chemische gebundene Wasser entfernt wird. Nach der Kalzination liegt fast reines Aluminiumoxid als weißes Pulver vor.

Schmelzflusselektrolyse: In der Schmelzflusselektrolyse wird aus dem Aluminiumoxid reines Aluminium hergestellt. Das weit verbreiteteste Verfahren ist das von Hall-Heroult in dem Aluminiumoxid (Tonerde) in eine Kryolithschmelze aufgetrennt wird. Je Tonne Aluminium werden etwas zwei Tonnen Tonerde benötigt. Kryolith wird benötigt, um die hohe Schmelztemperatur von Aluminiumoxid von 2.045 °C auf 950 °C herabzusetzen. Zwischen Anode und Kathode liegt eine Gleichspannung, wodurch sich Aluminium an der Kathode und Sauerstoff an der Anode sammelt. Durch die Reaktion von Sauerstoff mit der Kohlenstoffanode bildet sich CO_2, wobei die Anode verbraucht wird. Etwa 25 % der für Schmelzflusselektrolyse benötigten Energie wird durch den Verbrauch der Anoden bereits gedeckt.

Der Primärenergiebedarf für die Produktion von Hüttenaluminium beträgt etwa 212 GJ_{Prim}/t Aluminium (Jochem, Schön 2004), wobei etwa 82 % auf die Elektrolyse entfallen (siehe Abbildung 5-4). Seit den 1950er Jahren konnte der Stromverbrauch je Tonne Hüttenaluminium um 7.500 kWh auf 13.500 kWh (Direct Current DC) reduziert werden (Jochem, Schön 2004). Die Reduzierung des Strombedarfs wurde durch größere Zellen und höhere Stromstärken sowie durch Verbesserungen am Zellendesign, Badzusammensetzung und Einspeisesystem erreicht. Nach Untersuchungen zum Benchmarking im Rahmen der Zuteilung von CO_2-Zertifikaten erreichen die besten Anlagen in Europa heute 14.000 kWh_{el}/t (Alternating Current AC; entspricht etwa 13.000 kWh_{el}/t DC. Nach Gielen 2007 liegt der theoretische Minimalbedarf bei 6.400 kWh_{el}/Tonne Aluminium.

Abbildung 5-4: Primärenergieeinsatz zur Herstellung von Primäraluminium in GJ/t Aluminium (oben) und Primärenergieeinsatz zur Herstellung von Sekundäraluminium in GJ/t Aluminium (unten)



Quelle: Jochem, Schön 2004

5.2.2 Sekundäraluminium

Aufbereitung des Schrotts: Ausgangsbasis für die Erzeugung von Sekundäraluminium ist Aluminiumschrott. Zu unterscheiden sind bei der Aufbereitung Alt- und Neuschrotte. Neuschrotte sind Abfälle welche direkt in der Produktion anfallen und daher in ihrer Qualität klar definiert sind und in der Regel keine signifikanten Verschmutzungen aufweisen. Anders ist die Situation bei Altschrotten, die aus Entsorgungsprozessen stammen. Da diese meist in Verbindung mit anderen Stoffen vorkommen, muss der Aluminiumanteil aus dem Schrott gewonnen werden. In einem ersten Schritt wird daher der mit Aluminium behaftete Schrott zerkleinert (geschreddert) und anschließend werden die einzelnen Materialien in einer Sink-Schwimm-Aufbereitung von einander getrennt.

Schmelzen: Je nach der Qualität des Schrottes werden unterschiedliche Schmelzverfahren verwendet. Prinzipiell stehen drei Schmelzverfahren zur Verfügung (Jochem, Schön 2004): In salzbetriebenden (1) Drehtrommelöfen werden häufig Altschrotte mit hohen Verunreiniungsanteilen für die Herstellung von Gusslegierungen aufgeschmolzen. Salzlos betriebene (2) Herdöfen werden für die Herstellung von Knetlegierungen

bevorzugt. Vereinzelt werden in Gießereien (3) Induktionsöfen für fast oxidfreie Schrotte verwendet.

Aufbereitung der Salzschlacke: Der Verunreinungsgrad des Schrottes bestimmt die einzubringende Menge an Schmelzsalz. So fallen je nach Verunreinigungsgrad 300 bis 500 kg Salzschlacke je Tonne Aluminium an. Neben dem Salz enthält die Schlacke auch unlösliche Bestandteile wie Oxide und Chloride und geringe Anteile an Aluminium. Die Chloride der Schlacke sind wasserlöslich; und bei Kontakt mit Wasser kann es zur Bildung von teils explosiven Gasen kommen. Aufgrund ökologischer Bedenken wird in Deutschland die bei der Sekundäraluminiumproduktion anfallende Salzschlacke aufbereitet. In einer trockenen Aufbereitung wird das metallische Aluminium zurückgewonnen. In einer weiteren nassen Aufbereitung wird der verbleibende Teil der Schlacke gelaugt und so der Kaliumchlorid-Teil oder das gesamte Salz zurückgewonnen.

Der Primärenergiebedarf für die Herstellung einer Tonne Sekundäraluminium beträgt etwa 18 GJ/t Aluminium (Abbildung 5-4 unten). Davon entfallen etwa 47 % auf den Schmelzprozess und jeweils weitere 18 % auf die Schrottvorbereitung und Salzschlackeaufereitung sowie 6 % auf den Transport des Schrotts[49].

5.2.3 Gießen und Umformen

Neben der Herstellung von Primär- und Sekundärmetallen geht ein bedeutender Anteil des Energieverbrauchs auf die Weiterverarbeitung der Primärblöcke zurück. Um Formbarkeit zu erlangen, müssen die Primärblöcke in Walz- und Presswerken wieder erwärmt oder geschmolzen werden. Dies geschieht entweder in fossil befeuerten oder strombetriebenen Öfen. Der Energieverbrauch zwischen derzeitigen „Best practice"-Öfen und älteren Modellen, die sich noch häufig im Betrieb befinden, unterscheidet sich dabei erheblich. Auch völlig neue Verfahren, wie der Einsatz von Hochtemperatursupraleitung zur Anwendung in Magnetöfen (siehe auch 5.3.5.3), können in Zukunft noch eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs mit sich bringen, bis nah an die Grenze des theoretisch möglichen, welche über die spezifische Enthalpie der zu schmelzenden Metalle gegeben ist.

5.2.4 Aluminiumbearbeitung

Das Produkt der Schmelzflusselektrolyse ist flüssiges Hüttenaluminium mit einer Reinheit von etwa 99,5 bis 99,9 % Aluminium. Wenn nicht eine besondere Festigkeit gefor-

---

49 Statistisch gesehen sind Schlackeaufbereitung und Schrotttransport jedoch nicht Teil des Energieeinsatzes der NE-Metallbranche.

dert ist, kann dieses Reinaluminium direkt weiterverarbeitet werden. Durch Stranggusspressen kann es zu Folien oder Dünnband für die Verpackungsindustrie gewalzt werden. Durch die Zugabe von Legierungselementen können die Festigkeitseigenschaften von Aluminium verbessert werden. Man unterscheidet zwischen Guss- und Knetlegierungen. Bei Gusslegierungen stehen Formfüllungsvermögen und Vergießbarkeit im Vordergrund, bei Knetlegierungen die plastische Verformbarkeit. Aluminium findet weiterhin Verwendung in der Entwicklung neuer Materialien. Darunter zählen Aluminium-Verbundwerkstoffe, pulvermetallurgisch hergestellte dispersionshärtende Aluminiumwerkstoffe, Aluminium-Lithium-Legierungen sowie Schaumaluminium.

5.2.5 Primärkupfererzeugung aus sulfidischen Erzen

Für die Herstellung von einer Tonne Primärkupfer aus sulfidischen Erzen benötigt man etwa 100 GJ, wobei 70 GJ für Bergbau, Mahlung und Flotation, 20 GJ für Transport und Schmelzprozesse und 10 GJ für die Elektrolytische Reinigung aufgewendet werden (Winnacker Küchler 2006).

Etwa 80 % des Primärkupfers wird aus sulfidischen Erzen erzeugt (Winnacker Küchler 2006). Kupfererz wird am Ort des Abbaus gemahlen und über einen Floating-Prozess zu Kupferkonzentrat mit einem Kupferhalt von 25 bis 35 % angereichert. In zwei weiteren Anreicherungsstufen wird das Kupferkonzentrat zunächst bei 1.200 °C zu Kupferstein (63 bis 65 % Kupfergehalt) und anschließend in einem Konverter zu Blister (98 % Kupfergehalt) verarbeitet.

Der Raffinationsprozess, also die Umwandlung von Blister zu reinem Kupfer erfolgt über eine schmelzmetallurgische Raffination, eine elektrolytische Raffination und anschließendem Umschmelzen und Gießen.

Die erste Anreicherungsstufe kann nach zwei unterschiedlichen Prozessen erfolgen. Zum einen gibt es traditionelle Badschmelzverfahren. Das Konzentrat wird auf Röstöfen vorbehandelt, in dem ein Teil des im Konzentrat gebundenen Schwefels zu SO_2 oxidiert. Anschließend wird das heiße Röstgut mit Zuschlagstoffen (u. a. Sand) in die Flammöfen gegeben und dort aufgeschmolzen. Die beiden entstehenden Phasen, Eisensilicatschlacke und Kupferstein, mischen sich nicht; sie können getrennt abgestochen werden. Zum anderen gibt es autogene Schmelzverfahren, die Röst- und Schmelzprozess vereinen. Die Hälfte des weltweit erzeugten Primärkupfers wird nach diesem Verfahren (Qutokumpu-Prozess) gewonnen. Autogene Schmelzprozesse haben gegenüber Badschmelzverfahren einen geringeren Energieverbrauch.

Die zweite Anreicherungsstufe ist die Umwandlung von Kupferstein zu Blister im Konverter. Dieser Prozess teilt sich in zwei Unterprozesse auf. Zunächst erfolgt das Schlackeblasen, also die Oxidation des gebundenen Eisens und Schwefels zu Eisensilicat und SO_2. Aus Kupferstein wird Spurstein mit einem Kupfergehalt von 75 bis 77 %. Im zweiten Schritt erfolgt das Kupferblasen. Spurstein (CuS) wird zu Blisterkupfer mit einem Kupfergehalt von 98 bis 99 % und Schwelfeldioxid (SO2). Beide Reaktionen verlaufen exotherm. Der verbreiteteste Prozess ist der Peirce-Smith-Konverter, der etwa 80 % des weltweit erzeugten Kupfers liefert. Eine Weiterentwicklung dieses Konverters ist der sog. Hoboken-Konverter. Eine Neuentwicklung ist der Outokumpu-Ofen, auch Flash-Konverter genannt. Der Vorteil dieses Prozesses liegt in der Entkopplung von Schmelzaggregat und Konverter. Er verursacht nur relativ geringe Emissionen.

5.2.6 Primärkupfererzeugung aus oxidischen Erzen

Etwa 20 % der weltweiten Primärkupfererzeugung erfolgt aus oxidischen Erzen (Winnacker, Küchler 2006). Da sie zu den kupferarmen Erzen zählen, und daher nicht über Flotation angereichert werden können, werden sie einem Laugungsverfahren unterzogen. Die Laugungsverfahren befinden sich direkt an den Minen und können hochwertige Kupferkathoden zu relativ niedrigen Kosten herstellen.

5.2.7 Sekundärkupfererzeugung

Im Vergleich zur Primärkupfererzeugung aus sulfidischen Erzen wird für die Sekundärkupfererzeugung nur 10 bis 30 % des Energiebedarfs, also 10 bis 30 GJ/t Sekundärkupfer benötigt (Winnacker, Küchler 2006).

Seit dem Beginn seiner Erzeugung wird Kupfer auch durch Recycling zurückgewonnen. In Deutschland werden etwa 40 % des benötigten Kupfers durch Recycling gewonnen. Die eigentliche Recyclingquote liegt bei 80 %, wobei der limitierende Faktor nicht die Technologie sondern die Sammelquote ist. Erschwerend kommt hinzu, dass das Kupfer aus Verbundmaterialien zunächst extrahiert werden muss. Man unterscheidet folgende Gruppen: Kupferschrotte mit hoher Reinheit, Altkupfer mit einer Reinheit von über 90 %, Verbundmaterialien, Rückstände aus Galavanikschlämmen, Katalysatoren oder Stäuben. Je nach Schrottqualität erfolgt ein unterschiedliches Recycling.

Ein relativ neues Recyclingverfahren ist der kombinierte Schmelz- und Konverterprozess in einem speziellen Isa-Ofen (sog. KRS), in dem Galvanikschlämme, Katalysatoren, Stäube und andere Rückstände zu Schlacke und Schwarzkupfer aufgeschmolzen werden.

5.2.8 Kupferbearbeitung

Die Verarbeitung von Kupfer ist vielseitig: Gießen, Ziehen, Pressen, Stanzen. Zudem kann Kupfer gelötet und geschweißt werden. Haupteinsatzgebiete sind das Bauwesen (Rohre, Leitungen, Installationstechnik, Leitmaterial) sowie die Elektrotechnik (Leitmaterial).

Vorgeschaltet findet in der Regel ein Gussprozess statt. Je nach Anwendungszweck werden dabei verschiedene Gießverfahren eingesetzt, insbesondere Form- und Stranggussverfahren. Aufgrund seiner guten plastischen Verformbarkeit spielen spanlose Verfahren bei der Weiterverarbeitung eine Hauptrolle, besonders bei der mengenmäßig bedeutsamen Herstellung von Kabeln und Rohren. Kupfer wird häufig als Legierung mit hohen Anteilen anderer NE-Metalle (Zink, Nickel, Zinn) eingesetzt.

5.2.9 Primärzinkherstellung im Gebläseschachtofen

Hauptquelle für die Darstellung reinen Zinks sind sulfidische Erze. Diese müssen in einem ersten Bearbeitungsschritt oxidiert werden, als Nebenprodukt fällt dabei Schwefeldioxid an, dass zu Schwefelsäure weiterverarbeitet wird.

Das Zinkoxid kann anschließend thermisch („trocken“) oder galvanisch („nass“) reduziert werden. Die thermische Reduktion findet in Gebläseschachtöfen statt. Dort wird das Zinkoxid unter Zugabe von Kohle bei Temperaturen von mehr als 1.000 °C reduziert, als Nebenprodukt fällt Kohlenmonoxid an. Das Zink liegt in der Gasförmigen Phase vor und wird durch Eindüsen von Blei auskondensiert. Das entstehende Rohzink muss dann von durch Destillation von Störstoffen gereinigt werden.

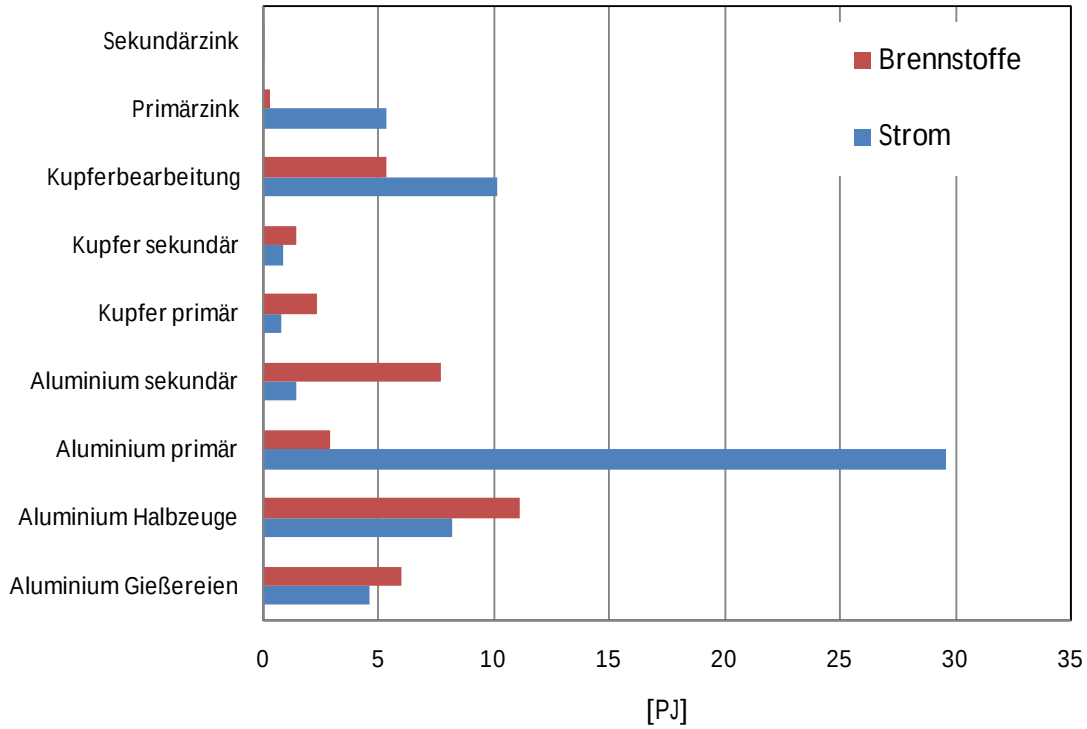
5.2.10 Primärzinkherstellung durch Zink-Galvanisierung

Wie bei der trockenen Darstellung von Zink wird das Erz durch Rösten oxidiert. Das entstehende Oxid wird in Schwefelsäure gelöst. Die Lösung wird dann elektrolytisch unter Einsatz von Bleianoden und Aluminiumkathoden behandelt, wobei hochreines Zink abgeschieden wird.

5.2.11 Zusammenfassung: THG-Emissionen und Energieverbrauch

Abbildung 5-5 zeigt die Aufteilung des (End-)Energieeinsatzes für einzelne Produktgruppen der NE-Metallbranche. Dies beinhaltet auch die erste Weiterverarbeitungsstufe und sowie die NE-Gießereien für das Jahr 2007 (siehe hierzu auch Abbildung 5-3).

Abbildung 5-5: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



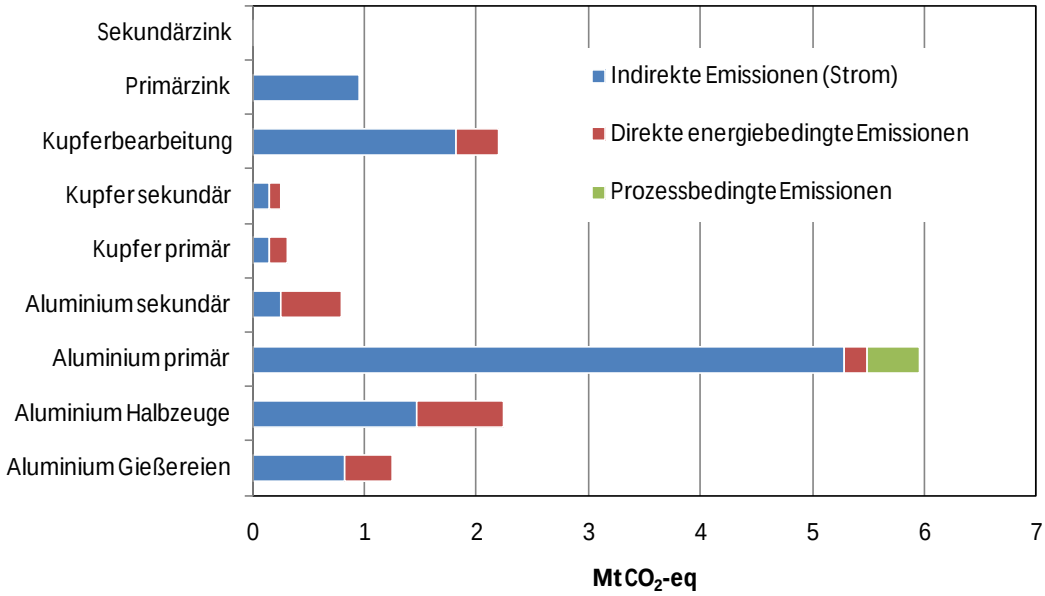
Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 5.2 genannten Datenquellen und Annahmen

Den größten Anteil stellt nach wie vor Primäraluminium dar. Dahinter folgen bereits die ersten Verarbeitungsstufen für Aluminium und Kupfer, sowie die Aluminiumgießereien. Die Anteile dieser Gruppen nehmen tendenziell zu. Danach erst kommt weitere Metallerzeugung wie Sekundäraluminium (mit ebenfalls zunehmendem Anteil), sowie Primär-/Sekundärkupfer und Primärzink (mit eher stabilen oder abnehmenden Anteilen).

Der spezifische Energieeinsatz der verschiedenen Produktgruppen schwankt sehr stark zwischen 1 bis knapp 60 GJ/t, wobei primärenergetisch die Spreizung auf Grund des stromintensiven Aluminiums noch sehr viel größer ist.

Bei den Treibhausgasemissionen ist entsprechend dem Energieverbrauch die Primäraluminiumerzeugung dominant. Zu den hohen Emissionswerten aus dem Stromverbrauch kommen hier noch prozessbedingte Emissionen aus dem Kathodenverbrauch bei der Elektrolyse. Daneben sind die weiterverarbeitenden Prozesse im Kupfer und Aluminiumbereich von Bedeutung, bei denen ein hoher Stromeinsatz vorherrscht. Die Sekundäraluminiumerzeugung ist auf Grund ihres hohen Brennstoffeinsatzes von geringerer Bedeutung als im Endenergieeinsatz.

Abbildung 5-6: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 5.2 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 5-2: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO_2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Aluminium Gießereien	4,64	5,96	-	0,83	0,42
Aluminium Halbzeuge	8,17	11,09	-	1,46	0,78
Aluminium primär	29,56	2,87	0,46	5,29	0,20
Aluminium sekundär	1,43	7,72	-	0,26	0,54
Kupfer primär	0,83	2,37	-	0,15	0,17
Kupfer sekundär	0,85	1,46	-	0,15	0,10
Kupferbearbeitung	10,15	5,37	-	1,82	0,38
Primärzink	5,31	0,33	-	0,95	0,02
Sekundärzink	0,05	0,09	-	0,01	0,01

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel basierend auf den in Kapitel 5.2 genannten genannten Datenquellen und Annahmen

5.3 Analyse der Einsparoptionen

Aufgeführt sind hier die prozessspezifischen Einsparoptionen sowie die Einsparoptionen, die für die NE-Metallindustrie einen Querschnittscharakter aufweisen.

5.3.1 Erzeugung von Primäraluminium

5.3.1.1 Inerte Anoden

Große Hoffnungen werden in die Entwicklung der sogenannten Inerten Anode gesteckt, an der seit den 1970er Jahren intensiv geforscht wird. Im Vergleich zu den üblichen Anoden aus Kohlenstoff welche während des Elektrolysevorgangs verbraucht werden, sind Inerte Anoden dauerhaltbarer (inert zum Elektrolyt) und bestehen meist aus Werkstoffen wie Keramik, Cermet[50] oder Metallen. Man geht davon aus, dass die Lebensdauer um den Faktor 25 bis 30 größer ist (Kvande, Haupin 2001). Bei einer üblichen Lebensdauer einer Kohlenstoffanode von ungefähr einem Monat ergibt dies für Inerte Anoden einen Wert von rund zwei Jahren. Im vorgelagerten Prozessschritt der Herstellung der Anoden wird so Energie eingespart und der Ausstoß von Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO), Tetrafluorethan (CF_4) und Hexafluorethan (C_2F_6) verringert. Das Finden eines geeigneten Werkstoffes und die Verminderung des thermischen Verlustes stellen zurzeit die größten Herausforderungen für die Wissenschaft dar.

Anders als bei der Söderbergelektrolysezellen, müssen bei Prebake-Zellen, wie sie sich heute weltweit zu 68 % in Anwendung finden (Vgl. Quinkertz 2002), die Anoden in einem vorgelagerten Prozessschritt hergestellt werden. Dies erfolgt in den Schritten Mischen der Anodenmasse, Formen der Anodenkörper und Brennen der Anoden. Die Ausgangsstoffe sind Petrolkoks, Anodenresten und Steinkohlenteerpech.

Der Vorteil einer Inerten Anode besteht in ihrer größeren Haltbarkeit. Um die gewünschte Trennung des Aluminiums vom Aluminiumoxid zu gewährleisten, sollte der Werkstoff der Inerten Anode folgende Eigenschaften erfüllen: (McMinn, Nora 2004), (Sadoway 2001):

- Hohe elektrische Leitfähigkeit
- Elektrochemische Stabilität
- Mechanische Stabilität und resistent gegen Temperaturschock
- Resistenz gegen Sauerstoff
- Resistenz gegen den Elektrolyten (z. B. Kryolith).

---

50 Cermets sind Verbundwerkstoffe aus einer keramischen und metallischen Phase (Sadoway 2001).

Die bereits genannten Gruppen von Werkstoffen – Keramiken, Cermets und Metalle - bieten jeweils Vor- und Nachteile hinsichtlich dieser Anforderungen.

Energiebedarf

Die Technologie der Inerten Anoden zielt darauf ab insbesondere Energieeinsparungen im Prozessschritt des Formens der Anodenkörper zu erzielen. Zu den Werten des spezifischen Energieeinsatzes zur Herstellung von Kohlenstoffanoden sind in der Literatur und einschlägigen Softwaresystemen unterschiedliche Werte, rund um 1.000 kWh/t_{Anode}, zu finden. So gibt Layer (Layer et al. 1999) an, dass zwischen 1.000-1.500 kWh an Brennstoffenergie (bei einem angenommenen Hu = 28 MJ/kg) und 200-250 kWh elektrische Energie für die Produktion einer Tonne Kohlenstoffanode benötigt werden. Kvande (Kvande, Haupin 2001) beziffert den spezifischen Endenergiebedarf mit 900 kWh/t_{Anode}, GEMIS 4.6 (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) beispielsweise mit rund 1.060 kWh/t_{Anode}. Unter Annahme einer Elektrolysezelle mit ***best avaible technology*** (BAT) nach Worrell (Worrell et al. 2007) (13.600 kWh/$t_{Aluminium}$) ist der Anteil der Anodenproduktion am Endenergieverbrauch der Elektrolyse somit zwischen 7 und 13 % anzusiedeln und beschreibt gleichzeitig das ungefähre Potenzial, abzüglich des Endenergieaufwandes für die Herstellung der Inerten Anoden, für diese Technologie. Benedyk (Benedyk 2001) errechnet für das theoretische Minimum der Inerten Anoden 9.920 kWh/$t_{Aluminium}$ und zeigt so ein theoretisches Potenzial von rund 27 % Einsparung (im Vergleich zur BAT) auf. Als realistisches Ziel für den spezifischen endenergetischen Verbrauch für eine Elektrolysezelle mit nachgerüsteten Inerten Anoden wird zurzeit 13.000 kWh/$t_{Aluminium}$ angegeben. Als langfristig angestrebter Wert können 11.000 kWh/$t_{Aluminium}$ angesehen werden (Benedyk 2001).

Trotz langer intensiver Forschung befindet sich die Technik jedoch immer noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Vor allem das Finden eines geeigneten Werkstoffes, welcher zum einen die benötigten elektrochemischen und physikalischen Eigenschaften erfüllt und zum anderen ökonomischen Anforderungen entspricht, bereitet noch Probleme (Kvande, Haupin 2001), (Sadoway 2001). Einigkeit besteht jedoch im großen Potenzial der Technik. Es wird in den meisten Studien hervorgehoben, dass bei einer Reduzierung der thermischen Verluste, hohe Energieeinsparungen möglich sind. Als realistisches Ziel werden oft 1.000 kWh/$t_{Aluminium}$ genannt (Benedyk 2001). Aktuelle Studien (McMinn, Nora 2004; Kaenel et al. 2006) kommen zu dem Schluss, dass Inerte Anoden kurz vor ihrer Anwendung im industriellen Maßstab stehen. McMinn konstatiert in „Inert anodes for aluminium production“:

„The development of inert anodes has progressed to the point where their use in commercial aluminium production appears to be technically feasible“.

Auch Kaenel (Kaenel et al. 2006) kommt zu dem Ergebnis, dass neue Zelldesigns, besonders in Verbindung mit Benetzbaren Kathoden (vgl. 5.3.1.2), zu Energieeinsparungen und ökonomischen Vorteilen führen.

5.3.1.2 Benetzbare Kathoden

Aktuell in der Industrie übliche Kathoden bestehen aus Kohlenstoff, welche vergleichsweise schlecht durch Aluminium benetzt werden. Dies wiederum führt zu elektromagnetischen Kräften und Konvektionsströmungen, welche Verformungen hervorrufen. Deshalb muss ein vergleichsweise großer Anoden-Kathoden-Abstand (ACD) in der Zelle gewahrt werden. Daraus resultieren Spannungsabfälle und der einhergehende hohe Energiebedarf. Durch benetzte Kathoden wird versucht die Interpolardistanz zu verringern um so Energie einzusparen (Banek et al. 1988).

Bei der Suche nach einem Werkstoff, welcher die Eigenschaften der guten elektrischen Leitfähigkeit und Benetzbarkeit erfüllt, erwies sich Titandiborid (TiB_2) als geeignet. Nachteil dieses Werkstoffes sind dessen hohe Kosten von rund 35.000€/t bei einer benötigten Menge von circa 5 t pro Elektrolysezelle. Zudem muss die Beschichtung einen Mindestanteil von 50 % an TiB_2 aufweisen, um die Kathode gegen Korrosion durch das Elektrolyt zu schützen. In bis dato realisierten Zellen, ausgestattet mit Inerten Anoden (Vgl.5.3.1.1) und Benetzbaren Kathoden, wird ein Endenergieverbrauch von 11.400 DCkWh/$t_{Aluminium}$ erreicht (Keniry 2001). Nimmt man einem AC-Energieverbrauch von rund 500 kWh/$t_{Aluminium}$ (Kammer 1995) an und vergleicht dann den Endenergieverbrauch einer Elektrolysezelle mit besser Benetzbaren Kathode mit einer BAT Zelle (Worrell et al. 2007) entspricht dies einer Einsparung von rund 13 %.

Wie auch bei den Inerten Anoden wird an benetzbaren Kathoden seit den 1970er Jahren geforscht und die Technologie befindet sich noch immer im Entwicklungsstadium.

5.3.1.3 Carbothermischer Prozess

Eine völlig neue und energiesparende Alternative zum Hall-Héroult-Prozess (Aluminiumelektrolyse) könnte der carbothermische Prozess darstellen. Bedeutendster Vorteil des carbothermischen Prozesses wäre die Vermeidung des hohen Stromverbrauchs der Elektrolyse. Nach Aussagen des Internationalen Aluminium-Instituts (IAI) birgt der carbothermische Prozess gegenüber dem heute üblichen Hall-Héroult-Prozess ein Energieeinsparpotenzial von 20 % (International Aluminium Institute 2008). Darüber hinaus wäre das Design der Zelle besser für CCS und Wärmerückgewinnung geeignet. Am carbothermischen Prozess wird seit über 50 Jahren geforscht. Auch er befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

5.3.1.4 Bipolare Elektrolysezellen

Der Einsatz von Inerten Anoden und benetzbaren Kathoden zusammen mit der Verwendung bipolarer Zellen könnte den Energieverbrauch der Elektrolyse um 20 bis 25 % senken. Darüber hinaus entfielen jegliche prozessbedingte Emissionen der Treibhausgase CO_2 und PFC sowie der Energieaufwand zur Anodenproduktion (Martin, Worrell, Elliott et al. 2000).

5.3.2 Produktion von gewalzten Aluminiumhalbzeugen

5.3.2.1 Modernisierung Stoßöfen

Vor dem Walzen von gegossenen Aluminiumbarren müssen diese einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Die hierzu eingesetzten Tieföfen können durch eine Umstellung auf direkte Feuerung und den Einsatz moderner Brenner und Steuerungstechniken kann der spezifische Erdgaseinsatz signifikant gesenkt werden (Kirchartz 2009; Kuhn, Thielen 2003).

5.3.2.2 Ersatz von Tieföfen durch Stoßöfen

Stoßöfen weisen auf Grund ihrer baulichen Ausgestaltung einen geringeren spezifischen Energiebedarf als Tieföfen auf. Während es sich bei den Tieföfen um einen diskontinuierlichen, indirekten Wärmebehandlungsprozess handelt, arbeiten Stoßöfen direkt und kontinuierlich. Daher können die im auftretenden Wärmeverluste deutlich reduziert werden (Kirchartz 2009; Kuhn, Thielen 2003).

5.3.2.3 Optimierter Betrieb

Durch einen optimierten Betrieb der gesamten Einrichtungen zum Warm- und Kaltwalzen von Aluminium können weitere Einsparungen erzielt werden.

Möglich sind derartige Optimierungen unter anderem hinsichtlich der Produktionsplanung, die eine optimale Ausnutzung aller betriebenen Anlageteile ermöglicht (Kirchartz 2009; Kuhn, Thielen 2003).

5.3.3 Aluminiumgießereien

5.3.3.1 Anlieferung von Flüssigmetall

Befinden sich die Aluminiumgießerei und der Aluminiumerzeuger nicht am selben Standort, wird das Aluminium in den meisten Fällen kalt zur Gießerei transportiert. Hierbei muss Energie für das erneute Aufschmelzen des Aluminiums aufgewandt wer-

den. Diese Energie kann teilweise durch den Transport flüssigen Metalls von der Metallerzeugung zur Gießerei eingespart werden.

Da das Aluminium hierzu auf eine höhere als die Schmelztemperatur gebracht werden muss, um die Energieverluste während des Transportes zu kompensieren, steigt der Energieeinsatz im Schmelzbetrieb an. Demgegenüber entfällt die Schmelzenergie im Gießereibetrieb.

5.3.4 Erzeugung von Primärkupfer

5.3.4.1 Verbesserte Badschmelztechnik in der Kupferproduktion

Die Badschmelztechnik kann alternativ zum Schwebeschmelzen eingesetzt werden und verspricht nach Angaben der vorläufigen BREF-Dokumente[51] für die Nichteisen-Metallindustrie vom November 2008 (BREF 2008) in modernen Badschmelzanlagen mit abgedichteten oder halb abgedichteten Öfen wesentlich höhere Reaktionsraten.

5.3.4.2 Hydrometallurgisches Verfahren für gemischte Kupfererze mit geringem Edelmetallgehalt

Das hydrometallurgische Verfahren wird dahingehend weiterentwickelt, dass die Verarbeitung von gemischten (oxidischen und sulfidischen) Erzen, die eine nur geringe Konzentration an Edelmetallen enthalten, möglich wird.

5.3.5 Alle Schmelzprozesse

5.3.5.1 Modernisierung bestehender Öfen

Trommelöfen sind durch Ihre große Toleranz gegenüber verschiedenen Schrottqualitäten bevorzugt bei der Verarbeitung in der Altschrottverarbeitung in der Verwendung. Ein direkter Ersatz dieser Öfen durch andere Technologien ist nur bei Einschränkungen hinsichtlich der Schrottzusammensetzung möglich. Ein weiterer Einsatz dieses Ofentyps ist daher in weiteren Teilen der Industrie zu erwarten. Allerdings lassen sich durch den Einsatz optimierter Brennertechnologien die auftretenden Wärmeverluste insbesondere im Abgasstrom verringern (BLfU 2005).

---

51 BREF = Best Available Technique Reference Documents (Europäische Union).

5.3.5.2 Einsatz von Öfen mit verbesserter Wärmerückgewinnung

Der Einsatz von Rekuperativ- und Regernativbrennern ermöglicht eine Rückgewinnung der bei der Verbrennung entstehenden Abgaswärme. Bei der rekuperativen Wärmerückgewinnung findet ein direkter Wärmeübergang zwischen Ab- und Zuluft statt.

Regenerativbrenner ermöglichen eine Rückgewinnung der bei der Verbrennung entstehenden Abgaswärme. Dabei sind diese effizienter in der Wärmerückgewinnung als rekuperative Systeme bei denen ein direkter Wärmeübergang zwischen Zu- und Abluft stattfindet, während bei regenerativen Systemen ein Zwischenmedium eingesetzt wird. Hierdurch findet eine zeitliche Entkopplung der beiden Prozesse statt.

Auch sind Regenerativbrenner durch diese Entkopplung für höhere Temperaturbereiche und Brennerleistungen einsetzbar (Institut für Gießereitechnik gGmbH 2008; BLfU 2005).

5.3.5.3 Gleichstrommagnetheizung

Induktive Schmelzöfen ermöglichen eine deutlich bessere Ausnutzung der Endenergie als brennstoffbetriebene Öfen. Nachteilig ist der hohe Einsatz von Primärenergie durch den Energiewandlungsprozess bei der Strombereitstellung. Durch den Einsatz supraleitender Spulen für die Erzeugung des Magnetfeldes kann der Endenergiebedarf so weit reduziert werden, dass ein Einsatz aus energetischer Sicht sinnvoll wird. Die Technologie wird zur Zeit in der Umformtechnik als Wärmevorbehandlung eingesetzt, das Grundprinzip supraleitender Spulen kann aber in allen Bereichen, in denen zur Zeit Induktionstechniken eingesetzt werden können, zum Einsatz kommen (Kellers et al. 2009).

5.3.5.4 Inputmaterial vorwärmen

Durch eine Vorwärmung des Inputmaterials durch Nutzung von Prozessabwärme kann der Energieeinsatz für das Aufschmelzen verringert werden. Die Ausnutzung des Brennstoffes steigt dadurch an. Zu beachten ist dabei, dass keine maßgebliche Verunreinigung der Abluft durch ggf. am Inputmaterial (insbesondere Schrott) anhaftende Verunreinigungen entsteht, die eine aufwendige thermische Nachbehandlung der Abluft erfordern würde (Institut für Gießereitechnik gGmbH 2008).

5.3.5.5 Optimierter Betrieb

Der Betrieb in den Schmelzprozessen kann durch geeignete betriebliche Verfahren hinsichtlich des Energieeinsatzes optimiert werden. Hierbei ist insbesondere eine vorausschauende Fahrweise der Öfen mit angepasster Chargierung zu nennen.

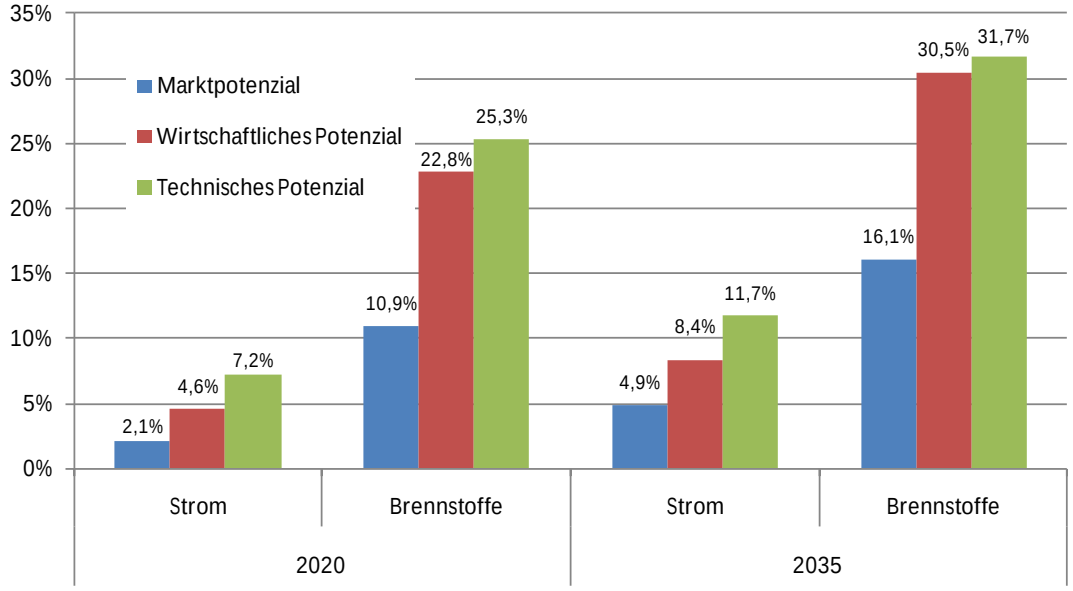
Weiterhin zu nennen sind hier beispielsweise ein sinnvoller Deckelbetreib sowie ein vorausschauender Kalt- und Warmbetrieb.

Eine Optimierung des Prozessertrages führt direkt zu einer Einsparung von Energie, da die zu produzierende Produktmenge verringert wird (Institut für Gießereitechnik gGmbH 2008; BLfU 2005; Kirchartz 2009).

5.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

Die aus den verschiedenen Szenarien resultierenden Einsparpotenziale hinsichtlich des Einsatzes von Strom und Brennstoffen zeigt Abbildung 5-7. Es ist zu erkennen, dass im Bereich des Brennstoffverbrauchs die größeren relativen Einsparpotenziale liegen und diese zum Großteil wirtschaftlich sind. Für die Berechnung wurden alle Einsparoptionen berücksichtigt, die in Tabelle 5-5 aufgeführt sind.

Abbildung 5-7: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Nichteisenmetallsektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 5.1 bis 5.2.10 genannten Datenquellen und Annahmen

Aus Abbildung 5-8 sind die absoluten Einsparpotenziale zu entnehmen, sowie der resultierende Brennstoff- und Stromverbrauch der betrachteten Prozesse. Hieraus geht hervor, dass die relativ eher niedrigen Einsparungen beim Strombedarf aufgrund des sehr hohen Stromverbrauchs der Prozesse absolut in eine vergleichbare Größenordnung kommen wie die Brennstoffeinsparungen.

Tabelle 5-3: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse

	Produktion [kt]					
Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Aluminium Gießereien	828	828	828	828	828	828
Aluminium Halbzeuge	2.521	2.521	2.521	2.521	2.521	2.521
Aluminium primär	551	511	550	518	485	453
Aluminium sekundär	858	784	824	862	899	937
Kupfer primär	296	296	296	296	296	296
Kupfer sekundär	364	301	301	301	301	301
Kupferbearbeitung	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686	2.686
Primärzink	334	334	334	334	334	334
Sekundärzink	89	89	89	89	89	89

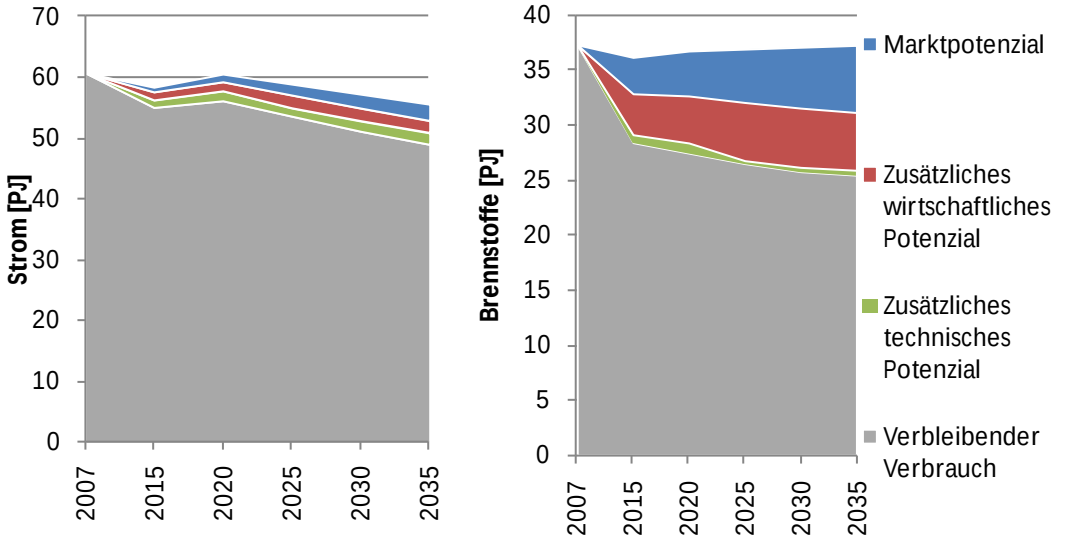
Die größten Einsparpotenziale ergeben sich dabei hinsichtlich der Brennstoffnutzung in den einzelnen Szenarien im Bereich der Brennstoffe in den Schmelzprozessen. Bei diesen ist eine deutliche Einsparung durch den Einsatz verbesserter Technologien (Brenner, bzw. Flüssigmetallanlieferung) sowie Optimierung im Betrieb zu erwarten. Da die maßgeblichen Optimierungsmaßnahmen vornehmlich betrieblicher Natur sind oder aus verfügbaren Technologien resultieren, ist mit Effizienzsteigerungen innerhalb relativ kurzer Zeithorizonte zu rechnen.

Wichtigster Bereich für die Effizienzsteigerungen im Strombereich ist die Primäraluminiumerzeugung, bei der die relativen Einsparpotenziale jedoch verglichen mit den Brennstoffen im Gießereibetrieb gering sind.

Bei den Metallerzeugungsprozessen ist in der Regel davon auszugehen, dass keine Steigerung der Produktion erfolgt, sondern am ehesten eine Erhaltung der Produktion bzw. ein Rückgang. Bei den nachgelagerten Prozessen wie Aluminium- und Kupferhalbzeuge sowie Aluminiumgiessereien lag keine belastbare Aussage über die zukünftige Entwicklung vor. Gegebenenfalls kann es zu einem weiteren Anwachsen der Produktion kommen, wenn andere Materialien wie Eisen/Stahl ggf. verdrängt werden. Dies war aber im Rahmen der Arbeiten nicht konsistent abzuschätzen. Daher wurde die Produktion auf dem ursprünglichen Produktionsniveau belassen. Maßgeblicher Prozess für den gesamten Energieverbrauch in allen Szenarien im Jahr 2035 bleibt – unter der Voraussetzung eines Verbleibs der Industrie in Deutschland – die Erzeugung von

Primäraluminium, gefolgt von den weiteren Aluminiumprozessen. Die weiteren NE-Metalle spielen demgegenüber nur eine nachgeordnete Rolle.

Abbildung 5-8: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035



Strom [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	61,0	58,5	60,8	59,1	57,4	55,7
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,8	1,3	1,8	2,3	2,7
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	1,3	1,5	2,1	2,1	1,9
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	1,2	1,6	1,3	1,7	1,9

Brennstoffe [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	37,3	36,1	36,7	36,9	37,0	37,2
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	3,3	4,0	4,8	5,4	6,0
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	3,8	4,3	5,4	5,5	5,3
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,7	0,9	0,3	0,4	0,5

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 5.1 bis 5.2.10 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 5-4: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess nach Szenario

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aluminium Gießereien	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,5
Aluminium Halbzeuge	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Aluminium primär	53,6	53,6	53,6	52,8	50,8	52,3	50,2	51,0	46,8
Aluminium sekundär	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,5	1,4
Kupfer primär	2,8	2,8	2,8	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5
Kupfer sekundär	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,3	2,1	2,3	2,0
Kupferbearbeitung	3,8	3,8	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	3,0	3,0
Primärzink	15,9	15,9	15,9	15,6	15,4	15,6	15,4	14,7	14,6
Sekundärzink	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aluminium Gießereien	7,2	7,2	7,2	5,7	5,5	4,2	4,1	4,1	4,0
Aluminium Halbzeuge	4,4	4,4	4,4	3,9	3,8	3,6	3,5	3,6	3,5
Aluminium primär	5,2	5,2	5,2	5,1	4,7	5,0	4,6	4,8	4,1
Aluminium sekundär	9,0	9,0	9,0	8,2	7,3	7,0	5,7	7,0	5,7
Kupfer primär	8,0	8,0	8,0	8,0	7,9	7,8	7,8	7,8	7,8
Kupfer sekundär	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8	3,4	3,8	3,1
Kupferbearbeitung	2,0	2,0	2,0	1,7	1,6	1,3	0,9	1,0	0,9
Primärzink	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
Sekundärzink	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 5.1 bis 5.2.10 genannten Datenquellen und Annahmen

Bei den Treibhausgasemissionen ergeben sich für alle relevanten Prozesse deutliche Einsparungen, diese werden durch eine als rückläufig prognostizierte Produktion in der Primäraluminiumerzeugung noch verstärkt. Auch die Veränderung der spezifischen Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung hat einen wichtigen Anteil an diesem Effekt, da die indirekt erzeugten Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung in der Aluminiumindustrie deutlich überwiegen. Die relativ höheren Einsparungen im Brennstoffbereich haben daher keinen entsprechenden Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Tabelle 5-5: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aluminium Gießereien	4,64	4,64	4,64	4,62	4,60	4,62	4,60	4,61	4,56
Aluminium Halbzeuge	8,17	8,17	8,17	8,12	8,09	7,97	7,94	7,97	7,94
Aluminium primär	29,56	29,53	24,30	29,04	23,01	28,77	22,72	28,07	21,19
Aluminium sekundär	1,43	1,38	1,56	1,32	1,42	1,21	1,27	1,21	1,27
Kupfer primär	0,83	0,83	0,83	0,76	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75
Kupfer sekundär	0,85	0,70	0,70	0,69	0,68	0,69	0,64	0,68	0,61
Kupferbearbeitung	10,15	10,15	10,15	9,63	9,25	8,68	7,93	8,11	7,93
Primärzink	5,31	5,31	5,31	5,23	5,15	5,23	5,15	4,91	4,89
Sekundärzink	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
Summe	60,98	60,75	55,71	59,46	52,99	57,97	51,05	56,35	49,17

	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aluminium Gießereien	5,96	5,96	5,96	4,75	4,56	3,46	3,40	3,43	3,29
Aluminium Halbzeuge	11,09	11,09	11,09	9,74	9,58	9,04	8,87	9,04	8,87
Aluminium primär	2,87	2,86	2,36	2,79	2,15	2,74	2,11	2,63	1,86
Aluminium sekundär	7,72	7,42	8,43	6,79	6,85	5,78	5,30	5,78	5,30
Kupfer primär	2,37	2,37	2,37	2,36	2,35	2,32	2,31	2,32	2,31
Kupfer sekundär	1,46	1,20	1,20	1,16	1,13	1,16	1,03	1,15	0,95
Kupferbearbeitung	5,37	5,37	5,37	4,69	4,17	3,43	2,43	2,67	2,43
Primärzink	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,33	0,32	0,31	0,31
Sekundärzink	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Summe	37,26	36,70	37,21	32,69	31,21	28,35	25,87	27,42	25,42

	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aluminium Gießereien	1.250	1.198	923	1.111	821	1.020	739	1.016	727
Aluminium Halbzeuge	2.243	2.152	1.666	2.050	1.552	1.975	1.487	1.975	1.487
Aluminium primär	5.957	5.626	3.195	5.539	3.041	5.491	3.006	5.365	2.822
Aluminium sekundär	800	753	760	699	634	610	510	610	510
Kupfer primär	314	305	256	293	247	289	243	289	243
Kupfer sekundär	254	202	161	197	153	197	142	196	133
Kupferbearbeitung	2.195	2.083	1.483	1.948	1.300	1.701	1.034	1.550	1.034
Primärzink	974	916	602	901	584	901	584	847	554
Sekundärzink	16	15	12	15	11	15	11	13	10
Summe	14.003	13.252	9.058	12.753	8.342	12.198	7.757	11.860	7.520

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 5.1 bis 5.2.10 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 5-6: Resultierender Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption

	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brenn-stoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Nicht-Eisen Metalle	4,40	6,54	9,28	11,79	**12%**	**32%**	1.391	1.537	**12%**
Aluminium Gießereien	0,02	0,08	2,54	2,67	**2%**	**45%**	182	195	**16%**
Anlieferung von Flüssigmetall	-	-	0,87	0,87			62	61	
Gleichstrommagnetheizung	0,02	0,08	0,06	0,20			8	22	
Optimierter Betrieb Schmelzöfen	-	-	1,60	1,60			112	112	
Aluminium Halbzeuge	0,20	0,22	2,05	2,22	**3%**	**20%**	178	180	**8%**
Moderniesierung Stoßöfen	0,14	0,15	0,27	0,29			42	36	
Optimierter Betrieb	-	-	1,24	1,24			87	87	
Stoßofen	0,06	0,08	0,54	0,69			49	57	
Aluminium primär	1,46	3,11	0,23	0,49	**13%**	**21%**	261	373	**8%**
Dauerhaltbare Kathoden	1,01	2,49	0,16	0,39			181	299	
Optimierter Betrieb	0,38	0,44	0,06	0,07			68	53	
Verminderung Anodenverbrauch	0,07	0,18	0,01	0,03			13	21	
Aluminium sekundär	0,17	0,29	1,63	3,13	**19%**	**37%**	143	251	**29%**
Neue Brenner für Trommel	0,08	0,19	0,68	1,63			61	135	
Optimierter Betrieb	0,04	0,05	0,38	0,43			34	36	
Regenerativbrenner	-	-	0,31	0,74			22	52	
Vorwärmung Schrott	0,04	0,05	0,27	0,32			26	28	
Kupfer primär	0,08	0,08	0,05	0,05	**10%**	**2%**	17	12	**4%**
Abwärmenutzung	0,01	0,01	0,05	0,05			5	5	
Optimierter Betrieb	0,07	0,07	-	-			11	7	
Kupfer sekundär	0,02	0,09	0,05	0,26	**13%**	**21%**	7	28	**13%**
Flammofen: optimierter Betrieb	0,00	0,02	0,01	0,06			2	7	
Flammofen: verbesserte Verbrennung	0,01	0,03	0,02	0,10			2	10	
Schachtofen: Rekuperativbrenner	0,00	0,01	0,00	0,02			1	2	
Schachtofen: Schrott vorwärmen	0,00	0,02	0,01	0,06			1	6	
Schachtofen: verbesserte Verbrennung	0,00	0,01	0,00	0,02			0	2	
Kupferbearbeitung	2,04	2,23	2,70	2,94	**22%**	**55%**	533	449	**20%**
Prozessoptimierung	0,09	0,09	0,12	0,12			24	19	
Neue Brennertypen	0,75	0,85	0,99	1,13			196	172	
Schnelles Aufheizen	1,20	1,28	1,58	1,69			313	258	
Primärzink	0,40	0,42	0,03	0,03	**8%**	**8%**	68	48	**5%**
Abwärmenutzung Sintern	0,40	0,42	0,03	0,03			68	48	
Sekundärzink	0,01	0,01	0,00	0,00	**28%**	**1%**	2	2	**11%**
Wärmerückgewinnung	0,01	0,01	0,00	0,00			2	2	

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 5.1 bis 5.2.10 genannten Datenquellen und Annahmen

5.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren

Durch den hohen Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten, insbesondere bei der elektrolytischen Primärerzeugung von Aluminium, ist seitens der Hersteller die Perspektive für eine weitere Primäraluminiumerzeugung in Deutschland unsicher (Brandtzæg 2010). Für Investitionen in die bestehenden Anlagen besteht geringe langfristige Investitionssicherheit, da ggf. mit einer Verlagerung der Produktion ins Ausland zu rechnen ist. Ähnliche Aussagen gelten abgeschwächt auch für die Primärzinkherstellung, weniger für die Kupferherstellung, und nicht für die nachgelagerten Prozesse der NE-Halbzeuge und Gießereiprodukte, mit denen der größte Teil der Wertschöpfung ind er Branche erfolgt. In diesem vertikalen Verbund hat häufig dann auch die lokale Produktion von Primärmetallen ihre Berechtigung, weil sie nahe am Markt erfolgt und damit Flexibilitäten in der Produktion schafft, die bei Verlagerung ins Ausland nicht gegeben wären.

Als wichtige innerbetriebliche Hemmnisse wurden mehrere Faktoren identifiziert. Befürchtungen, dass Effizienzmaßnahmen Produkteigenschaften oder die Prozessqualität negativ beeinflussen wird eine hohe hemmende Wirkung zugesprochen. Ebenso hemmend wirken eine mangelnde Transparenz hinsichtlich der spezifischen Energiekosten sowie eine unzureichende Betrachtung der Lebenszykluskosten und Wirtschaftlichkeit der Effizienzmaßnahmen. Eine mangelnde Akzeptanz von Effizienzmaßnahmen bei den Mitarbeitern, die insbesondere im betrieblichen Bereich von entscheidender Bedeutung ist wirkt ebenso hemmend auf die Umsetzung von derartigen Maßnahmen.

Fördernde Faktoren sind der positive Einfluss auf das Unternehmensimage und der Einsatz von Energiemanagementsystemen.

5.6 Branchenspezifische politische Instrumente

5.6.1 Bestehende Instrumente

5.6.1.1 Ökosteuer

Die Ökosteuer ist ein Maßnahmenpaket der Bundesregierung aus dem Jahr 1999 in dem verschiedene Steuergesetze hinsichtlich einer stärkeren Belastung des Energieverbrauchs angepasst wurden. Als neues Gesetz wurde das Stromsteuergesetz vom Bundestag beschlossen.

Im Rahmen der verschiedenen Maßnahmen sind bestimmte Industrien weitgehend von der Besteuerung ausgenommen, darunter auch die NE-Metallindustrie. Durch die Fortführung dieser Ermäßigungen ergibt sich kein aktueller Handlungsdruck.

5.6.1.2 Selbstverpflichtung

Im Jahr 2000 hat sich die deutsche Wirtschaft im Rahmen einer Vereinbarung mit der Bundesregierung dazu verpflichtet, die spezifischen Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2010 um fast 30 Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 zu mindern. Als Ausgleichsmaßnahme gibt es die Zusage der Bundesregierung, in diesem Zeitraum keine ordnungsrechtlichen Maßnahmen zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele zu ergreifen. Weiterhin soll auf verbindliche Energieaudits verzichtet werden. Im Bereich der NE-Metalle wurde die Erreichung der Ziele relativ stark durch Strukturwandel bestimmt (Rückgang der energieintensiven Primäraluminiumproduktion im Vergleich zu den weniger energieintensiven nachgelagerten Prozessen).

5.6.2 Weitere Empfehlungen zu Instrumenten

Der Aluminiumindustrie war bis 2013 eine Kompensation für die erhöhten Energiepreise zugesagt worden. Auf Grund von Rechtsunsicherheiten steht eine Entscheidung der Europäischen Kommission bezüglich der Zulässigkeit der Kompensationszahlungen immer noch aus. Auf der anderen Seite müssen mögliche Kompensationen stärker an nachprüfbare Gegenleistungen der Energieeinsparung geknüpft werden, damit Treibhausgasminderungsmaßnahmen und Energieeffizienzmaßnahmen gezielte Anreize erfahren. Allerdings bedarf dies auch auf Seiten der Primärerzeugungsprozesse erheblicher Forschungsanstrengungen mit längeren Zeithorizonten, die bei der Ausgestaltung solcher Maßnahmen zu berücksichtigen sind.

5.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Auf Grund ihres hohen spezifischen Energiebedarfs in den Kernprozessen besteht in der NE-Metallindustrie ein starkes Eigeninteresse Effizienzmaßnahmen umzusetzen. Dies hat bereits in den vergangen Jahren dazu geführt, dass große Fortschritte in diesem Bereich erzielt wurden. Potenziale bieten sich daher durch den Einsatz neuer Technologien, um insbesondere im Wärmebereich die Energieverluste im Abgasstrom zu verringern. Weiterhin bietet eine Optimierung des Betriebes der Anlagen noch weitgehende Einsparpotenziale, die allerdings nicht in allen betrieblichen und prozessualen Rahmenbedingungen zu realisieren sind. Die Steigerung der Materialeffizienz in der Produktion sowie der Produktentwicklung in den weiterverarbeitenden Industrien bietet ein hohes Einsparpotenzial. Die produktionsbezogene Materialeffizienz kann durch einen verbesserten Betrieb einhergehend mit einer optimierten Prozessgestaltung gesteigert werden.

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen bietet in der Regel ein erhebliches Einsparpotenzial, ist jedoch auf Grund der maßgeblichen Stoffkreisläufe mit hohen Einsatzdauern der Materialien begrenzt.

Die unsichere Lage der Primärrohstoffproduktion am Standort Deutschland erschwert die Prognose der weiteren Entwicklung dieser Industrie. Industriepolitische sind hier mit wirtschafts- und umweltpolitischen Zielsetzungen zu verzahnen.

Die weiterverarbeitende Industrie ist von dieser Problematik weniger betroffen. Auf Grund des relativ gesicherten Verbleibs am Standort Deutschland ist mit einer guten Implementierung von Effizienztechnologien zu rechnen.

Der hohe Anteil der mit elektrischer Energie betriebenen Prozesse erhöht im Bereich die Treibhausgasemissionen den Bedarf nach treibhausgaseffizienten Energieumwandlungsprozessen.

5.8 Literatur

Banek, M.; Brandmair, F.; Swoboda, P. (1988): Kathode für eine Schmelzflußelektrolysezelle

Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2005): Effiziente Energieverwendung in der Industrie. Teilprojekt „Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben“. Augsburg

Benedyk, J. C. (2001): Status report on inert anode technology for primary aluminum.

Brandtzæg, S. R. (2010): Auf Dauer sind die Standorte in Europa nicht wettbewerbsfähig. Frankfurter Allgemeine Zeitung 15.9.2010, S. 14

Dittmeyer, R.; Keim, W.; Kreysa, G.; Oberholz, A. (Hrsg.) (2006): Winnacker·Küchler: Chemische Technik: Prozesse und Produkte. Band 6a Metalle, Willey-VCH Verlag Weinheim

Ecofys; Fraunhofer ISI (2009): Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the aluminium industry. November 2009, http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/pdf/bm/BM %20study %20- %20Aluminium.pdf

Institut für Gießereitechnik gGmbH (2008): Energieeffizienter Gießereibetrieb. http://www.bdguss.de/files/aktuellpdf11.pdf, Stand November 2010

Jochem, E.; Schön, M.; Angerer, G.; Ball, M.; Bradke, H.; Celik, B. et al (2004): Werkstoffeffizienz, Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. Fraunhofer Verlag Stuttgart

Kammer, C. (1995): Aluminium-Taschenbuch. Band 1: Grundlagen und Werkstoffe (15. Aufl.), Düsseldorf: Aluminium-Verlag.

Kellers, J.; Bührer, C.; Hagemann, H.; Ostermeyer, B.; Witte, W. (2009): Magnetic billet heating rivals conventional furnaces. In: Heat Processing, 7 (3), S. 205-210

Keniry, J. (2001): The economics of inert anodes and wettable cathodes for aluminum reduction cells. In: JOM – The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 53 (5), S. 43-47

Kirchartz, B. (2009): Energieeffizienz entlang der Wertschöpfungskette von Aluminium. In: Energieeffizienz durch Instandhaltung: Forschungsergebnisse und praktische Anwendungen. InFo, Instandhaltungsforum der Universität Dortmund, 13. Dortmund: Praxiswissen, S. 75-90

Krone, K. (2000): Aluminiumrecycling – Vom Vorstoff zur fertigen Legierung. Aluminium-Verlag, Düsseldorf

Kuhn, P.; Thielen, S. (2003): Energieeinsparung und CO_2-Minderung in einem integrierten Aluminium-Walzwerk.

Kvande, H.; Haupin, W. (2001): Inert anodes for Al smelters: Energy balances and environmental impact. Inerte Anoden für Al-Schmelzanlagen: Energiebilanz und Umweltauswirkungen. In: JOM – The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 53 (5), S. 29-33

Layer, G.; Matula, F.; Saller, A.; Rahn, R. (1999): Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse. Online: www.ffe.de/download/langberichte/Kennzahlen.pdf

McMinn, C.; de Nora, V. (2004): Inert anodes for aluminium production. In: Aluminium, 80 (3), S. 135-140

Quinkertz, R. (2002): Optimierung der Energienutzung bei der Aluminiumherstellung.

Sadoway, D. R. (2001): Inert anodes for the Hall-Heroult cell: The ultimate materials challenge. In: JOM – The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 53 (5), S. 34-35

von Kaenel, R.; Antille, J. (2011): New cathode design saves energy in aluminium smelting.

Wietschel, W.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Markewitz, P.; Möst, D.; Scheufen, M. (2010): Energietechnologien 2050. Technologiebericht. Fraunhofer Verlag Stuttgart

World Bureau of Metall Statistics (2009): Metallstatistik 2008. 95th Edition. World Bureau of Metall Statistics, Hertfordshire (UK) 2009

Worrell, E.; Neelis, M.; Price, L.; Galitsky, C.; Nan, Z. (2007): World best practice energy intensity values for selecterd industrial sectors. Berkeley: Ernesto Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory

WVM (2009): Metallstatistik 2008. WirtschaftsVereinigung Metalle WVM. Berlin 2009, http://www.wvmetalle.de/wvmprofi/docs/doc_6218_20091125103414.pdf

6 Papiergewerbe

T. Fleiter, D. Fehrenbach (Fraunhofer ISI)

6.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse

6.1.1 Branchenbeschreibung

Im Jahr 2008 wurden laut Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP 2009b) in Deutschland 23 Mio. t Papier produziert, deutlich mehr als in allen anderen EU-Mitgliedstaaten. Weltweit wurde nur in den USA, China und Japan mehr Papier hergestellt. Der Großteil hiervon, 10,5 Mio. Tonnen, entfiel auf grafische Papiere, 9,3 Mio. Tonnen auf Verpackungspapier und -karton und die restlichen 2,9 Mio. Tonnen teilten sich gleichmäßig auf Hygiene- und Spezialpapiere auf. Trotz eines nur geringfügig niedrigeren Verbrauchs von 20.519 t Papier, wurden im gleichen Jahr 14.014 t Papier exportiert und 11.685 t importiert. In der Papier- und Zellstoffindustrie waren im Jahr 2008 43.400 Beschäftigte tätig und sie erwirtschaftete einen Umsatz von 14,9 Mrd. €. Im Jahr 2007 waren in Deutschland 182 Betriebe zur Herstellung von Papier und Pappe und 23 Betriebe zur Holz- und Zellstoffherstellung tätig (VDP 2009a). Von den 110 Unternehmen der Papierindustrie sind alleine 12 Unternehmen mit einer jährlichen Kapazität von mehr als 500.000 t Papier für 65 % der Jahresproduktion verantwortlich.

Mit einem Energiekostenanteil von über 10 % gehört die Papierindustrie zu den energieintensiven Wirtschaftszweigen. Damit ist die Wirtschaftlichkeit der Papierherstellung in großem Maße von den Energiepreisen sowie dem effizienten Umgang mit Energie abhängig. Das Papiergewerbe macht knapp 3 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland aus. Bezogen auf das Verarbeitende Gewerbe hat das Papiergewerbe einen Anteil von 9 % (2007, nach AG-Energiebilanzen).

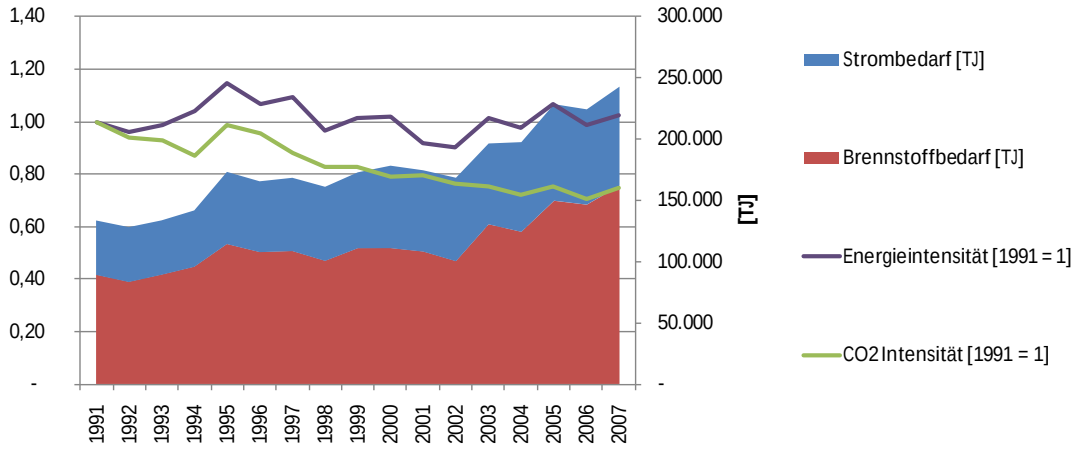
Der Absolute Energiebedarf des Papiergewerbes ist von 1991 bis 2007 um 81 % gestiegen, während sich der spezifische Energiebedarf, bezogen auf die produzierte Tonne Papier, mit leichten jährlichen Schwankungen auf einem konstanten Niveau bewegte (siehe Abbildung 6-1). Im gleichen Zeitraum sank die CO_2-Intensität der Papierproduktion um 25 % auf 0,97 t CO_2 je produzierte Tonne Papier[52]. Diese Entwicklung wurde vorwiegend durch eine Veränderung in der Brennstoffstruktur bewirkt. Braunkohle, Steinkohle und Mineralöle wurden durch die weniger CO_2-intensiven

---

52 Die Angabe enthält sowohl die direkten CO_2-Emissionen als auch die indirekten Emissionen über den Strom- und Fernwärmeverbrauch.

Energieträger Erdgas, Fernwärme und Erneuerbare Energien ersetzt. Absolut sind die CO_2-Emissionen des Papiergewerbes um 36 % gestiegen.

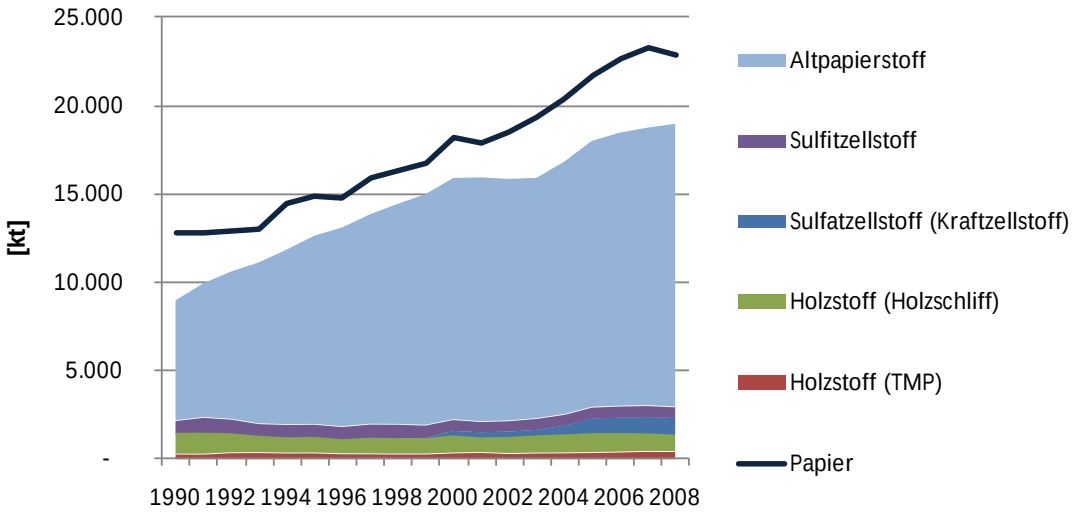
Abbildung 6-1: Entwicklung von Energiebedarf und Energieintensität im Papiergewerbe



Quelle: AG-Energiebilanzen

Der Anstieg von Energieverbrauch und CO_2-Emissionen spiegelt die Entwicklung der gesamten Papierproduktion wieder. Diese verzeichnete von 1991 bis 2007 ein Wachstum von 81 %. Bei der Faserstoffproduktion stieg die Bedeutung von Altpapierstoff kontinuierlich an, sodass dieser der mit Abstand bedeutendsten Faserstoff ist (siehe Abbildung 6-2).

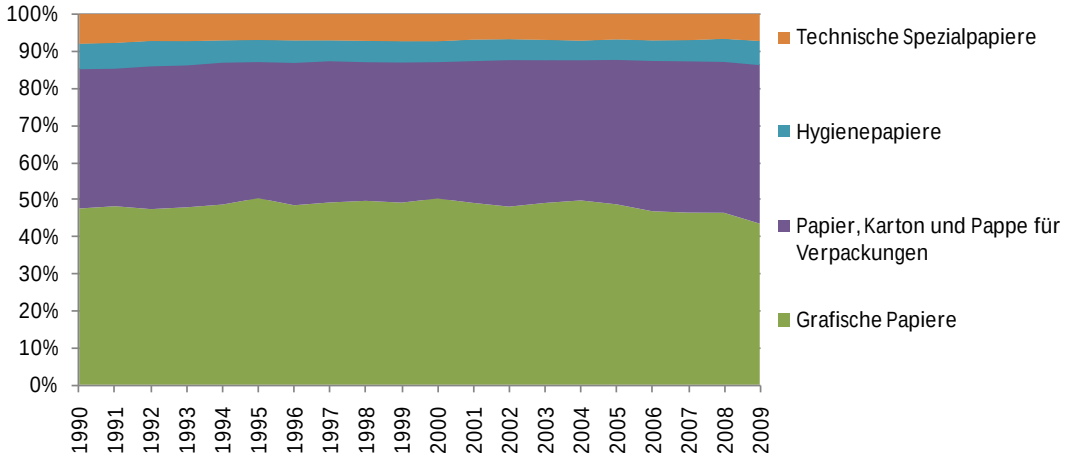
Abbildung 6-2: Produktion von Papier und Faserstoffen in Deutschland



Quelle: VDP

Wie sich die einzelnen Papiersorten auf die Gesamtproduktion aufteilen ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Grafische Papiere sowie Verpackungspapiere und -Pappen machen insgesamt etwa 85 % der Papierproduktion aus. Die Anteile der Sorten haben sich seit 1990 kaum verschoben.

Abbildung 6-3: Anteile der Sorten an der Papierproduktion in Deutschland



Quelle: VDP

6.1.2 Abgrenzung der Branche

Das Papiergewerbe (Nr. 21 nach WZ 2003) umfasst sowohl die Herstellung der benötigten Holz-, Zell- und Altpapierstoffe (WZ 2003: 21.11), die Herstellung von Papier, Karton und Pappe (WZ 2003: 21.12) als auch die Herstellung von Waren aus Papier, Karton und Pappe (WZ 2003: 21.2). Letzterer Bereich ist aufgrund des vergleichsweise niedrigen Energieverbrauchs nicht Gegenstand dieser Untersuchung[53].

Aufgrund der unterschiedlich stark integrierten Papierstandorte und des hohen Anteils an Stromeigenerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung ist es schwierig, für das Papiergewerbe belastbare und transparente Energiebilanzen zu erstellen. Im Folgenden werden drei Grundlagen diskutiert, die in Tabelle 6-1 zusammengefasst sind.

In der Energiebilanz (AG Energiebilanzen) wird das Papiergewerbe entsprechend als Nr.21 (WZ 2003) definiert und schließt somit die Herstellung von Waren aus Papier, Karton und Pappe (WZ 21.2) ein. Das Statistische Bundesamt weist den Energieverbrauch des Papiergewerbes weiter untergliedert in die WZ-Nummern 21.11, 21.12 und

53 ebenso wird das Verlags- und Druckgewerbe (WZ 2003: Nr. 22) nicht weiter betrachtet.

21.2 aus. Die Werte für 21.11 und 21.12 scheinen jedoch nicht mit dem typischen Energieverbrauch von Papierfabriken und Zellstoff- bzw. Holzstofffabriken übereinzustimmen, weshalb diese beiden Wirtschaftszweige im Folgenden nur in der Summe ausgewiesen werden. Gründe für mögliche Abweichungen liegen vermutlich in den unterschiedlich stark integrierten Papierstandorten. Insgesamt liegt der Energieverbrauch der Wirtschaftszweige 21.11 und 21.12 um etwa 19 % unter dem nach AG Energiebilanzen für das gesamte Papiergewerbe ausgewiesenen Energieverbrauch.

Tabelle 6-1: Energieverbrauch des Papiergewerbes nach unterschiedlichen Statistiken [PJ]

Branchenbezeichnung	**WZ 2003**	**End-energie**	**Brenn-stoffe**	**Strom**	**Quelle**
Papiergewerbe	21.1 + 21.2	242,6	162,2	80,5	AG Energiebilanzen
H.v. Holz- und Zellstoff und H.v. Papier, Karton und Pappe	21.11 + 21.12	196,0	130,5	65,5	Statistisches Bundesamt
„Papierindustrie“	k.A.	-	189,6	74,1	Verband Deutscher Papierfabriken (VDP)

Eine dritte häufig zitierte Quelle zum Energieverbrauch im Papiergewerbe stellt die Statistik des VDP (Verband Deutscher Papierfabriken) dar. Diese wird getrennt für Strom und Brennstoffe ausgewiesen. Die Werte zum Stromverbrauch umfassen dabei sowohl den Fremdbezug von Strom als auch dessen Eigenerzeugung. Zur Definition des Brennstoffbedarfs werden keine weiteren Angaben gemacht, es wird folglich davon ausgegangen, dass es sich um den gesamten Brennstoffbezug der Papierstandorte handelt. Ein Wert für die Summe aus Brennstoffen und Strom wird nicht ausgewiesen. Vermutlich, da sich beide Werte überschneiden und nicht aufsummiert werden können. Ein Teil der Brennstoffe wird zur Stromerzeugung eingesetzt und würde somit doppelt gezählt. Dies liefert auch eine mögliche Erklärung, warum die Werte des VDP gerade bei den Brennstoffen deutlich höher als die des Statistischen Bundesamtes und der AG Energiebilanzen liegen.

Die Werte der AG Energiebilanzen und des Statistischen Bundesamtes sind um industrielle Stromeigenerzeugung korrigiert. D. h. Brennstoffe, die zur Stromerzeugung eingesetzt wurden, sind nicht als Endenergie im Papiergewerbe aufgeführt, sondern im Umwandlungssektor als industrielle Stromeigenerzeugung. Im Falle von Kraft-Wärme-Kopplung wurde eine von der AG Energiebilanzen veröffentlichte Methode verwendet, um den Brennstoffeinsatz auf Wärmeerzeugung und Stromerzeugung aufzuteilen

(AGEB 2010). Ersterer Teil wird als Endenergie im Papiergewerbe bilanziert und der strombezogene Brennstoffanteil dem Umwandlungssektor zugeordnet.

Aufgrund der Doppelzählungen und der fehlenden Korrektur um die Stromeigenerzeugung können die Daten des VDP zum Brennstoffbedarf in dieser Studie nicht genutzt werden. Die Werte für das gesamte Papiergewerbe nach AG Energiebilanzen geben einen Maximalwert für die gesamte Branche an, enthalten jedoch noch die Weiterverarbeitung des Papiers. Die auf dem Statistischen Bundesamt basierenden Werte erscheinen methodisch am besten geeignet und stellen die Grundlage für die Kalibrierung der Bottom-up-Werte zum spezifischen Verbrauch der einzelnen Prozesse und Prozessschritte dar. Diese wiederum dienen als Grundlage für die Berechnung der Einsparpotenziale. Es ist jedoch zu beachten, dass es auf diese Weise nicht möglich war, eine völlige Übereinstimmung mit den Werten der Energiebilanz des Statistischen Bundesamtes zu erreichen. Stattdessen liegt der bottom-up berechnete Strom- sowie Brennstoffverbrauch etwas höher. Die für die Berechnungen unterstellten Werte werden in Kapitel 6.2 hergeleitet und ausgewiesen.

6.1.3 Auswahl der Prozesse

In der modernen Papierherstellung sind die wichtigsten Rohstoffe Holz und Altpapier, aus welchen die benötigten Faserstoffe gewonnen werden. Aus Holz wird in chemischen Verfahren Zellstoff hergestellt, mit Hilfe mechanischer Verfahren gewinnt man Holzstoff. Durch Aufbereitung von Altpapier erhält man den sog. Altpapierstoff. Neben diesen drei Faserstoffarten geht außerdem ein beträchtlicher Teil an Nichtfaserstoffen, nämlich Füll- und Hilfsstoffe, in die Produktion ein.

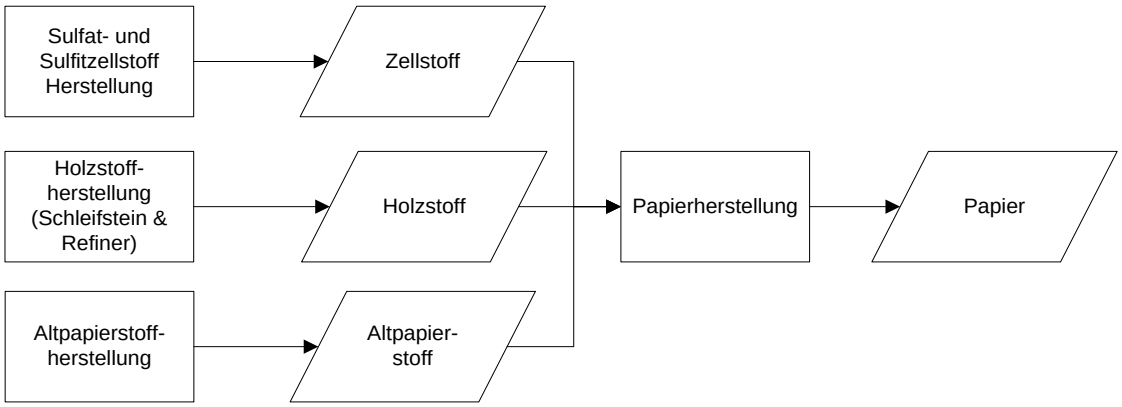
Holz stellt somit den wichtigsten Rohstoff der Papierherstellung dar. Je nach Aufschlussverfahren muss das Holz vorher zu Hackschnitzeln aufbereitet werden (Zellstoff, TMP, CTMP oder RMP) oder kann direkt als Rundholz (GW, PGW) verwendet werden[54]. Ziel des Faseraufschlusses ist es die Fasern von Lignin zu trennen, welches als Bindemittel die Fasern zusammen hält. Der erhaltene Faserstoff geht in Form einer Faser-Wasser Suspension in die Papierherstellung ein. In der Papierfabrik werden die Fasern entsprechend der Papiersorte nachbearbeitet und mit Füllstoffen vermischt, bevor sie in der Papiermaschine zur Papierbahn gepresst werden. Die Papierbahn wird schließlich getrocknet und abhängig von der Papiersorte noch weiteren Stufen der Oberflächenbehandlung unterzogen.

54 Für eine Beschreibung der Aufschlussverfahren siehe Tabelle 6-3.

In Deutschland ist der energetisch bedeutendste Prozess der Papier-Wertschöpfungskette die Papierherstellung, welche die Herstellung einer Papierbahn mit den Ausgangsstoffen Faserstoffe, Zusatzstoffe, Energie und Wasser bezeichnet. Wegen seiner energetischen Bedeutung wird der Schwerpunkt in dieser Studie auf diesem Prozess liegen. Prozesse zur Herstellung der Faserstoffe werden ebenfalls betrachtet. Prozesse am Ende der Wertschöpfungskette (Druckereien etc.) werden aufgrund des vergleichsweise niedrigen Energieverbrauchs nicht in die Betrachtung aufgenommen.

Die resultierende Aufteilung der Prozessschritte für die Berechnung von Energieverbrauch und Einsparpotenzialen ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Von der gesamten Papier-Wertschöpfungskette werden drei alternative Prozessgruppen der Halbstoffherstellung und die Papierherstellung separat im Modell abgebildet. Andere (weniger energieintensive) Prozessschritte werden nicht betrachtet. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Prozesse eher eine Gruppierung von relativ homogenen Prozesstypen beinhalten.

Abbildung 6-4: Schematische Abbildung des Papiergewerbes für die Modellierung



Die verschiedenen Faserstofffamilien und ihre Herstellungsprozesse unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihres Energie- und Rohstoffbedarfs und der angewandten Verfahrensschritte. Zwar haben auch die einzelnen Papiersorten einen unterschiedlichen Energieverbrauch, jedoch sind die Verfahrensschritte auch über die Sorten hinweg noch ähnlich, daher wird die Papierherstellung nicht nach weiteren Sorten unterteilt.

Im Folgenden werden die drei Prozesse der Faserstoffherstellung sowie die eigentliche Papierherstellung beschrieben und die in dieser Studie genutzten Systemgrenzen definiert. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Energieverbrauch der Prozessschritte und seinen Einflussfaktoren.

6.2 Analyse der Prozesse

6.2.1 Zellstoffherstellung

Die weltweite Zellstoffproduktion konzentriert sich auf Länder mit großen Waldvorkommen, z. B. Kanada oder in Europa Skandinavien. Deutschland importiert den Großteil des benötigten Zellstoffs. Während die Holzstoffherstellung meistens am Standort der Papierherstellung erfolgt, gibt es im Bereich der Zellstoffherstellung integrierte und nicht integrierte Fabriken.

Zellstoff wird durch chemische Aufschlussverfahren aus Holz gewonnen. Rundholz wird dabei zuerst mechanisch entrindet und zu Hackschnitzeln verarbeitet. Die Rinde kann thermisch verwertet werden. Anschließend findet in einem Kochprozess bei ca. 130 – 150 °C unter Zugabe von Kochchemikalien und Wasser der Aufschluss, d. h. die Trennung in Fasern, statt. In verschiedenen Stufen werden Prozessparameter variiert und verschiedene zusätzliche Chemikalien beigegebenen. Hierbei wird der Ligninanteil des Holzes vom Zellstoff abgetrennt. Die faserige Struktur bleibt dabei weitgehend erhalten.

Eingesetzt werden kontinuierliche Kocher und sog. Batch-Kocher. Während kontinuierliche Kocher bei gleicher Investition höhere Durchsätze erreichen, wird mit Batch-Kochern, die nach jedem Kochvorgang entladen und neu beladen werden, eine höhere Qualität erreicht. Nach der Kochung wird der Zellstoff abgetrennt, gewaschen und gebleicht. Im Fall von Marktzellstofffabriken wird der fertige Zellstoff zuletzt entwässert und zwischengetrocknet. Dieser Schritt entfällt an integrierten Standorten.

Im Weiteren ist ein erheblicher Aufwand zur Rückgewinnung der Kochchemikalien notwendig, die sich zusammen mit dem abgetrennten Lignin in der sogenannten Ablauge befinden. Dazu wird diese in Verdampfern auf ca. 70–80 % Feststoffgehalt eingedickt und anschließend verbrannt. Die Kochchemikalien lassen sich dann aus der Schmelze rückgewinnen.

Etwa die Hälfte des eingesetzten Holzes wird also verbrannt. Bei Einführung der Ablaugenverbrennung war die hauptsächliche Motivation die Rückgewinnung der Chemikalien. Heute wird die entstehende Wärme als Prozesswärme verwendet und deckt in der Regel den Wärmebedarf der ganzen Zellstofffabrik. Vorhandener Wärmeüberschuss wird an integrierten Standorten als Prozesswärme für die Papierproduktion verwendet. An nicht-integrierten Standorten kann er zur Stromproduktion verwendet werden. Bei modernen effizienten Fabriken übersteigt diese Stromproduktion den Eigenbedarf der Fabrik und die Überproduktion wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

Bei der Zellstoffproduktion wird zwischen dem Sulfatzellstoffverfahren und dem Sulfitzellstoffverfahren unterschieden. Im Folgenden soll auf die jeweiligen Besonderheiten eingegangen werden. Während dem Sulfitzellstoffverfahren in Deutschland noch eine vergleichsweise hohe Bedeutung zukommt, wurden in Europa 2008 nur 2.200 von insgesamt 27.500 t Zellstoff mit dem Sulfitverfahren hergestellt. Der Großteil von 25.300 t wurde mit dem Sulfatzellstoffverfahren hergestellt. Insgesamt wurden in Deutschland in 2008 etwa 1.500 t Zellstoff produziert, während 3.000 t netto importiert wurden (CEPI 2008; VDP 2009a). Weltweit kommt beim Neubau von Anlagen fast ausschließlich das Sulfatverfahren zum Einsatz.

6.2.1.1 Sulfitzellstoffverfahren

Seinen Namen erhält das ***Sulfitzellstoffverfahren*** von den sauren Hauptkochchemikalien Calziumbisulfit und Magnesiumbisulfit, die hierbei neben schwefliger Säure verwendet werden. Obwohl dieses Verfahren einige Vorteile aufweist, wie z. B. eine weniger aufwendige Bleiche, geht seine Bedeutung mehr und mehr zurück. Ein Hauptgrund dafür ist, dass das Sulfitverfahren die Fasern stärker beschädigt als das Sulfatzellstoffverfahren, worunter die Festigkeitseigenschaften des Papieres leiden. Außerdem stand das Verfahren lange Zeit nur zur Verarbeitung von kürzerfaserigen Laubhölzern zur Verfügung während beim Sulfatverfahren auch Laub- und Nadelhölzer verwendet werden können. In der Vergangenheit unterband die über viele Kilometer wahrnehmbare starke Geruchsbildung beim Sulfatverfahren den Einsatz in bewohnten Gebieten und war der Hauptgrund für den Einsatz des Sulfitverfahrens. Inzwischen stehen Techniken gegen die Geruchsbildung zur Verfügung, sodass heute auch in Deutschland Sulfatzellstoffwerke gebaut werden oder Sulfitzellstoffwerke auf das Sulfatverfahren umgerüstet werden. Der heutige Betrieb von Sulfitzellstoffwerken ist somit hauptsächlich vor Hintergrund der langen Investitionszyklen zu sehen. Sulfitzellstoff wird in Deutschland derzeit in 4 integrierten Papierfabriken produziert.

6.2.1.2 Sulfatzellstoffverfahren (Kraftzellstoff)

Die Hauptkochchemikalien beim Sulfatzellstoffverfahren sind Natriumhydroxid NaOH (Ätznatron) und Natriumsulfid Na_2S. Besonders charakteristisch für Sulfatzellstoff sind die unübertroffen hohen Festigkeitswerte, weshalb er auch Kraftzellstoff genannt wird. Allerdings hat es mit ca. 45–50 % von allen Verfahren auch die niedrigste Ausbeute. Die Bleiche, bei der nach der Kochung noch verbleibende Ligninanteile entfernt werden, kann dabei einen Unterschied von bis zu weiteren 5° % Verlust bezogen auf die Tonne Holz ausmachen. Die Festigkeitswerte von gebleichtem Sulfatzellstoff sind geringer als von ungebleichtem, da die Bleiche die Fasern angreift. Sie sind jedoch immer noch höher als die von ungebleichtem Sulfitzellstoff (Bos, Staberock 2006 S.542).

Beim Verbrennen der Ablauge entsteht Natriumcarbonat (Na_2CO_3), dass durch Kaustifizierung in Natriumhydroxid (NaOH) rückgewandelt wird. Der dafür eingesetzte Löschkalk muss danach in einem Kalkofen vor der Wiederverwendung rückgebrannt werden. Der Kalkofen ist einer der größten Energieverbraucher der Fabrik. Tabelle 6-2 zeigt wie sich der Energieverbrauch einer typischen Sulfatzellstofffabrik auf die einzelnen Prozessschritte aufteilt.

Tabelle 6-2: Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch der Sulfatzellstoffherstellung

Prozessschritt	**Strom**		**Brennstoffe/Wärme**	
	[kWh/t]	[GJ/t]	[kWh/t]	[GJ/t]
Holzbehandlung	44	0,16	34	0,12
Kochung	64	0,23	450	1,62
Wäsche+Siebung	89	0,32	0	0,00
Delignifizierung	44	0,16	90	0,32
Bleiche	81	0,29	113	0,41
Trocknung	103	0,37	563	2,03
Eindickung durch Verdampfung	28	0,10	900	3,24
Boiler	58	0,21	135	0,49
Kalkofen	17	0,06	338	1,22
Diverses	111	0,40	450	1,62
Summe	639	2,30	3.071	11,06

Quelle: Eigene Anpassungen nach European IPPC Bureau 2010

In Deutschland befinden sich zwei (nicht integrierte) Sulfatzellstoffwerke seit 1999 bzw. 2004 im Betrieb. Sie weisen eine Kapazität von 330.000 bzw. 645.000 Tonnen Zellstoff pro Jahr auf und nehmen am Emissionshandel teil. Beide Werke sind mit einer KWK Anlage (57 MW_{el}, 100 MW_{el}) ausgestattet und erreichen einen jährlichen Stromüberschuss von 30-40 %. Als Brennstoffe werden die Ablauge (hauptsächlich Lignin des Holzes) und andere Biomasseabfälle aus der Produktion genutzt. Die relativ jungen Werke sind somit vollständig energieautark und im europäischen Vergleich eher energieeffizient.

6.2.2 Holzstoffherstellung

Holzstoff wird durch mechanische Aufschlussverfahren aus Holz gewonnen. Das Holz wird durch mechanische Scherkräfte zerkleinert. Ein Großteil der in das Holz eingebrachten Energie wird dabei als Wärme dissipiert. Beim Holzschliffverfahren werden

etwa 95 % der eingebrachten mechanischen Energie in Wärme umgewandelt. Die Wärmeentwicklung ist so gewaltig, dass das Holz befeuchtet werden muss, damit es während des Schleifens nicht verbrennt. Es wird somit viel Kraft (über Strom erzeugt) und keine externe Wärme benötigt. Im Gegensatz zu den Zellstoffverfahren verbleibt bei der Holzstoffherstellung ein Großteil des Lignins im Faserstoff und die Ausbeuten sind deutlich höher, typischerweise 900 kg Holzstoff je Tonne Holz oder mehr (Bos, Staberock 2006). Durch den hohen Ligninanteil vergilbt das Papier schneller als Papier auf Basis von Zellstoff. Auch ist die Reißfestigkeit niedriger, da die Holzfasern beim mechanischen Aufschluss beschädigt werden. Des Weiteren sind die kapazitätsspezifischen Investitionen deutlich niedriger als in der Zellstoffproduktion und die Produktion findet fast immer am Standort der Papierproduktion statt (Fehrenbach 2008).

Die wichtigsten Verfahrensvarianten zur Holzstoffherstellung werden in Tabelle 6-3 überblicksartig dargestellt. Die Varianten liefern Stoffe unterschiedlicher Eigenschaften und sind nur sehr begrenzt substituierbar. Die weite Spreizung der Energieintensität ist dabei nicht primär auf unterschiedliche Effizienzniveaus zurückzuführen. Vielmehr überlagern sich hierbei mehrere Faktoren, wie z. B. der Mahlgrad (European IPPC Bureau 2010) oder der Einsatz verschiedener Holzsorten, aber auch die Vorwärmung des Holzes.

Tabelle 6-3: Energieintensität verschiedener mechanischer Aufschlussverfahren [MJ/t Holzstoff]

Abkürzung	**Verfahren**	**Beschreibung**	**Strombedarf**
GW	Groundwood	Holzschliff: Holzprügel werden auf dem Schleifstein zerschliffen.	4.000-7.900
PGW	Pressure Groundwood	Druckschliff: GW unter Überdruck und erhöhter Temperatur.	4.000-7.900
RMP	Refiner Mechanical Pulp	Zerfaserung von Hackschnitzeln durch Refiner.	5.800-10.800
TMP	Thermo-Mechanical Pulp	RMP unter Überdruck und erhöhter Temperatur; heute die am häufigsten eingesetzte Verfahrensvariante	6.500-13.000
CTMP	Chemo-Thermo-Mechanical Pulp	TMP mit chemischer Vorbehandlung der Hackschnitzel. Diese kann von unterschiedlicher Intensität und Dauer sein.	3.600-15.500

Quelle: European IPPC Bureau 2010

Im Jahr 2008 wurden in Deutschland 1.382 kt Holzstoff produziert. Davon entfielen 410 kt auf das TMP-Verfahren und 972 kt auf den Holzschliff. Weitere Verfahren kamen in Deutschland nicht zum Einsatz. Beide Verfahren sind im Folgenden beschrieben.

6.2.2.1 Holzschliff-Verfahren

Der Holzschliff (Groundwood) stellt das traditionelle und einfachste Verfahren dar. Hierbei wird das Holz bei Umgebungsdruck auf einen Schleifstein gedrückt um in mehreren Schritten die Fasern aufzuschließen. Der resultierende Holzstoff stellt das billigste Fasermaterial dar (relativ kurze Fasern, hoher Lignin-Gehalt) und je nach angestrebter Papiersorte muss bei der Papierherstellung Zellstoff hinzugefügt werden, um die Qualitätsmerkmale einzuhalten. Eine Weiterentwicklung des Holzschliffs stellt das Druckschliffverfahren dar, bei welchem der Schleifprozess bei einem Druck von etwa 2 Bar und höherer Temperatur stattfindet. Das Verfahren ermöglicht die Gewinnung eines größeren Anteils von langen Fasern und somit höherer Festigkeit.

Tabelle 6-4: Annahmen zum Energieverbrauch der Holzstoffherstellung mit dem Holzschliff-Verfahren (Bezugsgröße für die Angaben ist die produzierte Menge Holzstoff)

Prozessschritt	**Strom**		**Brennstoffe/Wärme**	
	[kWh/t]	[GJ/t]	[kWh/t]	[GJ/t]
Holzbehandlung	50	0,18	0,15	42
Schleifen	1.800	6,48		
Wäsche	50	0,18		
Bleiche	100	0,36		
Wärmerückgewinnung	0	0,00	-2,15	-597
Summe	2.000	7,20	-2,00	-556

Quelle: Werte angepasst, basierend auf European IPPC Bureau 2010

6.2.2.2 Refiner-Verfahren

Anstatt des Schleifsteins werden seit den 60er Jahren auch Refiner zur Holzstoffherstellung verwendet. Refiner mahlen die Holzschnitzel zwischen zwei metallischen, flachen oder konischen Refinerscheiben mit teilweise relativ komplex strukturierten Oberflächen. Eine der die Scheiben treibenden Wellen ist als Hohlwelle ausgeführt, durch die Holzhackschnitzel zwischen die Scheiben gelangen und sich während der Mahlung in radialer Richtung nach außen bewegen. Es können sich dabei entweder beide Scheiben gegeneinander drehen oder eine Scheibe statisch sein. Im Unterschied zum Holzschliff werden bei den Refiner-Verfahren Hackschnitzel als Rohstoff benötigt.

Das einfachste Refiner-Verfahren stellt das RMP(Refiner mechanical pulp)-Verfahren dar, welches bei Umgebungsdruck arbeitet und Holzstoff mit ähnlicher Qualität wie beim Holzschliff liefert. Das TMP (Thermo-mechanical pulp)-Verfahren ist das weltweit

am weitesten verbreitete Refiner-Verfahren und wird auch in neuen Anlagen am meisten eingesetzt. Im Gegensatz zum RMP ist beim TMP Verfahren die Temperatur in der Mahlzone höher und es ergibt sich ein höherer Anteil Langfasern. Die Festigkeit genügt damit dem Einsatz für Zeitungsdruckpapier, ohne dass teurer Zellstoff hinzugefügt werden muss (Bos, Staberock 2006 S.70).

Generell ist der Energieverbrauch bei Refiner-Verfahren im Vergleich zu Holzschliffverfahren um etwa 50 % höher (Bos, Staberock 2006 S.71). Durch die niedrigere Zellstoffzugabe bei der Papierherstellung können die Zusatzkosten jedoch wieder kompensiert werden.

6.2.3 Altpapierstoffherstellung

Altpapier wird hauptsächlich im Zeitungsdruckpapier- und im Verpackungsbereich, aber auch im Hygienebereich eingesetzt.

Je nach Bestimmung des Altpapierstoffes unterscheiden sich die geforderten Eigenschaften und somit der Aufbereitungsprozess. Dies trifft insbesondere in Bezug auf die optischen Eigenschaften zu. Hier wird ein Großteil der Druckerfarben entfernt (das sogenannte Deinking).Werden hohe Anforderungen an den Altpapierstoff gestellt, kann die Aufbereitung relativ komplex werden. Die wichtigsten und am häufigsten eingesetzten Verfahrensschritte werden im Folgenden beschrieben.

Tabelle 6-5: Energieverbrauch nach Prozessschritten bei der Altpapieraufbereitung wie er für die Modellrechnungen hinterlegt wurde (bezogen auf den Faserstoffdurchsatz)

Prozessschritt	**Strom**		**Brennstoffe**	
	[kWh/t]	[GJ/t]	[kWh/t]	[GJ/t]
Stofflösung	40	0,14		
Sieben und Reinigen	50	0,18		
De-Inking	80	0,29		
Eindicken und Dispergieren	40	0,14	150	0,54
Bleichen	30	0,11		
Weitere	20	0,07		
Summe	260	0,94	150	0,54

Quelle: Werte angepasst, basierend auf European IPPC Bureau 2010

Die Altpapieraufbereitung beginnt mit der Auflösung des Papieres in einzelne Fasern in einem Stofflöser, dem so genannten Pulper. Dabei handelt es sich um ein Gefäß mit

einer Wendel, die das Papier so lange umwälzt, bis die Bindungen zwischen den Fasern aufbrechen und eine Fasersuspension entsteht.

Im Weiteren werden Verunreinigungen wie Kleber, Folien, Klammern entfernt. Störstoffe unterschiedlicher Eigenschaften werden durch eine Reihe mechanischer Verfahren (Sortierung, Siebung, Filtration) und Fliehkraftabscheider (auch Hydrocyclones oder Cleaner genannt) abgesondert. Erstere Verfahren nutzen unterschiedliche Partikelgrößen zur Trennung, letztere unterschiedliche Dichten.

Den wichtigsten Deinking-Prozessschritt stellt die Flotation dar. Hierbei wird die unterschiedliche Hydrophilie von Druckerfarben und Fasern unter Zuhilfenahme von Chemikalien, z. B. Natriumseife, ausgenutzt, indem in so genannten Flotationszellen durch Einblasen von Luft, die sich an den Farbpartikeln anhaftet, die Farbe an die Oberfläche transportiert wird, wo sie dann abgeräumt werden kann.

6.2.4 Papierherstellung

Nach der Herstellung des Fasermaterials wird in einem zweiten Schritt daraus das fertige Papierprodukt hergestellt. Es lassen sich zwei grundlegende Produktionsstufen unterscheiden: die Stoffaufbereitung samt Konstantteil und die Papiermaschine (Abbildung 6-5).

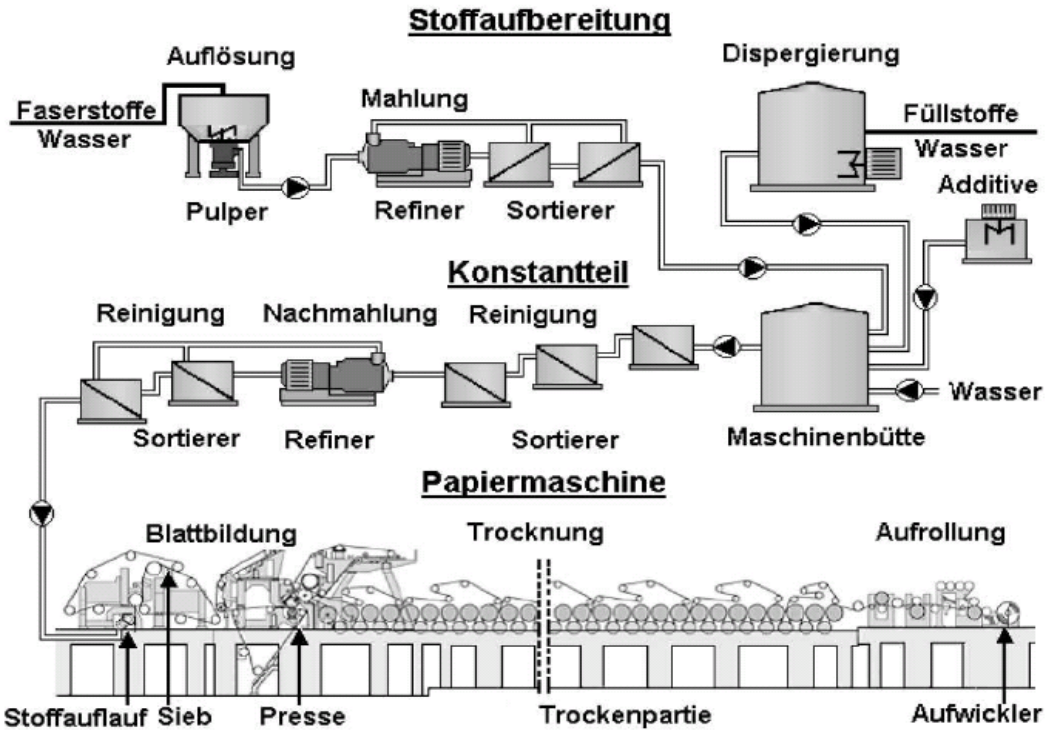
Nach der Papiermaschine folgt noch die Veredelung (Bestreichen mit Farbe, Glätten etc.), auf die wegen ihres eher niedrigen Energieverbrauchs hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Da sowohl die Produktion auf der Papiermaschine als auch das fertige Produkt genaue Anforderungen an die Eigenschaften des eingesetzten Stoffgemischs stellen, ist es Ziel und Zweck der ***Stoffaufbereitung***, einen konstanten Stoffstrom zur Verfügung zu stellen. Dies ist insbesondere dann anspruchsvoll, wenn die Eigenschaften der eingesetzten Halbstoffe nicht zeitlich konstant sind.

Um dem Faserstoff die für die jeweilige Papiersorte benötigten Eigenschaften zu garantieren, wird er häufig in der Papierfabrik in einem Refiner nachgemahlen. Je nach Fasermaterial und Papiersorte kann dieser Produktionsschritt sehr energieintensiv sein.

Die ***Papiermaschine*** transformiert die Fasersuspension zu einer Papierrolle in den Schritten Stoffauflauf, Siebpartie, Pressenpartie, Trockenpartie und Aufrollung. Beim Stoffauflauf wird die Fasersuspension mit ungefähr 1 % Feststoffgehalt auf das Sieb aufgebracht, auf dem die Blattbildung stattfindet. Am Ende der Siebpartie ist der Feststoffgehalt bereits auf ca. 16 bis 25 % gestiegen.

Abbildung 6-5: Prozessschritte bei der Papierherstellung



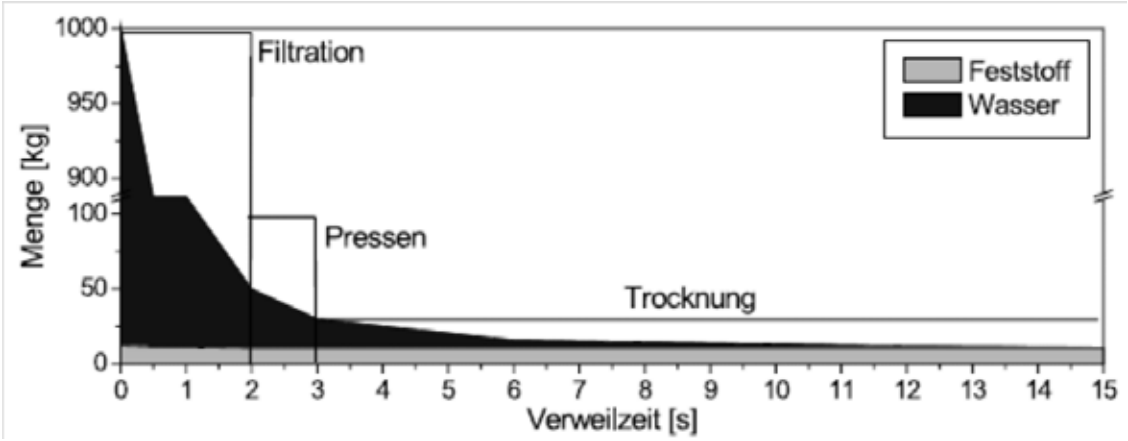
Quelle: Stumm 2007

In der Folge wird die Papierbahn in der Pressenpartie mechanisch weiter entwässert. Dabei handelt es sich im einfachsten Fall um eine Abfolge von Presswalzenpaaren, welche die Papierbahn durchläuft. Nach der Pressenpartie beträgt der Trockengehalt bei modernen Anlagen bereits 50 bis 55 %. Zwar verbraucht die mechanische Entwässerung in der Pressenpartie deutlich weniger Energie als die darauf folgende thermische Trocknung, jedoch sind dem in der Pressenpartie maximal erreichbaren Trockengehalt Grenzen gesetzt. Eine Innovation in diesem Bereich war insbesondere die Schuhpresse, mit der sich der Trockengehalt in der Pressenpartie deutlich erhöhen ließ.

Das verbleibende Wasser muss über thermische Trocknung bis auf eine Restfeuchte von 2 bis 10 % aus der Papierbahn verdampft werden. Dies geschieht in der Trockenpartie, dem längsten Teil der Papiermaschine. Das klassische Trocknungsverfahren führt die Papierbahn über Trockenzylinder, die mit Dampf auf bis zu 100 °C aufgeheizt sind. Üblicherweise überquert die Papierbahn nacheinander ca. 40 bis 50 Trockenzylinder, die die Papierbahn erhitzen und das darin enthaltene Wasser verdampfen. Die Wärme im Abluftstrom kann rückgetauscht und zur Vorwärmung der Frischluft verwendet werden.

Der Großteil der Papiermaschine und ihres Energieeinsatzes entfällt auf das Entfernen von Wasser aus der Papierbahn (Abbildung 6-6). Eine energieeffiziente Papiermaschine bedeutet also weitgehend eine energieeffiziente Entwässerung und Trocknung. Dabei steigt mit abnehmendem Wassergehalt der zur weiteren Entfernung von Wasser nötige (Energie-)Aufwand immens.

Abbildung 6-6: Wassergehalt und Verweilzeit bei der Entwässerung der Papierbahn in der Papiermaschine



Quelle: Stumm 2007

Aktuelle Papiermaschinen verfügen über bis zu 12 m Bahnbreite, sind bis zu 250 m lang und wiegen bis zu 5.000 Tonnen. Sie gehören somit zu den größten Industriemaschinen (Stumm 2007). Die Geschwindigkeit der Papierbahn beträgt bis zu 2.200 Meter pro Minute (~132 km/h). Somit entsteht aus einer Fasersuspension mit ca. 1 % Feststoffgehalt (also 99 % Wasser) innerhalb weniger Sekunden eine fertige, aufgewickelte Papierbahn. Die Jahresproduktion beträgt bei großen Papiermaschinen bis zu 600.000 Tonnen, dies entspricht einer Produktionsmenge von 70 Tonnen pro Stunde. Typischerweise produziert eine Papiermaschine ca. 8.300 Stunden im Jahr und kostet 100 bis 500 Mio. € (Blum et al. 2007). Produktionskapazität- und Geschwindigkeit sind somit wichtige Entscheidungsfaktoren für Investitionen in der Papierherstellung.

Der Energieverbrauch einer Papierfabrik kann im Einzelfall stark variieren und hängt neben dem Einsatz von effizienten Verfahren und Techniken von weiteren eher strukturellen Faktoren ab. Einige davon bedingen sich gegenseitig.

· Teilweise erhebliche Unterschiede ergeben sich bei verschiedenen Papiersorten durch unterschiedliche Anforderungen an die einzelnen Prozessschritte (Blum, Hutter 2008). In einer Erhebung zum Stromverbrauch von Papiermaschinen verschiedener Sorten wurde für Grafisches Papier 417 kWh/t Papier, für Verpackungspapie-

re 131 kWh/t, für Hygienepapiere[55] 884 kWh/t und für Spezialpapiere 212 kWh/t ermittelt (IUTA et al. 2008).

- Findet die Faserstoffherstellung am Standort der Papierfabrik statt (integrierte Papierfabrik), so ergeben sich Möglichkeiten Energie einzusparen, indem Prozessschritte substituiert werden können (Trocknung des Faserstoffs, Stoffauflösung). Bedeutend sind hier die Nutzung von Abwärme der Refiner oder des Holzschliffs bei der Holzstofferzeugung, der direkte Einsatz einer Faser-Wasser-Suspension anstatt getrockneten Faserstoffs, der bei nicht integrierten Werken zunächst im Pulper gelöst werden muss und auch geringerer Aufwand für die Nachmahlung des Faserstoffs, da dieser bereits bei der Erstmahlung besser auf die zu produzierenden Papiersorten abgestimmt werden kann.
- Die Papiersorte und damit die Festigkeit und Opazität sowie die Oberflächenbeschaffenheit des Papiers und die flächenbezogene Masse der Papierbahn (siehe Abbildung 6-6). Letztere ist insbesondere für den hohen massebezogenen Energieverbrauch bei den Hygienepapieren verantwortlich.
- Der Standort der Papierfabrik (Einfluss der Klimazone)
- Die Beschaffenheit des Faserstoffs (z. B. Länge der Fasern)
- Veredelungsschritte und geforderte Papierqualität (Strich, Oberflächenbearbeitung).

Nicht zuletzt aufgrund der sehr niedrigen Datenverfügbarkeit zum tatsächlichen Energieverbrauch von Papierfabriken kann im Rahmen der Modellierung nicht auf all diese Effekte eingegangen werden. Stattdessen wird mit literaturbasierten Annahmen gearbeitet, die den typischen Energieverbrauch einer durchschnittlichen Papierfabrik wiedergeben. Tabelle 6-6 zeigt die Annahmen zur Aufteilung des Stromverbrauchs auf die einzelnen Prozessschritte einer „mittleren Papierfabrik“. Diese Aufteilung bestimmt grundlegend das Einsparpotenzial durch den Einsatz neuer Techniken und optimierter Verfahren. Gleichzeitig können die Werte in einzelnen Papierfabriken jedoch deutlich von diesen mittleren Annahmen abweichen. Hierbei wurden Überschneidungen mit den anderen modellierten Prozessen berücksichtigt. So wurde beispielsweise für den Prozessschritt der Stoffauflösung angenommen, dass er nur in einem kleinen Teil der Papierfabriken eingesetzt wird und ansonsten bereits im Prozess Altpapieraufbereitung enthalten ist.

Der Wärmebedarf fällt vorwiegend in der Trockenpartie an während weitere, deutlich kleinere Wärmesenken typischerweise durch Abwärme aus der Trockenpartie gedeckt werden.

---

55 Für Hygienepapiere beruht die Erhebung auf zwei Papiermaschinen, während es für die anderen Sorten 4 bis 15 sind.

Tabelle 6-6: Annahmen zum Energieverbrauch für den Prozess „Papierherstellung“ nach Prozessschritten

Prozessschritt	**Prozessteilschritt**	**Strom**		**Brennstoffe**	
		[kWh/t]	[GJ/t]	[kWh/t]	[GJ/t]
Stoffaufbereitung	Auflösung, Pulper	10	0,04		
	Refiner	130	0,47		
	Stoffaufbereitung	30	0,11		
Papiermaschine	Stoffauflauf	40	0,14	153	0,55
	Siebpartie/Blattbildung	30	0,11		
	Pressen	100	0,36		
	Trockenpartie	90	0,32	1.069	3,85
	Oberflächenbeschichtung und Veredelung	40	0,14	153	0,55
Weitere	Allgemeiner Energieverbrauch (Abwasser, Druckluft)	60	0,22	153	0,55
Summe		530	1,91	1.528	5,5

Quelle: Basierend auf Blum et al. 2007; Brand et al. 2005; European IPPC Bureau 2010; IUTA et al. 2008

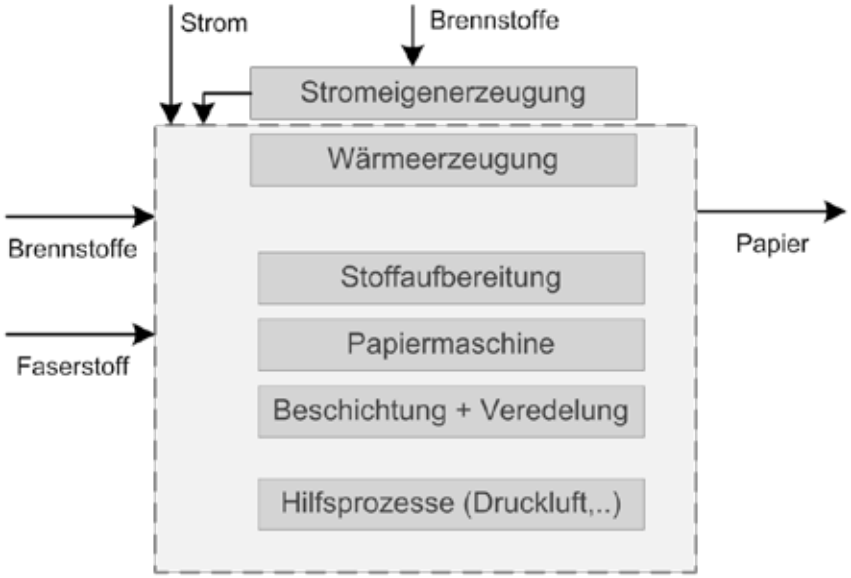
Für eine tiefere Diskussion des spezifischen Energieverbrauchs der einzelnen Prozessschritte wird an die folgenden Studien verwiesen. Von IUTA et al. (IUTA et al. 2008) wurde eine Umfrage unter deutschen Papierfabriken zum spezifischen Energieverbrauch nach Papiersorte und Prozessschritt durchgeführt. Aufgrund der kleinen Stichprobe sind die Ergebnisse jedoch nur bedingt zu verallgemeinern und noch großen Spannbreiten ausgesetzt. Wohl die umfangreichsten Angaben zum typischen Energieverbrauch nach Prozessschritten werden im Rahmen des Europäischen IPPC[56] Prozesses gemacht (Blum et al. 2007; European IPPC Bureau 2010). Auch hier zeigt die teils große Spannbreite wie unterschiedlich die Situation in einzelnen Papierfabriken sein kann.

Die gewählte Abgrenzung des Prozesses „Papierherstellung“ ist in Abbildung 6-7 illustriert. Stromeigenerzeugung ist demnach außerhalb der Systemgrenzen und wird nicht in die Berechnungen aufgenommen. Stattdessen wird im Folgenden Strombedarf immer als genutzte Eigenerzeugung und Fremdbezug definiert. Brennstoffe, die zur Eigenerzeugung eingesetzt werden, werden nicht bilanziert. Folglich sind mögliche Ein-

56 Integrated Pollution Prevention and Control

sparungen am Kraftwerk oder der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung nicht Gegenstand der Analyse von Einsparpotenzialen.

Abbildung 6-7: Systemgrenzen für die Modellierung des Prozesses „Papierherstellung“



6.2.5 Zusammenfassung: THG-Emissionen und Energieverbrauch

Bezüglich der Abgrenzung der einzelnen Prozesse und der Definition von sinnvollen Systemgrenzen stellen die unterschiedlich stark integrierten Papierwerke eine große Herausforderung dar.

Für die Berechnung des Energieverbrauchs der betrachteten Prozesse werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Eigenproduktion von Strom wird nicht berücksichtigt. D. h. es wird die im Prozess benötigte Strommenge zugrunde gelegt und nicht der Brennstoffeinsatz einer möglichen Eigenerzeugung von Strom. Entsprechend wird auch der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung nicht betrachtet.
- Der Energieverbrauch einer Papier- oder Faserstofffabrik ist geringer, wenn beide Wertschöpfungsschritte in einem integrierten Standort erfolgen, d. h. der Zell- oder Holzstoff am Standort der Papierproduktion hergestellt wird. Integrierte Papierfabriken bieten zum einen bessere Möglichkeiten der Abwärmenutzung (So kann die Abwärme des Refiners für die Trocknung der Papierbahn in der Papiermaschine eingesetzt werden), und erlauben den Verzicht auf einzelne Prozessschritte, wie

den Pulper. Im Pulper wird das angelieferte getrocknete Fasermaterial zu einer Suspension mit niedrigem Anteil Trockenmasse gelöst. Weiterhin erlaubt die integrierte Faserstoffherstellung, die Eigenschaften des Faserstoffs über den Mahlgrad besser an die zu produzierende Papiersorte anzupassen und somit den Strombedarf für eine Nachmahlung zu reduzieren. Bei der Holz- bzw. Zellstoffproduktion entfällt die Trocknung des Fasermaterials.

Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit von Daten zum spezifischen Energieverbrauch einzelner Prozesse in der Papier-Wertschöpfungskette müssen eigene Schätzungen basierend auf möglichst aktuellen Literaturwerten erstellt werden. Diese wurden im Laufe des Forschungsvorhabens im Gespräch mit Experten weiter untermauert und angepasst. Tabelle 6-7 zeigt den spezifischen Energieverbrauch für die sechs definierten Prozessschritte, aufgeteilt auf Brennstoffe und Strom.

Tabelle 6-7: Annahmen zum spezifischen Energiebedarf nach Prozessen im Jahr 2007

	Spez. Energiebedarf			**Produktion**	**Absoluter Energiebedarf**			**Anteile**
	Strom [kWh/t]	Strom [GJ/t]	Brennstoffe [GJ/t]	[kt/a]	Strom [TJ]	Brennstoffe [TJ]	Summe [TJ]	[%]
Papier	530	1,9	5,5	23.319	44.493	128.255	172.747	71 %
Sulfitzellstoff	639	2,3	15,0	641	1.474	9.615	11.089	5 %
Sulfatzellstoff	639	2,3	11,0	915	2.105	10.065	12.170	5 %
Holzschliff	2.000	7,2	-1,2	1.037	7.469	-1.245	6.224	3 %
TMP	2.694	9,7	-4,0	419	4.061	-1.675	2.387	1 %
Altpapierstoff	260	0,9	0,54	15.737	14.730	8.498	23.228	10 %

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Blum et al. 2007; European IPPC Bureau 2010; Worrell et al. 2007

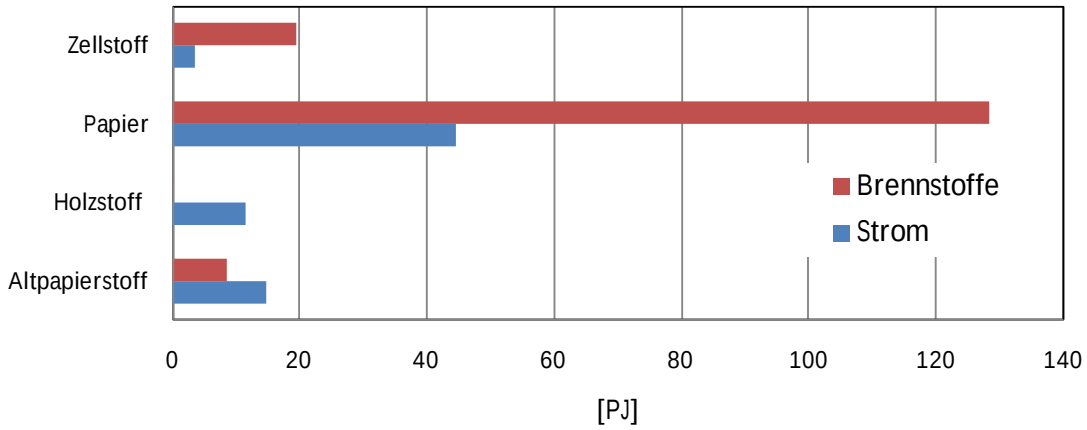
Berechnet man (bottom-up) den absoluten Energiebedarf der Prozesse, über die Produktion im Jahr 2007 so lässt sich über einen Vergleich mit der amtlichen Energiebilanz des Papiergewerbes ermitteln wie realitätsnah die Annahmen in der Summe sind. [57] Insgesamt können über die einzelnen Prozesse mit den getätigten Annahmen 97 % des Energiebedarfs des Papiergewerbes erklärt werden. Am bedeutendsten ist die Papierherstellung mit 76 % am Endenergiebedarf des Papiergewerbes. Die fünf Prozesse zur Faserstoffherstellung kommen in Summe auf 21 %. Gründe für den relativ

57 Auch die Energiestatistik des Statistischen Bundesamtes ermöglicht keine weitere Untergliederung des Papiergewerbes als die Energiebilanz mit dem Wirtschaftszweig 21 nach WZ2003.

niedrigen Anteil der Faserstoffherstellung sind der Netto-Import von Faserstoffen und der vergleichsweise niedrige Energieverbrauch der Faserstoffherstellung auf Basis von Altpapier. Folglich wird auch in der Auswahl und Analyse der Einsparmöglichkeiten der Schwerpunkt auf der Papierherstellung liegen.

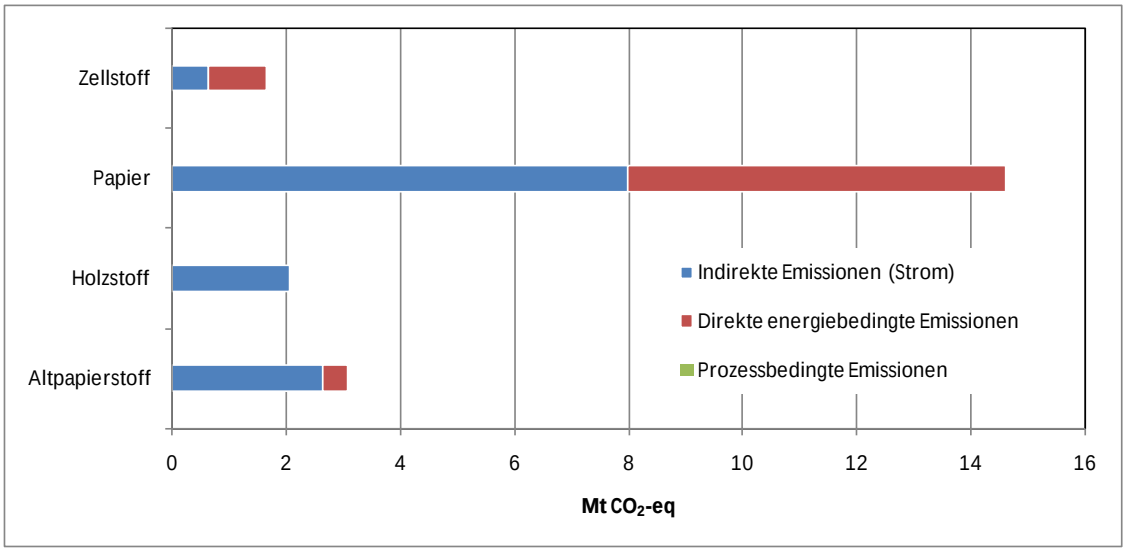
Basierend auf obigen Angaben ergibt sich für das Jahr 2007 der folgende Energieverbrauch für die einzelnen betrachteten Prozesse. Dieser stellt die Grundlage für weitere Berechnungen zu Einsparpotenzialen dar.

Abbildung 6-8: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 5.1 bis 5.2.5 genannten Datenquellen und Annahmen

Abbildung 6-9: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 5.1 bis 5.2.5 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 6-8: Stromverbrauch, Brennstoffbedarf und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO_2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Altpapierstoff	14,79	8,50	-	2,65	0,44
Holzstoff	11,53	- 2,93	-	2,06	- 0,15
Papier	44,54	128,25	-	7,97	6,63
Zellstoff	3,55	19,54	-	0,64	1,01

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in Kapitel 5.1 bis 5.2.5 genannten Datenquellen und Annahmen

Betrachtet man die Treibhausgasemissionen der Prozesse im Vergleich, so ergibt sich grundsätzlich ein ähnliches Bild wie für den Energieverbrauch: der Prozess der Papierherstellung weist mit 14-15 Mt CO_2 pro Jahr die höchsten Emissionen auf (siehe Abbildung 6-1).

6.3 Analyse der Einsparoptionen

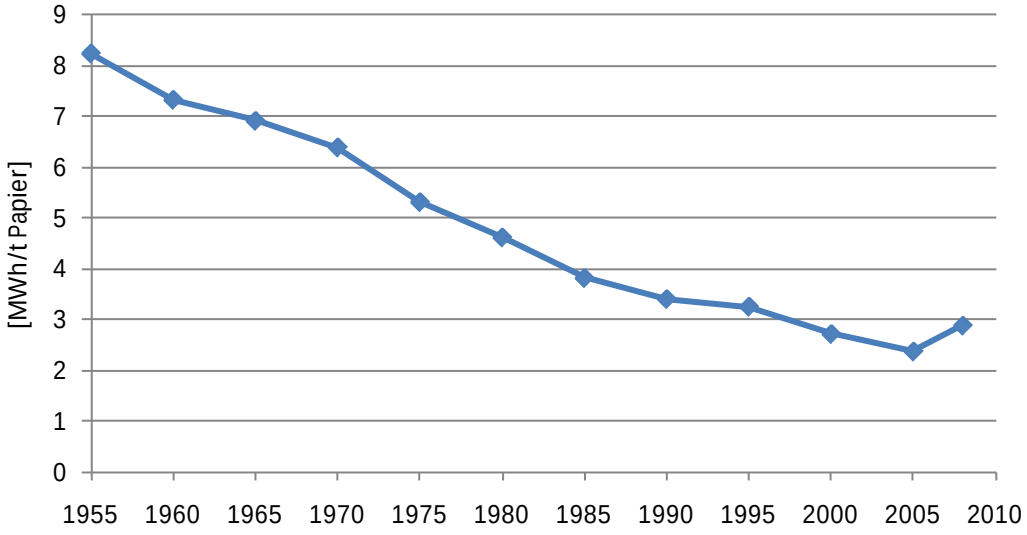
6.3.1 Überblick

Seit 1955 ist der spezifische Energieeinsatz der Papierherstellung in Deutschland deutlich gefallen. Während im Jahr 1955 noch durchschnittliche 8240 kWh/t Papier an Strom und Brennstoffen verbraucht wurden, so lag dieser Wert im Jahr 2005 nur noch bei etwa 29 % bzw. 2380 kWh/t (siehe Abbildung 6-10). Insbesondere der Verbrach an Brennstoffen ging stark zurück, während der Stromverbrauch mit ca. 1.000 kWh/t Papier in etwa auf gleichem Niveau geblieben ist. Die Bedeutung von Strom als Energieträger nahm somit über die vergangenen 50 Jahre erheblich zu.

Laut LfU und PTS (2002) hat eine Reihe von unterschiedlichen Faktoren diese Entwicklung vorangetrieben. Darunter fällt der verstärkte Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung, die Rückgewinnung von Abwärme, eine Verbesserung der mechanischen Entwässerung, die Substitution von Holzstoffen durch Altpapiereinsatz und Füllstoffe, sowie generell der Einsatz von Aggregaten mit höherem Wirkungsgrad. Auch der Trend hin zu größeren und schnelleren Papiermaschinen hat zu Verbesserung des spezifischen Energieverbrauchs beigetragen. Zur Verringerung der Treibhausgasemissionen trug nicht zuletzt ein grundlegender Wechsel der eingesetzten Brennstoffe bei. Während 1955 noch über 80 % des Energiebedarfs der deutschen Papier und Zellstoffindustrie durch Kohle gedeckt wurden, so waren es im Jahr 2000 nur noch etwas mehr als 10 %. Stattdessen werden verstärkt Erdgas (~40 %) und Sekundärbrennstoffe

(~15 %) eingesetzt. Im gleichen Zeitraum ist auch der Anteil des Strombedarfs von ca. 12 % auf 30 % angestiegen (LfU, PTS 2002).

Abbildung 6-10: Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes der Papierherstellung, bezogen auf die jährliche Papierproduktion



Quelle: VDP 2009a

Trotz dieser deutlichen Verbesserung der Energieeffizienz in der Vergangenheit sind noch weitere Einsparpotenziale ungenutzt und es besteht weiterhin eine große Vielzahl an Möglichkeiten, den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen zu senken. Wenn auch eine vollständige Betrachtung aller Optionen zur Effizienzsteigerung aufgrund der enormen Vielfalt nicht möglich ist, so sollen im Folgenden diejenigen Optionen mit dem höchsten Potenzial vorgestellt und diskutiert werden.

Der Schwerpunkt wird hierbei auf Optionen zur Verbesserung der Energieeffizienz der Papiermaschine liegen, da diese den mit Abstand höchsten Energieverbrauch der betrachteten Prozesse aufweist. Einsparmöglichkeiten ergeben sich hier hauptsächlich durch eine effizientere Trocknung und Mahlung (Refiner), aber auch durch die Rückgewinnung und Nutzung von Abwärme. In der Zellstoffherstellung ist die Vergasung der Schwarzlauge eine viel diskutierte Option mit hohem Potenzial, die allerdings noch keine Marktreife erlangt hat. Bei der Holzstoffherstellung (sowohl Holzschliff als auch Refinerverfahren) sind vorwiegend neuartige Refiner und Schleiftechniken in der Diskussion, als auch eine bessere Nutzung der enormen Abwärmemengen sowie eine mögliche enzymatische Vorbehandlung des Holzes zur Reduzierung der mechanischen Aufschlussarbeit.

Weiterhin werden die Möglichkeiten der wasserlosen Papierherstellung diskutiert, einer radikalen Prozessinnovation mit dem Ziel den Energiebedarf für die Trocknung der Papierbahn zu senken. Auch die Substitution von Holz als Papierrohstoff birgt hohe Einsparpotenziale indem die energieaufwendige Herstellung von Zell- und Holzstoff umgangen wird. Zum einen ist dies durch eine Erhöhung der Altpapiereinsatzquote möglich und zum anderen durch den Einsatz anderer faserloser Füllstoffe.

In der hoch mechanisierten Papierherstellung wird eine große Anzahl an Elektromotoren aller Größenklassen eingesetzt. Beim TMP-Refiner z. B. werden Motoren bis zu einer Leistung von 20 MW eingesetzt (Bos, Staberock 2006 S.73). Weiterhin werden Elektromotoren zum Antrieb einer Vielzahl von Pumpen und Pressen benötigt. Die beträchtliche installierte Motorenleistung zusammen mit den typischen hohen jährlichen Laufzeiten machen den Einsatz von hocheffizienten Motoren in der Papierherstellung äußerst wirtschaftlich und es kann davon ausgegangen werden, dass die zukünftige Entwicklung von Elektromotoren oder Pumpen mit höherem Wirkungsgrad auch in der Papierherstellung zu weiteren Einsparungen führen wird. Da der Fokus dieser Studie auf prozessspezifischen Techniken liegt, werden diese Querschnittstechniken explizit aus der folgenden Betrachtung ausgenommen. Eine Übersicht der vorhandenen Einsparpotenziale bei Querschnittstechniken geben Schmid et al. (2003).

Die Diskussion der Einsparoptionen wird zunächst prozessspezifisch durchgeführt, wobei jeweils die beiden Prozesse der Holzstoff- und der Zellstoffherstellung zusammengefasst sind, und schließlich werden prozessübergreifende Möglichkeiten wie Brennstoff-, Produkt- oder Materialsubstitution beleuchtet. Die in den Kapiteln 6.3.2 bis 6.3.5 diskutierten Einsparoptionen werden schließlich im Kapitel 6.4 quantifiziert. Einsparoptionen, die in den Kapiteln 6.3.6 bis 6.3.9 diskutierten werden, werden aufgrund weiter Systemgrenzen und starker Überschneidungen nicht in die Quantifizierung aufgenommen.

6.3.2 Papierherstellung

Generell sind hohe Einsparpotenziale überall dort vorhanden, wo ein besonders hoher Energiebedarf besteht. Wie beschrieben trifft das bei der Papierherstellung auf die Entwässerung und Trocknung der Papierbahn mit ihrem hohen thermischen Energiebedarf sowie die Mahlung im Refiner mit seinem hohen elektrischen Energiebedarf zu. In beiden Bereichen ist eine Vielzahl verschiedener Verfahren verfügbar und insbesondere eine energieeffiziente Trocknung stellt einen Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten dar.

6.3.2.1 Hocheffiziente Refiner

Refiner werden bei der Papierherstellung im Bereich der Stoffaufbereitung zur Nachmahlung der Faserstoffe eingesetzt. In diesem Verfahrensschritt werden die erwünschten Stoffeigenschaften verbessert bzw. genau eingestellt (Bos, Staberock 2006). Je nach Papiersorte stellt die Mahlung einen sehr energieintensiven Prozess dar.

Ein großes Energieeinsparpotenzial liegt in der Reduzierung der Leerlaufverluste[58], die 30-50 % betragen können (Blum et al. 2007). Laut Blum et al. können die Leerlaufverluste mit neuen Refinerkonzepten um bis zu 40 % gesenkt werden.

Hierzu nutzt z. B. der Hersteller Andritz die Vorteile einer zylindrischen Bauweise beim Zylinderrefiner Papillon (vgl. Abbildung 6-11) aus: Stofftransport[59] und Mahlprozess lassen sich so vollständig trennen. Letzterer lässt sich somit besser entlang des Mahlspaltes steuern (Gabl 2004). Ebenfalls auf eine höhere Gleichmäßigkeit des Mahlprozesses zielt eine weitere Innovation: Die LemaxX-Spiral- Refinermahlplatte erreicht mit einer spiralförmigen statt parallelen Anordnung der Stege, dass der Aufprallwinkel der Holzfasern auf dem Steg über die gesamte Mahlzone konstant bleibt (Andritz AG 2006). Hierdurch lassen sich laut Hersteller Energieeinsparungen in der Größenordnung von 20 % erreichen.

Abbildung 6-11: Papillon-Zylinderrefiner



Quelle: Andritz AG, entnommen aus Gabl 2004

58 Unter Leerlaufverlusten werden alle Energieverbräuche des Refiners abseits der Mahlarbeit zusammengefasst, die nicht der eigentlichen Faserbehandlung dienen (Bos, Staberock 2006).

59 bei Kegel- oder Scheibenrefinern getrieben durch Zentrifugalkräfte.

Dass sich auch bei den Refinern noch innovative Konzepte in der Entwicklung befinden, zeigt die Kompressionsmahlung. Hierbei findet die Mahlung der Fasern vorwiegend über Kompressionskräfte statt wodurch eine deutliche Reduktion des Strombedarfs erwartet wird. Dekker (2008) berichtet ausgehend von einer Demonstrationsanlage Stromeinsparungen von bis zu 30 % gegenüber herkömmlichen Scheibenrefinern. Außerdem wurde eine veränderte Oberflächenstruktur der Fasern festgestellt, die vermutlich in geringerer Wasseraufnahme des Fasermaterials und weniger Energieaufwand für die Entwässerung resultiert. Die Kompressionsmahlung befindet sich derzeit noch in der F&E-Phase. Eine erste Pilotanlage wurde in den Niederlanden errichtet. Wann die Technologie bereit für den Markteintritt ist, ist jedoch noch unklar.

6.3.2.2 Dampfblaskasten

Dem Einsatz des Dampfblaskastens liegt die gleiche Idee zugrunde wie der Vorwärmung des Wasserkreislaufs der Papiermaschine: Die Viskosität von Wasser nimmt mit steigender Temperatur ab. In der Pressenpartie kann also effizienter und auf einem höheren Trockengrad entwässert werden womit Wärmeenergie in der Trockenpartie eingespart werden kann. Der Unterschied besteht darin, dass der Dampfblaskasten die Wärme am Ende der Siebpartie, also direkt vor Beginn der Pressenpartie einbringt. Dort ist der Feststoffgehalt bereits von ca. 1 % auf ca. 20 % angestiegen. Entsprechend weniger Wasser muss erwärmt werden (Blum et al. 2007; Bos, Staberock 2006). Zusätzlich können Dampfblaskästen zur Feuchteprofilkorrektur eingesetzt werden. Es wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Temperatur um 10°C durch einen Dampfblaskasten, den Trockengehalt am Pressnip um 1 % erhöht (IUTA et al. 2008). Vom Anlagenhersteller Voith werden für den Dampfblaskasten ModuleSteam™ Dampfeinsparungen von bis zu 4 % angegeben.[60] Dampfblaskästen gehören bereits zum Standard in modernen Papierfabriken, entsprechend sind die verbleibenden Potenziale eher eingeschränkt.

6.3.2.3 Wärmerückgewinnung und Nutzung von Abwärme

Wärmerückgewinnung ist bereits weit verbreitet in der Papierherstellung. Große Potenziale für Wärmequellen bieten sich bei der Abwärme von Refinern und Schleifern sowie bei der Papiertrocknung und im Abwasserstrom. Gerade der Nutzung von Niedertemperaturabwärme werden noch weitere Potenziale zugeschrieben.

---

60 http://www.voithpaper.com/applications/documents/document_files/464_d_modulesteam_d_06_07_150dpi.pdf (Zugriff 8.11.2010).

Von LfU und PTS (2002) wurden in einer integrierten Papierfabrik die möglichen Energieeinsparungen durch eine optimierte Nutzung der Niedertemperaturabwärme untersucht. Bei dieser thermodynamischen Analyse werden die Wärmequellen und die Wärmesenken im Hinblick auf ihr Temperaturniveau und den Wärmestrom untersucht und so zugeordnet, dass durch den Einsatz von Wärmetauschern die Abwärme optimal für die jeweiligen Wärmesenken verwendet werden kann. In der Studie wurden verschiedene Optionen der Wärmenutzung untersucht und verglichen. Diese umfassen außer der direkten Nutzung der Wärme im Betrieb auch die externe Nutzung der Wärme sowie die Erzeugung von Kälte. In dem untersuchten Betrieb ergab sich ein maximales Einsparpotenzial von 25 % bezogen auf den derzeitigen Dampfverbrauch. Die einzelnen Einsparoptionen wiesen Amortisationszeiten von weniger als einem Jahr bis zu vier Jahren auf und waren damit sehr wirtschaftlich.

Tabelle 6-9: Möglichkeiten zur Energie- und CO_2-Einsparung durch Nutzung von Niedertemperaturabwärme in der Papierindustrie

Wärmetausch	**Relevanz**	**Art der Nutzung von Niedertemperaturabwärme**	**Wärme- und CO_2-Einsparpotenzial**	**spez. Einsparpotenzial**	**spez. CO_2-Reduzierungspotenzial**
Luft – Wasser	alle Papierfabriken	Wärme Trockenpartie zur Aufwärmung von Sieb-/Frischwasser	6-7 %	77-88 kWh/t	18-20 kg/t
Luft – Wasser	alle Papierfabriken	Wärme Pressenpartie zur Aufwärmung von Sieb-/Frischwasser	2-4 %	32-60 kWh/t	7-14 kg/t
Wasser – Wasser	alle Papierfabriken	Wärme Abwasser zur Aufwärmung des Frischwassers	ca. 10 %	ca. 131 kWh/t	ca. 34 kg/t
Wasser – Wasser	nur Papierfabriken mit Holzstofferzeugung	Wärme Schleiferei zur Aufwärmung von Sieb-/Frischwasser	ca. 2 %	ca. 26 kWh/t	ca. 6 kg/t
Wasser – Extern	alle Papierfabriken (bei vorh. Fernwärmenetz)	Wärme Abwasser zur Einspeisung ins Fernwärmenetz	ca. 7 %	ca. 100 kWh/t	ca. 23 kg/t

Quelle: LfU, PTS 2002

Weitere Studien konnten entsprechend hohe Potenziale bestätigen. So ergab eine Analyse von drei Papiermaschinen ein wirtschaftliches Dampfeinsparpotenzial von 7 bis 13 % durch Optimierung und Austausch der Wärmetauscher (Sivill et al. 2005; Sivill, Ahtila 2009). Die Autoren legen nahe, dass ähnliche Potenziale noch in weiteren Papiermaschinen zu finden sind, da viele Maschinen nach einigen Jahren nicht mehr auf dem Auslegungsoptimum betrieben werden. Eine thermodynamische Optimierung des Dampfbedarfs der Papiertrocknung für eine Papierfabrik in den Niederlanden hat Dampfeinsparungen von 32 % ausgewiesen (bezogen auf den Dampfbedarf für die Trocknung) (Laurijssen et al. 2010). Eine energetische Optimierung von 5 Papierfabriken verschiedener Sorten in Deutschland erzielte mittlere Dampfeinsparungen von 9,3 % und Stromeinsparungen von 3,6 % (IUTA et al. 2008). Selbst bei einer geforder-

ten maximalen Amortisationszeit von 3 Jahren waren noch viele Maßnahmen verfügbar.

In einer Umfrage unter 46 Papierproduzenten wurde die Verbreitung von Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung an Papiermaschinen und Streichmaschinen ermittelt (IUTA et al. 2008). Demnach wird die Abwärme der Papiermaschine von etwa 70 % der befragten Unternehmen zur Vorwärmung der Zuluft genutzt. 40 % nutzen die Abwärme zur Warmwasservorwärmung und 30 % wärmen das Sieb- und Klarwasser vor. Die Abwärmepotenziale der Streichmaschinen sind derzeit weit weniger genutzt. So nutzen nur 20 % der Unternehmen die Abwärme der Streichmaschine um die Zuluft vorzuwärmen und nur etwa 5 % der Unternehmen nutzen sie zur Warmwasservorwärmung.

Gerade die Nutzung von Abwärme hängt stark mit den Gegebenheiten der einzelnen Papierfabrik zusammen. Einige Möglichkeiten der Abwärmenutzung, die bisher eher weniger Beachtung gefunden haben werden im Folgenden diskutiert.

Wärmerückgewinnung von Rotationsgebläsen der Filzkontitionierung

Sieb und Filze laufen endlos um und werden zwischen den Einsätzen (Blattbildung bzw. Wasseraufnahme in der Presse) für den nächsten Einsatz rekonditioniert, d. h. gereinigt und entwässert. Dazu wird Wasser durch das Filz gesaugt.[61] Zur Erzeugung des benötigten Vakuums kommen häufig Rotationsgebläse zum Einsatz, für die charakteristisch ist, dass ihre Abwärme auf relativ hohem Temperaturniveau anfällt (Blum et al. 2007). Wo dies der Fall ist, kann die Wärme mittels eines Luft-Luft-Wärmetauschers zur Vorwärmung der Trockenhaubenzuluft verwendet werden. Dabei muss primär- und sekundärseitig der Druckabfall im Wärmetauscher berücksichtigt werden und gegebenenfalls die Gebläse daran angepasst werden.

Vorwärmung von Spritzwasser zur Sieb- und Filzkonditionierung

Diese Maßnahme zielt ebenfalls auf eine effektivere Entwässerung durch Erwärmung der Papierbahn ab. Sieb und Filze laufen endlos um und werden zwischen den Einsätzen (Blattbildung bzw. Wasseraufnahme in der Presse) für den nächsten Einsatz rekonditioniert (Bos, Staberock 2006). Hierbei kann nun das Spritzwasser, das zur Reinigung von Sieb und Filzen verwendet wird, vorgewärmt werden und auf diese Weise zu einer Erwärmung der Papierbahn und dadurch zu einer effektiveren Entwässerung beitragen. Die Wärme dafür kann aus dem Dampfnetz bezogen werden, es

61 ca. 80–110 Liter pro Minute und Quadratzentimeter (Bos, Staberock 2006).

bietet sich aber auch die Nutzung von Niedertemperaturabwärme an (Blum et al. 2007).

Nutzung von Abwärme zur Trocknung von Klärschlamm

Zur Behandlung der großen Abwassermengen verfügen Papierfabriken über eigene Klärwerke. Die aus Reststoffen entstehenden Klärschlämme werden entweder deponiert oder, wenn die entsprechende Anlagentechnik installiert ist, thermisch verwertet. In beiden Fällen werden die Schlämme zuvor getrocknet. Dies kann durch den Einsatz von Niedertemperaturabwärme bei ca. 45 °C bis 60 °C geschehen. Die Wirtschaftlichkeit bzw. Durchführbarkeit der Maßnahme nimmt allerdings mit steigendem Abstand zwischen Wärmequelle und -senke rasch ab. In Südeuropa genügt häufig bereits die Temperatur der Außenluft zur Trocknung.

Thermokompressoren

Dampfstrahlverdichter, auch Thermokompressoren genannt, können eingesetzt werden um das Druckniveau von Niederdruckabdampf, in diesem Fall Abdampf z. B. aus der Trockenpartie der Papiermaschine, auf ein zur Wiederverwendung benötigtes Druckniveau anzuheben. Auf diese Weise können neue Nutzenfelder für die anfallende Abwärme erschlossen werden (Blum et al. 2007).

6.3.2.4 Schuhpresse

Bei der Schuhpresse wird im Vergleich zur herkömmlichen Walzpresse der Pressnip deutlich vergrößert und damit die Zeit verlängert, die die Papierbahn dem Druck der Presse ausgesetzt ist (siehe Abbildung 6-12). Hierdurch kann der Wassergehalt um einige zusätzliche Prozentpunkte gesenkt werden wodurch der Dampfbedarf in der Trockenpartie deutlich sinkt (10–15 %). Gleichzeitig führt die Schuhpresse häufig zu einer leichten Erhöhung des Strombedarfs.

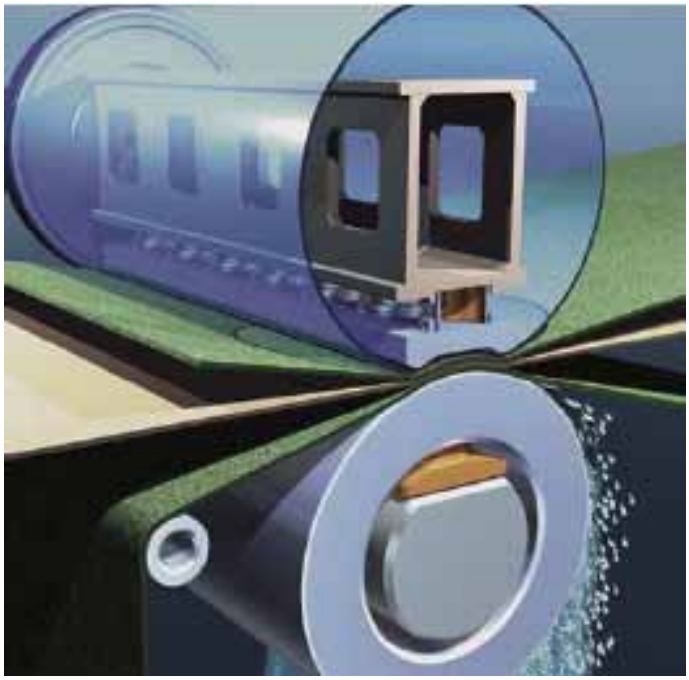
Als Faustregel gilt, dass eine Erhöhung des Trockengehalts durch mechanisches Auspressen um 1 % einer Energieeinsparung von 5 % in der Trockenpartie entspricht (Bos, Staberock 2006 S.273). Allerdings sind dem mit klassischen Walzenpressen erreichbaren maximalen Trockengehalt durch die Belastbarkeit der Papierbahn sowie der Walzen und ihrer Lagerung Grenzen gesetzt (Bos, Staberock 2006 S.287). Mit der Entwicklung der Schuhpresse wurden diese Grenzen erweitert.

Der Einsatz der Schuhpresse reduziert jedoch nicht nur den Energieeinsatz, sondern bringt auch eine ganze Reihe weiterer Vorteile mit sich, die häufig als der eigentliche Grund für die schnelle Verbreitung angesehen werden. Am wichtigsten ist hier die

Steigerung der Produktionskapazität um bis zu 20 %, da die Leistung der Trockenpartie häufig einen Engpass darstellt. Weiterhin kann bei Neuinstallationen die vergleichsweise kapitalintensive Trockenpartie deutlich kleiner ausfallen und die Produkteigenschaften können verbessert werden.

Schuhpressen sind in neue Papiermaschinen integriert, aber können auch in bestehenden Anlagen nachgerüstet werden. In diesem Fall ist die Wirtschaftlichkeit allerdings schlechter und es ergeben sich Amortisationszeiten in der Größenordnung von 7-9 Jahren (IUTA et al. 2008; LfU, PTS 2002). In dieser Rechnung sind die Vorteile durch eine erhöhte Produktionskapazität allerdings noch nicht berücksichtigt.

Abbildung 6-12: Schuhpresse: Zu erkennen ist der verlängerte Pressnip zwischen Presswalze (unten) und Pressschuh (oben), die Nassfilze (in grün) sowie die Papierbahn (in beige)



Quelle: Andritz AG

Nach einem F&E-Zeitraum von über zehn Jahren ist 1980 die erste Schuhpresse auf den Markt gekommen. Bis heute nimmt die Verbreitung von Schuhpressen weiter zu, indem sie in anderen Papiersorten eingesetzt werden oder bereits eine zweite, zusätzliche Schuhpresse genutzt wird. Das Beispiel der Schuhpresse zeigt deutlich, dass die kritische Größe für die Entwicklung von Innovationen in der Papierherstellung die Produktionskapazität ist. Nur weil die Schuhpresse hier eine so deutliche Verbesserung versprochen hat, wurde sie konsequent und schnell zur Marktreife entwickelt. In die-

sem Fall waren die Anreize sogar so groß, dass zusätzliche öffentliche Forschungsförderung unnötig war (Luiten, Blok 2003).

Durch die bereits relativ weite Verbreitung ist das verbleibende Potenzial der Schuhpresse insgesamt eher niedrig, für die einzelne Papierfabrik können die Einsparungen trotzdem erheblich sein.

6.3.2.5 Neue Verfahren für effizientere Trocknung

Wie bereits beschrieben ist die Trocknung der Papierbahn der größte Dampfverbraucher in einer Papierfabrik. Folglich konzentrieren sich auch die Anstrengungen zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Papierherstellung auf effizientere Entwässerungs- und Trocknungstechnologien. Nicht zuletzt ist auch die Schuhpresse ein Ergebnis dieser Forschungsanstrengungen. Weitere Technologien mit Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Trocknung sind u. a. die Dampfprall- und Luftpralltrocknung (***steam/air impingement drying***), die Kondensationsband-Trocknung (***condensing belt drying***) oder die luftlose Trocknung (Brand et al. 2005; De Beer et al. 1998; IUTA et al. 2008).

Bei der Impulstrocknung wird die Idee verfolgt, den Trockengehalt der Papierbahn noch in der Pressenpartie zu erhöhen, indem bei sehr kurzer Kontaktzeit zwischen einer heißen Presse (150–500 °C, beheizt über Induktionsheizer) und einem Pressnip ein sehr hoher Druck auf das Papier ausgeübt wird und dadurch der erzeugte Wasserdampf Wasser aus dem Papier treibt – ohne dieses zu verdampfen. Es wird erwartet, dass ein Trockengehalt von 55 bis 65 % möglich ist (De Beer et al. 1998; European IPPC Bureau 2010). Durch den erhöhten Trockengehalt wird weniger Dampf für die weitere Trocknung benötigt, gleichzeitig steigt allerdings der Strombedarf für Antrieb und Beheizen der Presse. Martin (2004) berechnet in Simulationen eine Reduktion des Primärenergiebedarfs um 20 %, wenn ein Impulstrockner bei 200 °C eingesetzt wird und Strombezug aus Kohlekraft angenommen wird. Des Weiteren kann in diesem Beispiel die Trockenpartie um 32 bis 70 % (bei zwei Impulstrocknern) verkleinert werden. Luiten und Blok (2004) zeichnen ein kritisches Bild der Impulstrocknung. Trotz über 25 Jahren (in den USA teilweise öffentlich geförderter) F&E-Aktivitäten und einiger Pilotanlagen konnten die technischen Hürden, wie Blasenbildung auf dem Papier oder Delamination, nicht überwunden werden und eine Markteinführung steht weiter aus. Im Gegenteil stellte sich zunehmend eine Verbesserung der Produktionskapazität als wichtigster Treiber für die Innovation heraus und die erhofften Energieeinsparungen wurden mehr und mehr angezweifelt (European IPPC Bureau 2010).

Bei der Dampf- und Luftpralltrocknung wird überhitzter Dampf bzw. heiße Luft (~300 °C) mit hoher Geschwindigkeit gegen die Papierbahn geblasen. Laurijssen et al.

(2010) sehen keinen deutlich niedrigeren Energieverbrauch als bei herkömmlicher Zylindertrocknung. Jedoch steht das verdampfte Wasser auch als Dampf zur Verfügung und kann mit höherem Wirkungsgrad zur Wärmerückgewinnung verwendet werden. Obwohl auch diese Technologie bereits seit langem als Innovation in der Diskussion ist, steht die Markteinführung weiterhin aus (De Beer et al. 1998; Laurijssen et al. 2010).

Bei der Kondensationsband-Trocknung wird die Papierbahn in Kontakt mit einem heißen Stahlband getrocknet. Es werden Dampfeinsparungen von 10-20 % erwartet. Nachdem bereits 1975 die Forschung an der Kondensationsbandtrocknung begonnen wurde, wurden erste kommerzielle Anlagen 1996 in Finnland und 1999 in Südkorea errichtet (Martin et al. 2000). Eine weite Verbreitung hat diese Technologie jedoch noch nicht erreicht und befindet sich noch im Anfangsstadium der Markteinführung (Laurijssen et al. 2010).

Dass neue Trocknungsverfahren nicht zwangsläufig energieeffizienter sein müssen, zeigt die Durchströmtrocknung („Through air drying“). Hierbei wird das Papier ab einem Trockengehalt von nur 25 % über Verdampfung getrocknet. Dadurch steigt der Wärmebedarf auf das 2,5-fache und der Strombedarf verdoppelt sich (IUTA et al. 2008; Laurijssen et al. 2010). Die Durchstromtrocknung eignet sich nur für die Produktion von Hygienepapier und verbessert die Papiereigenschaften wie Weichheit, Volumen und Saugfähigkeit (Laurijssen et al. 2010).

Auch wenn eines der diskutierten neuen Verfahren Marktreife erlangen würde, so könnte das resultierende Einsparpotenzial nur über einen relativ langen Zeitraum gehoben werden, da die Trockenpartie einer Papiermaschine eine typische Lebensdauer von 20-40 Jahren aufweist (Laurijssen et al. 2010).

6.3.2.6 Chemische Fasermodifikation

Die chemische Fasermodifikation[62] stellt einen innovativen Ansatz dar, Fasern energieeffizienter zu behandeln als es bisher durch die Mahlung der Fall ist. Es wird dabei von einem neuen Verständnis die Vorgänge, die zur Bindung zwischen den Fasern führen, ausgegangen.

Die Faserbindung beeinflusst wichtige Papiereigenschaften wie unter anderem die Festigkeit. Es wird gewöhnlich davon ausgegangen, dass die Bindungskräfte zwischen den Fasern vorwiegend auf Wasserstoffbrückenbindungen zurückzuführen sind. Dieser

62 In der Literatur häufig auch als nanotechnologische Fasermodifikation bezeichnet.

Theorie folgend weisen feiner gemahlene Fasern eine größere Oberfläche auf und bieten mehr Kontaktfläche, die zu einer stärkeren Faserbindung führt und die Papierfestigkeit erhöht. Der Mahlgrad der Fasern ist somit ein zentraler Einflussfaktor auf die Festigkeit des Papiers. Das Mahlen der Fasern ist allerdings mit hohem Stromverbrauch verbunden und erhöht neben der Festigkeit auch das Wasserrückhaltevermögen der Fasern. Dieses ist entscheidend für den Energieeinsatz bei der Trocknung der Papierbahn, da das in den Fasern gebundene Wasser nur über energieintensive Verdampfung entfernt werden kann. Die höhere Festigkeit durch die Mahlung geht somit mit einen höheren Energieverbrauch bei der Mahlung und in der Trockenpartie einher. Weiterhin wirkt sich die Mahlung negativ auf einige andere Papiereigenschaften aus.

Der neue Ansatz der chemischen Fasermodifikation basiert darauf, neben den Wasserstoffbrückenbindungen weitere Effekte, die für Faserbindungen verantwortlich sind, gezielt zu beeinflussen und so die Festigkeit zu erhöhen. Dadurch kann die Mahlung reduziert bzw. ganz ersetzt werden. Derzeit wird noch mit alternativen Verfahren der Fasermodifizierung experimentiert. Erhard et al. (2010) diskutieren drei alternative Verfahren: der Einsatz von Carboxymethylcellulose um die Faserwände zu modifizieren, die Beschichtung der Faserwand mit Polyelektrolyten oder die Zugabe von microfibrillärer Cellulose.

Die chemische Fasermodifikation kann im Vergleich zur herkömmlichen (Nach-)Mahlung der Fasern folgende Vorteile aufweisen.

- Der teils erhebliche Energieverbrauch für die Mahlung kann vermieden werden. Dieser kann durchaus über 100 kWh/ t Papier liegen und bei einzelnen Sorten sogar mehrere Hundert kWh.
- In Pilotanlagen konnte gezeigt werden, dass die chemische Fasermodifikation die Festigkeit der Faserbindungen erhöht hat – bei konstantem Wasserrückhaltevermögen. Um die gleiche Festigkeit mittels Mahlung zu erreichen war in Laborversuchen ein Energieverbrauch von 200 kWh/t nötig. Durch die Mahlung ist auch das Wasserrückhaltevermögen um etwa 45 % angestiegen (Erhard et al. 2010).
- Gleichzeitig führt die chemische Fasermodifikation dazu, dass die Fasern leichter zu entwässern sind. Die homogeneren Fasern weisen einen niedrigeren Entwässerungswiderstand auf und können so zu einem niedrigeren Energieverbrauch in der Entwässerung und Trocknung führen. Dieser Effekt konnte auch von Stumm (2007) nachgewiesen werden. Gleichzeitig kann die Entwässerungsgeschwindigkeit erhöht werden.
- Weiterhin ermöglicht die chemische Fasermodifikation die gleiche Festigkeit zu erreichen wie durch herkömmliche Mahlung, jedoch bei geringerer Dichte (Erhard et al. 2010). In Versuchen wurden dadurch Fasereinsparungen in der Größenordnung von 5 bis 15 % erreicht, die wiederum Kosten- und Energieeinsparungen ermögli-

chen und in Zeiten hoher Rohstoffpreise ein wichtiger Treiber für die Entwicklung dieses Verfahrens sein könnten.

Die gezeigten Einsparungen sind jedoch nicht direkt als Energieeinsparungen zu werten, da sie teilweise Verlagerungseffekte beinhalten. So wurde in Pilotversuchen die Mahlung durch den Einsatz von Chemikalien ersetzt. Der Energieverbrauch für die Herstellung, den Transport und die Entsorgung der Chemikalien müsste somit den Einsparungen gegengerechnet werden und eine vollständige Lebenszyklusanalyse durchgeführt werden.

Das Verfahren zeigt besonders hohe Einsparungen bei Papiersorten die hohe Festigkeiten benötigen und einen hohen Energieaufwand für die Mahlung aufweisen. Bei diesen Sorten stellt sich folglich auch die Wirtschaftlichkeit am besten dar.

Neben der Reduktion der Energie- und Rohstoffkosten könnte sich eine mögliche Steigerung der Produktionskapazität als ein wichtiger fördernder Faktor für die Verbreitung dieses Verfahrens erweisen. Die Kapazitätserhöhung wird erreicht, da eine Papierbahn mit homogenerer Faserstruktur die Pressen- und Trockenpartie der Papiermaschine mit höherer Geschwindigkeit durchlaufen kann. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass eine bestehende Papiermaschine auf dieses Verfahren umgerüstet werden kann und die Verbreitung somit unabhängig vom Alter und der Umwälzung des Anlagenbestandes ist.

Derzeit befindet sich die chemische Fasermodifikation noch in der Pilotphase und es hat sich noch kein dominanter technischer Ansatz herausgebildet. Die vielversprechenden Ergebnisse der Pilotversuche lassen jedoch hoffen, dass dieses Verfahren in Zukunft wirtschaftlich realisierbar sein wird. Mit einem Markteintritt wird nicht vor 2015 gerechnet.

6.3.3 Zellstoffherstellung

Zellstofffabriken verfügen, zusätzlich zur Produktion von Zellstoff und Strom, über günstige Voraussetzungen für die Produktion einer Vielfalt von holzbasierten „grünen" Chemikalien sowie festen und insbesondere flüssigen Biobrennstoffen (Methanol, Dimethylester, längerkettige Kohlenwasserstoffe). Diese Erweiterung der Zellstofffabrik zur Bioraffinerie würde eine bessere Ausnutzung der Holzbestandteile erlauben sowie eine höhere Wertschöpfung ermöglichen. Die Bioraffinerie wird häufig im Zusammenhang mit der in der Folge beschriebenen Vergasung der Schwarzlauge und anderer Biomasse diskutiert. Das Konzept einer solchen Umgestaltung von Zellstoffwerken in Bioraffinerien wird relativ breit diskutiert und es ist noch nicht eindeutig, welches Konzept wirtschaftlich und energetisch am effizientesten ist (Joelsson, Gustavsson 2008).

Eine Abschätzung der Auswirkungen auf den Energieverbrauch der Papierbranche ist Gegenstand der Forschung und kann in dieser Studie noch nicht quantifiziert werden.

Grundlage der Bioraffineriekonzepte ist in jedem Fall eine umfangreichere Nutzung der anfallenden Produktionsabfälle. Hierzu stellt die im Folgenden beschriebene Ablaugenvergasung eine wichtige Basistechnologie dar, an welcher derzeit in einigen Ländern intensiv geforscht wird.

6.3.3.1 Ablaugenvergasung

In einer Standard-Zellstofffabrik wird die Ablauge – und damit grob die Hälfte des Brennwertes des für die Zellstoffproduktion eingesetzten Holzes – eingedickt und in einem dafür ausgelegten Kessel, dem sogenannten Tomlinson-Kessel, verbrannt. Dabei wird Prozessdampf und mittels einer Gegendruckturbine Strom produziert. Dieser Strom und Dampf decken in der Regel den Bedarf des gesamten Zellstoffwerks. Bei modernen Fabriken besteht sogar ein Überschuss und nicht-integrierte Standorte liefern somit neben Zellstoff Strom auf Biomassebasis (Joelsson, Gustavsson 2008). Ursprünglich wurde die Ablauge verbrannt, um die eingesetzten Chemikalien wiederzugewinnen. Tomlinson-Kessel werden seit über siebzig Jahren verwendet. Sie haben aber grundsätzliche, verfahrensinhärente Mängel, z. B. die Gefahr des Kesselzerknalls. Um diese zu vermeiden sind in der Praxis den thermodynamischen Betriebsparametern enge Grenzen gesetzt, woraus ein schlechter elektrischer Wirkungsgrad (10–15 %) resultiert (European IPPC Bureau 2010).

Alternative Verfahren, die eine höhere Stromausbeute ermöglichen könnten, basieren auf der Vergasung der Ablauge vor der Verbrennung. Als GuD-Prozess ausgelegt, könnte sich die Stromproduktion verdoppeln, während die Wärmeproduktion unverändert bleibt (IEA 2008). Mit diesem Verfahren würden Zellstoffwerke ihren Überschuss an (biomassebasiertem) Strom weiter erhöhen und hätten höhere Zusatzeinnahmen aus dem Stromverkauf. Standorte mit integrierter Zellstoff- und Papierproduktion könnten mit dieser Technik energieautark werden.

Es werden sowohl Konzepte erforscht, die zusätzlich zu einem bereits existierenden Tomlinson-Kessel kapazitätserweiternd eingesetzt werden können, falls dieser den Engpass darstellt, als auch Konzepte, die bei Fabrikneubau den Tomlinson-Kessel vollständig ersetzen. Die Forschungsaktivitäten in Europa konzentrieren sich stark auf den skandinavischen Raum. Hier wird aktiv an diesem Verfahren geforscht und einzelne Demonstrationsanlagen wurden bereits errichtet. Einen Überblick über die diskutierten Verfahrensvarianten geben Naqvi et al. (2010).

Obwohl die Technik schon seit ca. 30 Jahren diskutiert wird, ist sie gegenwärtig noch nicht für eine breite Markteinführung geeignet. Die Ablaugenvergasung wird sich nur durchsetzen können, wenn eine hohe Verfügbarkeit gewährleistet werden kann und die Befürchtungen möglicher Risiken ausgeräumt werden können. Unter Experten gibt es keinen Konsens bzgl. der erwarteten zukünftigen Bedeutung der Technik (IEA 2008).

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass diese Technologie vor dem Jahr 2015 für eine breite Markteinführung verfügbar ist. Große Herausforderungen bestehen zurzeit noch in der Einbindung in den Produktionsprozess einer Zellstofffabrik. Daneben sind auch die technischen Hürden beim Vergasungsprozess noch nicht überwunden, und insbesondere die niedrige Reinheit der Lösung bereitet noch Probleme.

Da die Sulfatzellstoffproduktion in Deutschland noch relativ jung ist (beide Werke gingen 1999 und 2004 in Betrieb), sind die Anlagen zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung technisch auf dem neuesten Stand. Sie erreichen einen Gesamtwirkungsgrad von 80 % (Wärme und Strom) bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 25-30 % und produzieren mehr Strom als an dem jeweiligen Standort zur Zellstoffproduktion benötigt wird. Es ist daher unklar, ob die Ablaugenvergasung in Zukunft in Deutschland attraktiv eingesetzt werden kann.

6.3.4 Holzstoffherstellung

Der Energieverbrauch bei der Holzstoffherstellung ist durch einen sehr hohen Bedarf an elektrisch erzeugter mechanischer Energie am Schleifstein bzw. dem Refiner und eine sehr hohe Menge an Abwärme gekennzeichnet. Etwa 95 % der eingesetzten mechanischen Energie werden in Wärme umgewandelt. Somit stellen zum einen die Optimierung der Refiner und Schleifsteine und zum anderen die Nutzung der Abwärme wichtige Bereiche zur Verringerung der Energieverluste dar.

6.3.4.1 Wärmerückgewinnung

Beim mechanischen Faseraufschluss wird ein Großteil der zu diesem Zweck in das Holz eingebrachten Energie als Wärme dissipiert (Franzen 2006 S.54). Handelt es sich um Verfahrensvarianten, bei denen durch Kapselung der Aufschluss unter Druck und erhöhter Temperatur stattfindet, muss dafür also keine externe Wärme zugeführt werden. Darüber hinaus ist die anfallende Wärmemenge groß genug, um Wärme in Form von Dampf und Warmwasser aus dem (verunreinigten) Refinerdampf mittels Wärmetauschern rückzugewinnen und anderswo zu verwenden (Blum et al. 2007). Bei Integrierten Standorten kann die Wärme in der Papiermaschine eingesetzt werden, z. B. zur Trocknung der Papierbahn. Es können, bezogen auf die eingesetzte Strommenge, verfahrens- und mahlgradabhängig, ca. 20–40 % der Energie als Dampf und weitere

20–30 % als Warmwasser zuückgewonnen werden (European IPPC Bureau 2010). Die Technik ist in Europa bei Neuanlagen Standard und bereits weit verbreitet.

Eine weniger weit verbreitete Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung besteht darin, die Wärme aus dem Abwasser der Bleiche zu gewinnen. Aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus ist die Wärmerückgewinnung aufwändiger und wirtschaftlich weniger attraktiv. Sie stellt bei steigenden Energiepreisen jedoch eine lohnenswerte Einsparmöglichkeit dar, besonders in integrierten Papierfabriken mit hohem Wärmebedarf.

6.3.4.2 Enzymatische Vorbehandlung

Durch Vorbehandlung von Holzhackschnitzeln mit Enzymen kann die mechanische Aufschlussarbeit vermindert werden. Enzyme sind katalytisch wirkende Proteine, die in biologischen Organismen häufig zur Verdauung eingesetzt werden. Sie können chemisch hergestellt werden oder durch den Einsatz von Enzyme produzierenden Pilzen oder Bakterien gewonnen werden. Forschung über den Einsatz von Enzymen in der Papier- und Faserstoffherstellung reichen zurück bis in die 1980er Jahre. Die Herstellungskosten von Enzymen haben stetig abgenommen und ihre Umweltunbedenklichkeit macht sie mit strenger werdenden Abwassergrenzwerten zunehmend attraktiv. Es werden Cellulase, Xylanase, Pektinase und Protease verwendet.

Ein relativ neuer Ansatz besteht darin, die bislang schlechte Penetration der Enzyme in die Holzstrukturen durch Verbindung mit einer mechanischen Vorbehandlung mittels einer Schraubenpresse oder eines Refiners niedriger Intensität zu verbessern. Die erreichten Stromeinsparungen im Hauptschritt des Verfahrens betragen in Abhängigkeit von den verwendeten Enzymen und Holzsorten zwischen 10 % und bis zu 50 % (Viforr 2008). Die enzymatische Vorbehandlung von Holzfasern befindet sich noch im Entwicklungsstadium und wird noch nicht kommerziell eingesetzt.

6.3.4.3 Energieeffiziente Schleiffläche

Am finnischen KCL[63] wurde eine neuartige Schleiffläche für Holzschleifer entwickelt. Im Gegensatz zu klassischen Schleifsteinen bzw. Keramiken handelt es sich hierbei um eine vollständig metallene Konstruktion. Durch wellenförmige Muster auf der Schleiffläche können damit plastisch deformierende Druckimpulse in das Holz eingebracht werden. Weiterhin erlaubt ein im selben Projekt entwickeltes neues Prinzip der Anbringung der Schleifkörner an der Oberfläche eine dichtere Anordnung als bislang.

63 Papiertechnisches Forschungsinstitut

In Pilotversuchen ließen sich bei unveränderten Fasereigenschaften Stromeinsparungen von 50 % erreichen (Leinonen 2006).

6.3.4.4 Fortschrittliche Refinerverfahren

In den letzten 15 Jahren fanden im Bereich der Refinerverfahren diverse Innovationen statt, deren Marktdurchdringung noch nicht abgeschlossen ist (Franzen 2006). Diese neuen Techniken lassen sich teilweise ergänzend, teilweise alternativ einsetzen. Die erzielte Einsparung bei Kombination ergibt sich in den seltensten Fällen als eine schlichte Summe der einzelnen Einsparungen. Veränderungen und Optimierungen finden unter Anderem in folgenden Bereichen statt:

- Abstand zwischen Refinerplatten
- Gestaltung der Oberfläche der Refinerplatten, bzw. der Segmente, aus denen diese zusammengesetzt ist
- Drehgeschwindigkeit des Refiners
- Stoffkonsistenz im Refiner
- Temperatur im Refiner
- Beaufschlagung der Hackschnitzel mit Wärme bzw. Dampf vor Eintritt in den Refiner
- Verweilzeit im Refiner
- Verteilung auf mehrere in Reihe geschaltete Refiner
- Erzeugung von Dampf innerhalb oder außerhalb des Refiners
- Chemische Vorbehandlung der Hackschnitzel.

Beispielsweise vermarktet der Hersteller Andritz ein Refinersystem unter dem Namen RTS („Residence Time, Temperature und Speed“). Die Hackschnitzel werden dabei so konditioniert, dass der Refiner mit einem kleineren Plattenabstand betrieben werden kann (Franzen 2006). Bei gleichzeitig erhöhter Drehgeschwindigkeit kann somit bei einer kürzeren Verweildauer das gleiche Ergebnis erzielt werden und insgesamt Energie gespart werden. Nachdem das Verfahren 1995 eingeführt wurde, gab es bis 2001 zehn Installationen. Seit Anfang des Jahrtausends kommt RTS bei vielen Neuinstallationen zum Einsatz.

Eine jüngere Innovation vom finnischen Hersteller Metso nennt sich Turbine Segments. Dabei wird der Refiner als radiale Strömungsmaschine aufgefasst. Das Augenmerk liegt auf einer kontrollierteren Strömungsführung von Holz, Fasern und Dampf. Dies ermöglicht besser kontrollierbare Stoffeigenschaften und Stromeinsparungen (Metso Paper Inc. 2008).

6.3.5 Altpapierstoffherstellung

Mit der Zunahme der Altpapiereinsatzquote bei ebenso steigender Papierproduktion stieg auch die Produktion von Fasern aus Altpapier in den letzten 20 Jahren rasant an und verdoppelte sich von 1990 bis 2008. Entsprechend stieg auch die energetische Bedeutung der Altpapieraufbereitung und Energieeinsparmöglichkeiten geraten auch hier immer mehr in den Mittelpunkt.

Wie in Kapitel 6.2.3 dargestellt, wird die Altpapieraufbereitung für die Berechnung der Einsparpotenziale in 6 Prozessschritte mit einem Stromverbrauch zwischen 20 und 80 kWh/t Faserstoff untergliedert. Die relativ gleichmäßige Verteilung des Energieverbrauchs führt entsprechend dazu, dass auch einzelne Einsparoptionen, die an der Optimierung eines dieser Prozessschritte ansetzen, bezogen auf die gesamte Altpapieraufbereitung ein relativ niedriges Potenzial aufweisen. Es werden im Folgenden trotzdem einzelne vielversprechende Möglichkeiten diskutiert, auch wenn mit diesen nur ein kleiner Bereich der möglichen Optimierungen abgedeckt werden kann.

6.3.5.1 Hochkonsistenzstoffauflösung

Durch Erhöhung der Konsistenz bei der Stoffauflösung von üblichen 5–7 % auf bis zu 20 % lässt sich der Strombedarf des Stofflösers um 2 bis zu 10 kWh pro Tonne Altpapierstoff senken (Blum et al. 2007). Die Energieeinsparung beruht darauf, dass durch den niedrigeren Wassergehalt insgesamt weniger Masse umgewälzt werden muss. Weiterhin wird die Wendel mit einer Spoilerkontur versehen und ihre Drehgeschwindigkeit wird herabgesetzt, was fallabhängig zu Energieeinsparungen von bis zu 20 % führen kann (Brettschneider 2007).

6.3.5.2 Effiziente Siebung

In den vergangenen Jahren sind Fortschritte bei verschiedenen Siebungskonzepten gemacht worden und entsprechende Systeme auf den Markt gekommen (Blum et al. 2007; Brettschneider 2007). Auch hier werden Einsparungen durch Erhöhung der Stoffkonsistenz von ca. 1,5 auf 2,5 % erzielt. Weiterhin spielt die optimale Abstimmung von Siebkorb und Rotor eine wichtige Rolle (Brettschneider 2007).

6.3.5.3 Prozessoptimierungen beim Deinking

Nach dem Entfernen von gröberen Verunreinigungen wird im Deinking Prozessschritt die Druckfarbe von den Fasern gelöst. Hierbei ist der wichtigste Prozesschritt die Flotation. Bei einer niedrigen Stoffdichte von etwa 1 % werden unter Zugabe von Chemika-

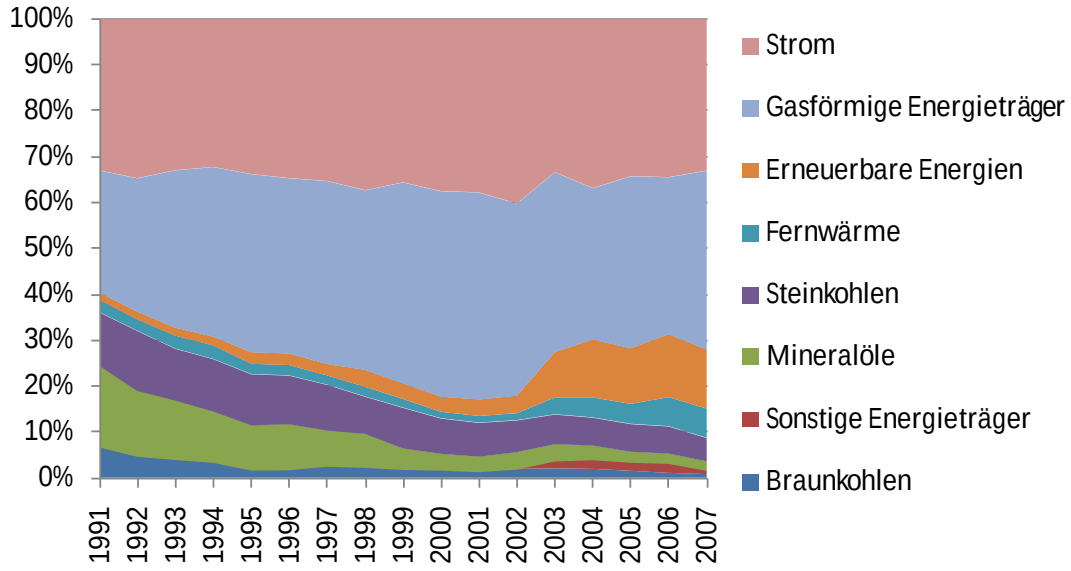
lien die Druckpartikel durch aufsteigende Luftblasen von den Fasern getrennt und an die Oberfläche getrieben.

Beim Flotationsprozess geht der Großteil des Stromverbrauchs auf den Betrieb von Pumpen zurück. Durch besser an den Bedarf angepasste Steuerung sind weitere Energieeinsparungen möglich.

6.3.6 Brennstoffsubstitution und Sekundärbrennstoffe

Die Energieträgerstruktur des Papiergewerbes hat sich in den letzten 20 Jahren kontinuierlich geändert. Während der Stromverbrauch über den gesamten Zeitraum etwas mehr als 30 % des Energiebedarfs ausmacht, gab es bei den Brennstoffen größere Verschiebungen: Braunkohle, Steinkohle und Mineralöle wurden durch die weniger CO_2-intensiven Energieträger Erdgas, Fernwärme und Erneuerbare Energien ersetzt (siehe Abbildung 6-13).

Abbildung 6-13: Anteile der Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch des Papiergewerbes in Deutschland



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

Generell eignet sich die Papierherstellung sehr gut für den Einsatz erneuerbarer Energieträger. Für die Erzeugung von Strom und Prozessdampf (häufig über Kraft-Wärme-Kopplung) können jegliche verfügbare biomassebasierten Energieträger eingesetzt werden. Dies ist in allen Branchen ähnlich, die lediglich Prozessdampf auf relativ niedrigem Temperaturniveau benötigen. Eine Besonderheit der Papierherstellung ist die große Menge anfallender meist biogener Produktionsabfälle.

Diese Sekundärbrennstoffe fallen in hohem Maße bei der Zellstoff- und Holzstoffproduktion an. In der Zellstoffherstellung kann das abgetrennte Lignin in Form der Ablauge energetisch verwertet werden und dadurch sogar ein Stromüberschuss erzielt werden. Holz setzt sich zu etwa gleichen Anteilen aus Lignin und Cellulose zusammen sodass die für die Verbrennung zur Verfügung stehenden Ligninmengen sehr hoch sind. Auch Abfälle aus der Holzstoffherstellung wie etwa die Rinde sind energetisch gut nutzbar.

Auch in anderen Prozessschritten fallen Abfälle an, die sich für die thermische Verwertung eignen.Gerade die schwieriger energetisch nutzbaren Abfälle wie Schlämme oder stark verunreinigte Abfälle mit relativ niedrigem Energiegehalt (etwa Deinking-Rückstände) weisen noch Potenziale auf. Die bereits häufig eingesetzte Wirbelschichtfeuerung ist geeignet, diese Problemabfälle mit hohem Asche- und Feuchtigkeitsgehalt zu verwerten (Monte et al. 2009). Häufig ist die Nutzung als Sekundärbrennstoff wirtschaftlich, nicht nur weil andere Energieträger ersetzt werden können, sondern auch weil die teure Entsorgung und Behandlung dieser Abfälle entfällt.

Interessant ist die energetische Nutzung von Schlämmen in Kombination mit einer Nutzung von Niedertemperaturabwärme aus den Produktionsprozessen. Die Abwärme kann genutzt werden, um die Schlämme vor der Verbrennung zu trocknen (Ruohonen et al. 2010). Hierfür ist genauso die Nutzung von Abwärme aus anderen energieintensiven Betrieben wie Zementwerken denkbar (Monte et al. 2009).

Eine mögliche Einsparung fossiler Energieträger durch die verstärkte Nutzung von Sekundärbrennstoffen wird in der Modellierung nicht quantifiziert.

6.3.7 Möglichkeiten der Prozesssubstitution

6.3.7.1 Wasserlose Papierherstellung

Eine langfristige Vision zur Steigerung der Energieeffizienz stellt die wasserlose Papierherstellung dar. Hierbei wird z. B. ein Luftstrom eingesetzt, um in der Siebpartie eine gleichmäßige Blattbildung zu erreichen, was traditionell über die Faser-Wasser-Suspension erreicht wird. Um eine Bindung zwischen den Fasern zu erreichen, werden z. B. Harz oder künstliche Bindemittel hinzugefügt. Diese radikale Prozessinnovation wird laut de Beer et al. (1998) schon für Spezialpapiere eingesetzt; die Übertragung auf Papiersorten, die in großen Mengen hergestellt werden, stellt jedoch noch eine große technische Herausforderung dar. Bei bisher kommerziell eingesetzten Verfahren kann zwar der Dampfverbrauch deutlich gesenkt werden, jedoch steigt der Stromverbrauch entsprechend stark, sodass die primärenergetischen Einsparungen nicht eindeutig sind und es von der Art der Stromerzeugung abhängt, ob die Technologie energetisch vorteilhaft ist.

Ein relevantes Forschungsfeld sind Alternativen für das Wasser in der Faser-Wasser-Suspension. Als Alternativen werden Ethanol oder überkritisches Kohlendioxid diskutiert, die mit weniger Energieaufwand von den Fasern getrennt werden können; denkbar sind aber auch andere Ansätze (IEA 2008). Da praktisch der gesamte Energiebedarf für die thermische und mechanische Entwässerung der Papierbahn entfallen würde, sind die theoretisch erreichbaren Einsparungen sehr hoch, hängen jedoch davon ab, wie groß z. B. der Mehrverbrauch an elektrischer Energie ist. Gleichzeitig kann auch der für die Papierherstellung typische hohe Wasserverbrauch reduziert werden.

6.3.8 Produkt- Materialsubstitution

6.3.8.1 Einsatz von Füllstoffen

Obwohl die Faserstofffamilien den Großteil der Einsatzstoffe ausmachen, gehen auch eine Vielzahl an Füll- und Hilfsstoffen in nicht zu vernachlässigenden Mengen in die Produktion ein.[64] Ihr Einsatz ergibt sich aus mehreren Gründen: Zum einen übernehmen sie vielfältige Funktionen im Produktionsprozess, z. B. erleichtern sie die Blattbildung oder die Trocknung. Zum anderen verbessern sie bestimmte Produkteigenschaften des Papiers wie z. B. Opazität[65] und Bedruckbarkeit. Weiterhin sind Füllstoffe im Einkauf billiger als Faserstoffe. Sie kosten typischerweise 40-80 €/t während der Preis für Faserstoffe bei 500-700 €/t liegt (Stumm 2007). Durch ihren Einsatz lässt sich das Flächengewicht von Papier kostengünstig erhöhen. In den letzten Jahrzehnten ist der Anteil an Nichtfasermaterial kontinuierlich gestiegen.

Da einerseits die Herstellung von Füll- und Hilfsstoffen in der Regel weniger Energie benötigt als Fasermaterial, ist ihr Einsatz für die Entwicklung des Energiebedarfes im Papiersektor bedeutend. Einen Überblick über die verschiedenen eingesetzten Stoffe geben Bos und Staberock (2006 S. 184ff).

Häufig eingesetzte Füllstoffe sind Kaolin und Kalziumkarbonat. Der Einsatz ist jedoch auch sortenabhängig und ein zu hoher Anteil Füllstoffe verschlechtert die mechanischen Eigenschaften des Papiers, wie beispielsweise die Festigkeit. Bei Kopierpapier sind 22 % Füllstoffe eine typische Größenordnung. Längerfristig scheint eine weitere Steigerung dieses Wertes um mindestens fünf Prozentpunkte realistisch.

---

64 Die Geschichte der Papierherstellung zeigt, dass auch Holz als Rohstoff für die Faserstoffherstellung ersetzbar ist. So wurden bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts Lumpen als Fasermaterial genutzt und erst die zur Neige gehende Verfügbarkeit des Lumpenmaterials hat die Suche nach alternativen Faserrohstoffen vorangetrieben und schließlich zur Entdeckung des Holzes als Faserstoff im Jahr 1843 geführt (Bos, Staberock 2006, S. 22).

65 Lichtundurchlässigkeit

6.3.9 Recycling: Steigerung des Altpapiereinsatzes

Neben den technischen Verbesserungen des Herstellungsprozesses weist das Recycling von Papier große Potenziale auf, den Energieverbrauch zu reduzieren und Ressourcen zu schonen (Jochem et al. 2003). In Deutschland ist die Altpapiereinsatzquote laut VDP von 60 % im Jahr 2000 auf 71 % im Jahr 2008 gestiegen und liegt damit im europäischen Vergleich sehr hoch. Die Altpapiereinsatzquote ist als die Masse des eingesetzten Altpapiers bezogen auf die Masse des produzierten Papiers definiert. Damit ist für die Altpapiereinsatzquote 100 % nicht das theoretische Maximum, da während der Aufbereitung ein Faserverlust anfällt und für einzelne Sorten sind Quoten von über 100 % möglich (Nathani 2002).

Tabelle 6-10: Entwicklung der Altpapiereinsatzquoten nach Papiersorte in Deutschland

	2000	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
Altpapiereinsatzquote * [%]						
Papier, Karton, Pappe für Verpackungen	95	100	99	100	97	101
Grafische Papiere	37	45	46	46	47	49
Hygienepapiere	74	60	57	59	56	55
Technische Spezialpapiere	41	40	41	45	49	43
Papier, Karton, Pappe gesamt	60	66	67	68	68	71
Altpapierrücklaufquote ** [%]	72	77	75	75	76	83

* Altpapiereinsatz als Anteil an der Papierproduktion
** Altpapieraufkommen als Anteil am Papierverbrauch
Quelle: VDP

Eine Lebenszyklusanalyse von Büropapier auf Basis von Frischfasern (Sulfatzellstoff) im Vergleich zu Büropapier auf Basis von Altpapier zeigt deutlich niedrigere Umweltwirkungen durch den Einsatz von Altpapier. Bei Vergleich der gesamten Vorketten bis zu Papierherstellung (Transport und Faserstoffherstellung) können die Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Altpapier um 32 bis 47 % (je nach Ursprung des Fasermaterials) gesenkt werden, der Wassereinsatz liegt um 85 % niedriger und der Energiebedarf wird auf etwa 20 % reduziert (IFEU 2006). Die Umweltwirkungen des Altpapiersammelns lagen dabei in ähnlicher Größenordnung wie für Holzbearbeitung und -Transport für die Herstellung von Frischfasern. Der Transport des Zellstoffs aus Skandinavien bzw. aus Brasilien hat großen Einfluss auf die Umweltbilanz.

Jedoch lässt sich Altpapier nicht beliebig für alle Papiersorten einsetzen und auch die Qualität des Altpapiers kann sich deutlich unterscheiden. Es wird davon ausgegangen, dass Altpapier zunächst für Papiersorten eingesetzt wird, bei denen dies zu niedrigsten

Kosten möglich ist. Gleichzeitig wird das Altpapier höchster Qualität zunächst genutzt. Steigen die Altpapiereinsatzquoten, so wird es zunehmend für Papiersorten eingesetzt, bei denen größerer technischer Aufwand für die Aufbereitung betrieben werden muss. Weiterhin muss zunehmend auch Altpapier schlechterer Qualität genutzt werden und die Kosten für die Altpapiersammlung steigen. Insgesamt muss damit bei steigender Altpapierquote ein zunehmender Aufwand betrieben werden.

Darüber hinaus schränken auch technische Hürden den Altpapiereinsatz weiter ein, da einige Papiersorten, wie Toilettenpapier, nicht zurückgewonnen werden können und mit jedem Recyclingzyklus die Faserlänge abnimmt. Die Zyklenzahl ist auf ca. zehn bis zwölf Zyklen begrenzt (Bos, Staberock 2006). Entsprechend ist eine gewisse Mindestzufuhr von Frischfasern nötig.

Wie das gesamtwirtschaftliche Optimum von Altpapierrecycling aussieht, ist Gegenstand der Forschung und hängt von den geforderten Qualitätseigenschaften, der Kostenstruktur der Primärfaserstoffproduktion sowie des Papiermarktes ab (Geistbeck, Weig 2007).

Auch auf europäischer Ebene besteht das Bestreben, möglichst viel Altpapier einzusetzen. So hat die europäische Papierindustrie bereits zweimal die Absicht erklärt, die Recyclingquote zu steigern. Im Jahr 2000 wurde beschlossen, die notwendigen Maßnahmen zu ergreifen, um die Quote bis zum Jahr 2005 auf 56 % ansteigen zu lassen (CEPI 2000). Im Jahr 2006 wurde dann nachfolgende Erklärung unterzeichnet mit dem Ziel einer Recyclingquote von 66 % (CEPI 2006).

Trotzdem scheinen weitere Potenziale für eine Erhöhung der Altpapiereinsatzquote vorhanden und werden mit steigenden Faserstoffpreisen auch für die Papierhersteller attraktiver. Bezüglich des Altpapieraufkommens zeigt eine aktuelle Untersuchung, dass auch Produktionsabfälle und Schlämme aus den Papierfabriken aufbereitet und als Faserstoff wieder in die Produktion eingehen können (Ochoa de Alda 2008).

Neben dem klassischen Recyclingkreislauf sind in Zukunft auch innovative Recyclingkonzepte denkbar. Laut Counsell und Allwood (2006) weist das herkömmliche Verfahren zum Recycling folgende Nachteile auf:

- Beim Entfernen des Drucks (Deinking) werden relativ große Mengen an brauchbaren Fasern mit entfernt (bis zu 40 %).
- Die Fasern werden zerstört und sind bereits nach wenigen Recyclingzyklen unbrauchbar.
- Der Prozess ist relativ energieintensiv und kann bei Berücksichtigung des Energieverbrauchs für den Transport und das Sammeln des Papiers bis zu 50 % der Energieintensität des Primärprozesses betragen.

Ein innovativer Ansatz, diese Probleme zu lösen, ist das Recycling von Papier noch im Büro (Counsell, Allwood 2006). Hierdurch wird auf die energieintensiven Prozesse verzichtet, da die physikalische Struktur des Papiers erhalten bleibt. Es entfällt der Aufwand für den Transport, die Fasern werden nicht zerstört und die Faserverluste sind niedrig. Es existieren jedoch noch bedeutende (technische) Hürden für die breite Markteinführung, wie das Zurückbleiben von Druckresten auf dem Blatt, die Anwendung von Lösungsmitteln, die den Umwelt- und Arbeitsschutzstandards in Büros nicht gerecht werden, die Notwendigkeit von speziellem Toner oder Papier sowie der noch ungelöste Umgang mit Papier mit Löchern oder Knicken.

Weitere Auswirkungen auf die Papier- und Faserstoffnachfrage gerade im Bereich des grafischen Papiers sind durch neue Verfahren wie „printing on demand“ oder elektronische Lesegeräte („e-book reader“) zu erwarten (Hekkert et al. 2002). Eine aktuelle Studie hat den Energiebedarf von Zeitungen und elektronischen Lesegeräten über den gesamten Lebenszyklus der Produkte verglichen und kam zu dem Schluss, dass – abhängig vom Nutzerverhalten – elektronische Lesegeräte das Potenzial haben den Energiebedarf und andere Umweltwirkungen zu reduzieren (Moberg et al. 2010).

Die Wirkungen des erhöhten Einsatzes von Altpapier auf den Energieverbrauch können in dieser Studie nicht ermittelt werden, da keine Lebenszyklusanalyse durchgeführt werden kann. Die Altpapiereinsatzquote weißt daher in allen vier berechneten Szenarien den gleichen Verlauf auf.

6.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

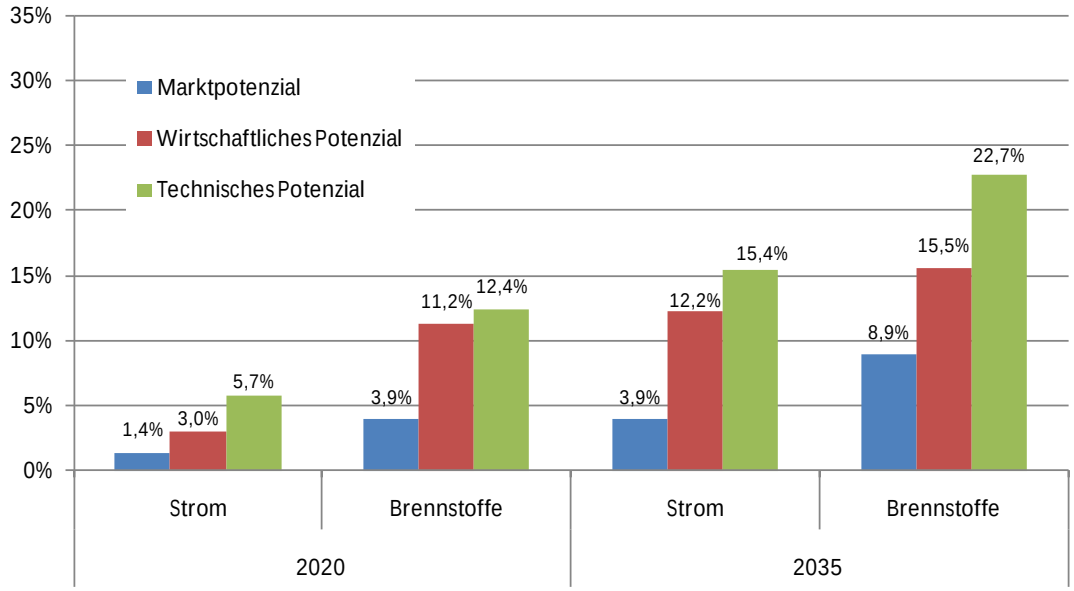
Für die Berechnung der Einsparpotenziale werden alle im vorigen Kapitel diskutierten Einsparoptionen der Prozesse Papierherstellung, Zellstoff-, Holzstoff sowie Altpapierstoffherstellung berücksichtigt. Dabei sind die einzelnen Einsparoptionen ähnlich bezeichnet wie der jeweilige Abschnitt in dem sie beschrieben sind.

Nicht quantifiziert werden mögliche Einsparungen durch eine Steigerung der Altpapiereinsatzquote, Brennstoffsubstitution und die Nutzung von Sekundärbrennstoffen sowie die diskutierte Möglichkeit der Prozesssubstitution und der Einsatz von Füllstoffen um Faserstoffe zu ersetzen (Kapiteln 6.3.6 bis 6.3.9). Sämtliche dieser Ansätze bergen ein teilweise erhebliches Potenzial, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen weiter zu reduzieren und sollten bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse für die vier modellierten Prozesse des Papiergewerbes sind aggregiert in Abbildung 6-14 sowie Abbildung 6-15dargestellt.

Für das Jahr 2035 ergibt sich eine maximale Einsparung beim Stromverbrauch von 15 % und beim Brennstoffbedarf von 23 %, jeweils bezogen auf den Energieverbrauch der betrachteten Prozesse im Frozen-Efficiency-Szenario im Jahr 2035.

Abbildung 6-14: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Papiergewerbes bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario

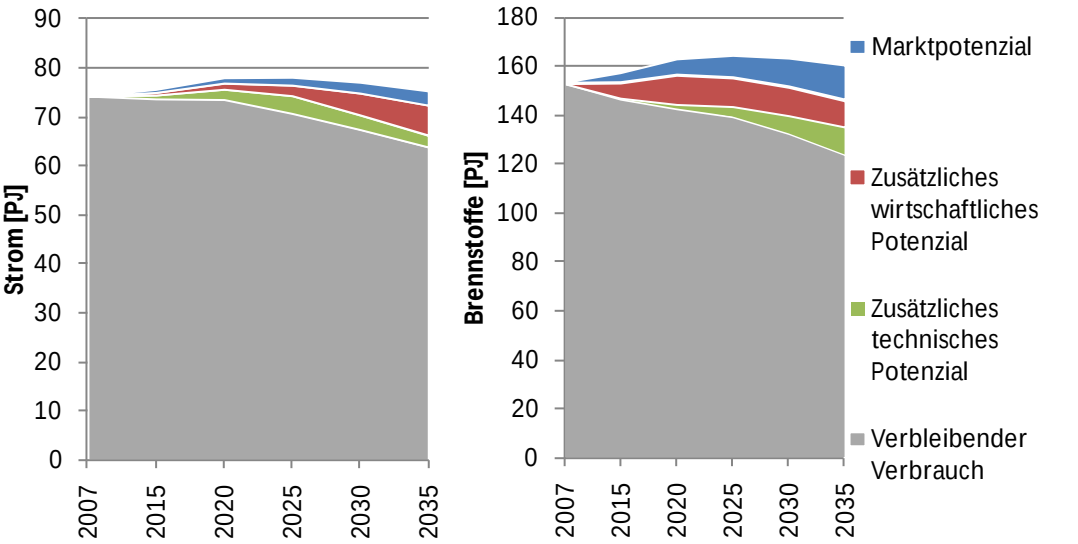


Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Entsprechend der Produktion wächst auch im Frozen-Efficiency-Szenario der Brennstoff- und Strombedarf zunächst weiter an, um dann ab 2025 wieder leicht zu fallen (siehe Abbildung 6-15). Die Verschiebung zu einer stärkeren Nutzung von Altpapier ist in diesem Frozen-Efficiency-Szenario bereits enthalten. Bei Ausnutzung sämtlicher modellierter Einsparoptionen kann diese Reduktion sowohl des Strom- als auch des Brennstoffbedarfs bereits deutlich früher eingeleitet werden.

Im Folgenden ist der spezifische Strom- und Brennstoffbedarf je Prozess dargestellt, der sich hinter der aggregierten Entwicklung verbirgt. Für einzelne Prozesse (mit vergleichsweise niedrigem Energiebedarf), wie die Zellstoffherstellung, wurden keine Einsparpotenziale modelliert und entsprechend bleibt hier der spezifische Energiebedarf konstant. .

Abbildung 6-15: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035



Strom [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	74,4	75,8	78,2	78,3	77,3	75,5
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,6	1,1	1,6	2,2	2,9
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	0,5	1,3	2,2	4,5	6,3
Zusätzliches technnisches Potenzial	0,0	0,8	2,1	3,7	3,0	2,4

Brennstoffe [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	153,4	157,4	163,2	164,6	163,5	160,6
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	3,8	6,4	8,9	11,6	14,3
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	6,2	11,9	11,7	11,6	10,7
Zusätzliches technnisches Potenzial	0,0	0,6	1,9	4,3	7,5	11,5

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Ein Blick auf den absoluten Energiebedarf je Prozess (Tabelle 6-12) gibt Aufschluss darüber, wie sich die strukturellen Verschiebungen zwischen den Prozessen auswirken und welche Prozesse auch langfristig am bedeutendsten sind. Durch die weiter steigende Altpapiereinsatzquote steigt auch die Produktion von Altpapier weiter und somit auch der Energiebedarf im Frozen-Efficiency-Szenario. Entsprechend wird weniger Zellstoff und Holzstoff produziert und der absolute Energiebedarf dieser beiden Prozesse sinkt bereits im Frozen-Efficiency-Szenario.

Welche Technologien hinter den Effizienzverbesserungen stehen zeigt Tabelle 6-14. Hier ist die Differenz des Technischen Szenarios zum Frozen-Efficiency-Szenario für das jeweilige Jahr angegeben. D. h., es wird auf dieser Ebene keine Aussage zur Wirtschaftlichkeit der einzelnen Einsparoptionen gemacht, sondern die möglichen Einsparungen bei hinterlegter Marktdurchdringung ausgewiesen.

Tabelle 6-11: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess und Szenario

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Altpapierstoff	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Holzstoff	7,5	7,2	7,2	7,1	6,7	7,1	6,6	6,2	5,0
Papier	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,6	1,8	1,6
Zellstoff	2,4	2,5	2,5	2,5	2,2	2,5	2,2	2,4	1,5

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Altpapierstoff	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Holzstoff	-1,9	-1,8	-1,8	-2,0	-2,1	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2
Papier	5,5	5,5	5,5	5,3	5,0	4,8	4,5	4,7	4,1
Zellstoff	13,4	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die im Vergleich relativ geringen Einsparungen bei der Herstellung von Altpapierstoff entfallen auf vier einzelne Einsparoptionen. Da dieser Prozess in mehrere kleinere Prozessschritte unterteilt ist, können einzelne Einsparoptionen, die bei einem Prozessschritt ansetzen, bezogen auf den gesamten Prozess nur relativ niedrige Einsparungen bewirken, selbst wenn sie den jeweiligen Prozessschritt deutlich verbessern. Die vier modellierten Einsparoptionen geben somit nur einen Teil der möglichen Einsparungen wieder. Bei der Holzstoffherstellung ist das Bild anders, hier ist das Schleifen bzw. Mahlen des Holzes der mit Abstand energieintensivste Prozess. Deshalb konzentrieren sich die Einsparoptionen hierauf. Einzelne Einsparoptionen wie effiziente Schleifflächen oder Refiner entfalten erst bis 2035 ihr volles Potenzial. Hingegen ist die Wärmerückgewinnung bei der Abwärme von Refinern und Schleifsteinen bereits im Jahr 2007 sehr weit verbreitet und kann in den nächsten Jahren relativ vollständig eingesetzt werden. Dass die absoluten Potenziale bis 2035 hier sogar zurückgehen ist auf die rückläufige Produktionszahl bei Holzstoff zurückzuführen. Beim Zellstoff wurde nur die Ablaugenvergasung mit kombinierter Verstromung modelliert. Sicherlich sind auch hier eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten vorhanden, den Energieverbrauch des Prozesses zu optimieren, diese wurden jedoch nicht explizit modelliert, da sie sich auch hier auf mehrere einzelne Prozesse verteilen wodurch die einzelne Einsparoption relativ klein wäre. Da die Ablaugenvergasung derzeit noch in der Entwicklungsphase ist, wurde für die Berechnung angenommen, dass sie erst im Jahr 2020 kommerziell verfügbar sein wird. Wenngleich die Technologie hier als Einsparung von Strom bilanziert wird, so ist

es im engeren Sinne keine Einsparung sondern die effizientere Nutzung von Produktionsabfällen zur Eigenstromerzeugung.

Tabelle 6-12: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Altpapierstoff	14,79	16,21	16,73	16,01	16,33	15,78	15,29	15,60	15,29
Holzstoff	11,53	10,73	7,93	10,51	7,42	10,51	7,24	9,30	5,49
Papier	44,54	47,83	48,28	47,15	46,60	46,13	41,55	45,53	41,55
Zellstoff	3,55	3,43	2,53	3,43	2,18	3,43	2,18	3,28	1,54
Summe	74,42	78,19	75,47	77,10	72,53	75,84	66,27	73,70	63,87

	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Altpapierstoff	8,50	9,31	9,61	9,26	9,49	9,13	9,18	9,13	9,18
Holzstoff	-2,93	-2,72	-2,01	-2,94	-2,34	-3,31	-2,44	-3,31	-2,44
Papier	128,25	137,72	139,04	131,62	125,22	120,18	114,94	118,25	103,45
Zellstoff	19,54	18,84	13,92	18,84	13,92	18,84	13,92	18,84	13,92
Summe	153,37	163,15	160,56	156,78	146,29	144,85	135,59	142,92	124,11

	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Altpapierstoff	3087	3200	2292	3165	2242	3120	2115	3089	2115
Holzstoff	1913	1664	766	1614	695	1596	670	1392	479
Papier	14601	15100	12041	14673	11184	13915	10132	13716	9572
Zellstoff	1646	1542	954	1542	916	1542	916	1517	846
Summe	21247	21507	16053	20996	15037	20172	13833	19714	13012

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 6-13: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse

	Produktion [kt]					
Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Altpapierstoff	15.737	16.476	17.242	17.785	17.929	17.799
Holzstoff	1.545	1.520	1.490	1.346	1.217	1.100
Papier	23.319	24.008	25.040	25.536	25.567	25.280
Zellstoff	1.456	1.383	1.355	1.225	1.107	1.001

Bei der Papierherstellung setzen die meisten Einsparoptionen entweder bei der Nachmahlung der Faserstoffe oder beim Energiebedarf für die Trocknung der Papierbahn an. Natürlich wird auch in der Papierfabrik an anderen Prozessschritten Energie verbraucht, an denen sich weitere Einsparungen ergeben können. Einsparoptionen wie die bereits relativ weit verbreiteten Dampfblaskästen oder die optimierte Wärmenutzung können relativ kurzfristig erschlossen werden und entfalten bis 2020 bereits ihre

maximale Wirkung. Andere Technologien beginnen mit der Marktdiffusion erst zwischen 2015 und 2020, wie die chemische Fasermodifikation oder die innovativen Trocknungsverfahren.

Von allen betrachteten Einsparoptionen haben nur die Ablaugenvergasung, die chemische Fasermodifikation und die innovativen Trocknungsverfahren ihr volles Potenzial bis 2035 noch nicht entfaltet. Gründe hierfür sind sowohl eine lange Anlagenlebensdauer als auch die relativ späte Markteinführung dieser Techniken.

Tabelle 6-14: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (technisches Potenzial)

	Energie-Einsparpotenzial						THG Vermeidung		
	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brenn-stoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Papiergewerbe	4,49	11,60	20,23	36,45	**15%**	**23%**	1.793	3.041	**14%**
Altpapierstoff	0,61	1,44	0,18	0,43	**9%**	**4%**	112	178	**5%**
De-Inking Optimierte Flotation	0,34	0,89	-	-			58	97	
Effiziente Siebung	0,13	0,30	-	-			21	33	
Hochkonsistenzstoffauflösung	0,14	0,25	-	-			23	27	
Wärmerückgewinnung	-	-	0,18	0,43			9	21	
Holzstoff	1,44	2,44	0,59	0,43	**31%**	**-21%**	271	287	**22%**
Enzymatische Vorbehandlung	0,32	0,40	-	-			53	43	
Hocheffiziente Refiner	0,24	0,31	-	-			41	34	
Hocheffiziente Schleiffläche	0,88	1,74	-	-			148	189	
Wärmerückgewinnung (TMP, GW)	-	-	0,59	0,43			30	21	
Papier	2,30	6,73	19,47	35,59	**14%**	**26%**	1.385	2.468	**16%**
Chemische Fasermodifikation	0,39	2,74	0,48	3,41			90	465	
Dampfblaskasten	-	-	0,72	0,73			37	35	
Hocheffiziente Refiner	0,88	2,66	-	-			148	290	
Innovative Trocknungsverfahren	-	-	2,89	14,60			148	712	
Optimierung des Refinerbetriebs	1,03	1,33	-	-			173	144	
Schuhpresse	-	-	1,60	2,95			82	144	
Wärmeintegration	-	-	13,77	13,90			707	678	
Zellstoff	0,15	0,99	-	-	**39%**	**0%**	25	108	**9%**
Ablaugenvergasung	0,15	0,99	-	-			25	108	

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI basierend auf den in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Insgesamt zeigt diese Analyse, dass im Papiergewerbe noch beträchtliche Möglichkeiten bestehen, die Energieeffizienz zu verbessern. Aufgrund der Vielfalt der Prozesse und Prozessschritte kann in einer technologiebasierten Analyse naturgemäß nur ein Teil davon berücksichtigt werden, wenngleich der Schwerpunkt dieser Studie auf den vielversprechendesten Einsparoptionen liegt.Diese sind zum Teil sehr kurzfristig realisierbar und tendenziell auch sehr wirtschaftlich und zu einem anderen Teil derzeit noch relativ teuer bzw. technisch noch nicht ausgereift, jedoch mit hohen langfristigen Potenzialen.

Überschneidungen und Wechselwirkungen zwischen Einsparoptionen

Da sich viele der Einsparoptionen auf den gleichen Prozess bzw. Prozessschritt beziehen müssen mögliche Überschneidungen und wechselseitige Auswirkungen der Ein-

sparoptionen berücksichtigt werden. Soweit möglich wurde dies bei der Definition der einzelnen Einsparoptionen gemacht. So wurde, wenn sich mehrere Optionen auf den gleichen Prozessschritt beziehen, darauf geachtet, ob die Durchführung einer Option (z. B. Reduzierung von Wärmeverlusten) eine zweite Option beeinflusst (z. B. Rückgewinnung von Abwärme). War dies der Fall wurde das spezifische Einsparpotenzial der Option entsprechend reduziert. Am meisten Überschneidungen ergaben sich für bei der Trocknung der Papierbahn, da an diesem energieintensiven Prozess relativ viele Einsparoptionen ansetzen.

Wenn einzelne Optionen nur für einen Teil eines Prozesses angewendet werden können, wurde dies bei der maximalen Verbreitung der Einsparoptionen entsprechend berücksichtigt. Für den im Modell als Holzstoffherstellung definierten Prozess werden in der Realität zwei verschiedene Verfahren eingesetzt (siehe 6.2.2). Die Einsparoption „energieeffiziente Schleifflächen“ bezieht sich nur auf eines der beiden Verfahren, das Holzschliff-Verfahren. In Deutschland macht das Holzschliff-Verfahren zwei drittel der Holzstoffproduktion aus und somit ergibt sich für die Einsparoption „energieeffiziente Schleifflächen“ eine maximale Verbreitung von 66 % bezogen auf die gesamte Holzstoffherstellung.

Nicht quantifizierte weitere Einsparmöglichkeiten

Wie bereits erwähnt sind neben den hier quantifizierten Potenzialen noch weitere Einsparmöglichkeiten vorhanden, die jedoch über den Betrachtungsrahmen dieser Studie hinausgehen. Dies sind:

- Die Substitution von Brennstoffen und der Einsatz von Sekundärbrennstoffen: Hierzu wurde für die Modellierung angenommen, dass die Verteilung der Brennstoffe im Papiergewerbe auf dem Wert von 2007 bleibt, da im Fokus dieser Studie Energieeinsparungen stehen und keine Verschiebungen zwischen den Energieträgern.
- Der Einsatz radikal neuer Verfahren zur Papierherstellung, die z. B. die „wasserlose Papierherstellung“: Diese Konzepte befinden sich derzeit noch in der Ideenfindung und es sind keine Informationen zu möglichen Auswirkungen auf den Energieverbrauch vorhanden, sodass es kaum in einer technologiebasierten Modellierung berücksichtigt werden kann. Weiterhin gibt es hier sehr große Überschneidungen mit anderen Einsparoptionen, die darauf abzielen den bisherigen Papierprozess zu verbessern. Die meisten dieser Einsparoptionen wären überflüssig, würde ein völlig neues Papierherstellungsverfahren genutzt.
- Der verstärkte Einsatz von Füllstoffen wie Kaolin, welche ermöglichen die energieintensiven Faserstoffe zu ersetzen: Für die Nutzung von Füllstoffen ist vorwiegend der Preis für Faserstoffe ausschlaggebend. Füllstoffe werden somit nicht alleine aus energetischen Überlegungen eingesetzt, sondern vorwiegend um Rohstoffkosten zu sparen. Somit ist der Füllstoffeinsatz nicht als Einsparoption für die Modellierung de-

finiert. Es fließt jedoch eine Annahme zur Entwicklung der Füllstoffe in gleichem Maße in alle berechneten Szenarien ein, indem der Einsatz von Füllstoffen die Produktion der Faserstoffe reduziert. Eine derzeit zwischen 15 und 18 % schwankende Füllstoffquote wird sich langfristig in allen Szenarien auf 19 % etablieren. Dadurch wird die Produktion von Faserstoffen leicht gesenkt und entsprechend auch der Energieverbrauch. Für eine umfassende Analyse der Auswirkungen des Füllstoffeinsatzes müsste allerdings auch der Energieaufwand für die Herstellung der Füllstoffe einbezogen werden, welcher hier außerhalb der Systemgrenzen der Papierherstellung liegt.

- Eine weitere Steigerung der Altpapiereinsatzquote: Der Altpapiereinsatz wird im Modell ähnlich wie der Einsatz von Füllstoffen berücksichtigt. Für alle Szenarien wurde hinterlegt, dass die derzeitige Altpapiereinsatzquote von 84 % langfristig auf 89 % ansteigt. Entsprechend sinkt die Produktion von Holz- und Zellstoffen und die Produktion von altpapierbasierten Faserstoffen nimmt zu.
- Einsparpotenziale bei Querschnittstechniken wie Motoren, Pumpen, Beleuchtung etc.: Diese Techniken sind wie zu Anfang definiert explizit vom Untersuchungsgegenstand ausgeschlossen. Diese Einschränkung ist wichtig für die Interpretation der Ergebnisse, da gerade der intensive Einsatz an Pumpen, Ventilatoren und anderen Motoranwendungen im Papiergewerbe hohe Einsparpotenziale aufweist.
- Generell stellen die 14 in dieser Studie betrachteten Einsparoptionen nur eine Auswahl dar. Obwohl gezielt die wichtigsten Einsparmöglichkeiten berücksichtigt werden sollten, so kann sicherlich davon ausgegangen werden, dass darüber hinaus noch viele kleinere Möglichkeiten bestehen, die aber in der Summe weiterhin den Energieverbrauch merklich senken könnten.
- Neue Technologien: Weiterhin ist davon auszugehen, dass derzeit noch unbekannte Effizienzinnovationen erscheinen und langfristig deutliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben werden.

6.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren

Hemmnisse

Thollander und Ottosen (2008) haben eine Umfrage unter schwedischen Papier- und Zellstoffherstellern durchgeführt und versucht die wichtigsten Hemmnisse und fördernden Faktoren zu ermitteln. Größtes Hemmnis für den Einsatz energieeffizienter Techniken sind demnach die mit einem Produktionsausfall verbundenen Risiken und Kosten. Weiterhin als wichtig beurteilt wurden eher firmeninterne Faktoren wie Zeitmangel oder auch die Budgetverfügbarkeit für die Investition.

Technologiespezifische Barrieren sind häufig sehr ausgeprägt bei neuen Technologien. Hier spielt die Risikobereitschaft, sowohl der Anlagenhersteller als auch der Papierfabriken, eine zentrale Rolle. Neue Technologien können nur in den Markt dringen, wenn einige Papierhersteller bereit sind, diese Technologien als erste anzuwenden, auch wenn diese bisher nur in einzelnen Demonstrationsanlagen getestet wurden. Gleichzeitig müssen Anlagenhersteller bereit sein, die Entwicklungskosten für innovative Technologien zu tragen, ohne sicher sein zu können, dass es schließlich Papierfabriken geben wird, die diese Technologien als Erste einsetzen werden. Dies trifft auf Technologien wie innovative Trocknungsverfahren, chemische Fasermodifikation oder hocheffiziente neue Refiner zu. In noch größerem Maße sind radikal neue Prozessgestaltungen wie die wasserlose Papierherstellung betroffen.

Die geringe Risikobereitschaft der Papierfabriken zeigt sich auch darin, dass in vielen Unternehmen Effizienzinvestitionen nur durchgeführt werden, wenn die Amortisationszeit maximal zwei Jahre beträgt. Betrachtet man die häufig längere Lebensdauer der Anlagen so zeigt sich, dass viele wirtschaftliche Effizienzinvestitionen nicht durchgeführt werden.

Ein sehr spezielles Hemmnis der Energie- und Ressourceneinsparung hängt damit zusammen, dass es üblich ist, Papier massebezogen zu verkaufen. Indem die Preise auf die Masse des Papiers bezogen werden entfallen jegliche Anreize möglichst Ressourceneffizient zu produzieren und hochwertiges Papier mit geringem Fläche-Masse-Verhältnis zu produzieren.

Fördernde Faktoren

Fördernde Faktoren sind immer präsent, wenn die Effizienztechnologien weitere positive Nebeneffekte für das Unternehmen aufweisen.

Wegen der hohen Investitionskosten der Papiermaschine (siehe Kapitel 6.2.4) gibt es einen hohen, ständigen Wettbewerbsdruck, eine möglichst hohe Produktionskapazität zu erreichen. Die Kapazität ist somit (neben der Papierqualität) wichtigster Treiber für Innovationen in der Papierherstellung. Auch Energieeffizienzinnovationen müssen sich an diesen Anforderungen messen und haben nur eine Chance auf weite Verbreitung, wenn sie sowohl die Qualität als auch die Produktionsgeschwindigkeit nicht senken. Besonders schnell verbreiten sich Energieeffizienzinnovationen, die sich positiv auf die Produktionsgeschwindigkeit auswirken.

Bei Innovationen wie der Schuhpresse konnten diese fördernden Faktoren deutlich beobachtet werden. Neben Vorteilen durch eine gesteigerte Produktionskapazität bietet die Schuhpresse auch die Möglichkeit, die Länge der Papiermaschine zu verringern

und damit knappen Platz einzusparen (Luiten, Blok 2003). Diese Nebeneffekte waren in vielen Fällen der eigentliche Grund für den Einsatz der Schuhpresse.

Ähnliche Nebeneffekte könnten bei anderen innovativen Trocknungsverfahren auftreten indem zum Beispiel die Anzahl der Trocknungszylinder reduziert werden kann. Bei der chemischen Fasermodifikation oder auch bei der Kompressionsmahlung wird erwartet, dass die Fasern schonender behandelt werden als beim herkömmlichen Scheibenrefiner. Dies kann sich entsprechend positiv auf die Produkteigenschaften auswirken.

Auch der momentan hohe Faserstoffpreis kann ähnlich wie hohe Energiepreise ein treibender Faktor für Energieeinsparungen werden, indem zwar primär versucht wird den Rohstoffverbrauch zu reduzieren (z. B. durch den Einsatz von Füllstoffen) aber durch die niedrigere Faserstoffproduktion auch der Energieverbrauch gesenkt wird.

6.6 Branchenspezifische politische Instrumente

6.6.1 Bestehende Instrumente

Es bestehen bereits eine Reihe politischer Instrumente, die zum Ziel haben, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Papiergewerbe zu senken. Diese sollen im Folgenden kurz beschrieben werden. Es wird dabei nur auf Besonderheiten für das Papiergewerbe eingegangen, generelle Beschreibungen der Instrumente sind Kapitel 2 zu entnehmen.

Der ***Europäische Emissionshandel*** ist seit 2005 in Kraft und die meisten Werke der Papier- und Zellstoffherstellung nehmen am Handel teil[66]. Die Zuteilung der Zertifikate geschieht in der ersten und zweiten Handelsperiode (2005-2012) anhand der historischen Emissionen der Anlagen („Grandfathering“). Die Zuteilung von Emissionszertifikaten für die dritte Handelsperiode von 2013 bis 2020 nicht mehr auf Grandfatherings sondern sieht eine Auktionierung der Zertifikate vor. Für die Papierherstellung – wie für andere energieintensive Industriezweige – wurden Produktbenchmarks eingeführt. Dieser Benchmark macht demnach die Menge der zu ersteigernden Zertifikate von den spezifischen Emissionen der einzelnen Anlage abhängig; ineffiziente Anlagen müssen mehr Zertifikate ersteigern.

66 ausgenommen sind Papierfabriken mit einer Produktion von 20 oder weniger Tonnen pro Tag.

Für die Papierherstellung stellt die relativ große Vielfalt an Produkten und Anlagen eine Herausforderung für Benchmarks dar. Eine Studie zur möglichen Ausgestaltung von Produktbenchmarks ermittelte alleine sieben einzelne Benchmarks für nicht-integrierte Papierfabriken (Ecofys et al. 2009). Unabhängig von der Höhe der Produktbenchmarks wird der Emissionshandel bei höheren Zertifikatpreisen in Zukunft stärkere Anreize auf die Papierfabriken ausüben Emissionen zu reduzieren und Energie einzusparen.

In der ***freiwilligen Selbstverpflichtung der Industrie zur Reduktion der Treibhausgasemissionen***[67] hat sich die Zellstoff- und Papierindustrie verpflichtet, ihre spezifischen Treibhausgasemissionen je Tonne Papier bis 2012 um 35 % zu senken, bezogen auf das Jahr 1990. Dieses Ziel wurde im Jahr 2009 erreicht, wenngleich die absoluten Emissionen aufgrund des Produktionsanstiegs über diesen Zeitraum weiter gewachsen sind (RWI 2010).

Im Rahmen des ***Sonderfonds Energieeffizienz für KMU*** bietet die KfW Mittelstandsbank Zuschüsse zu Energieberatungen sowie zinsgünstige Kredite für Energieeffizienzinvestitionen an. Dieses Programm kann von Unternehmen bis zu einer Mitarbeiterzahl von 250 genutzt werden. Somit fällt ein Großteil der Papierfabriken aus dem Förderraster des Programms. Für die kleineren Papierfabriken kann der Sonderfonds jedoch eine interessante Möglichkeit sein, Energieeffizienzverbesserungen zu identifizieren und umzusetzen.

Wie die übrige energieintensive Industrie auch, sind die Papier- sowie Zellstoffwerke von der ***Ökosteuer*** größtenteils ausgenommen.

Das ***Erneuerbare-Energien-Gesetz*** (EEG) kann gerade für das Papiergewerbe weitere Anreize setzen, die vorhandenen organischen Abfälle und Produktionsausschuss zur Stromerzeugung zu nutzen.

Energiemanagementsysteme stellen ein geeignetes Instrument dar, die in den Papierfabriken vorhandenen Einsparpotenziale systematisch aufzudecken und zu erschließen. Es ist jedoch unklar, wie viele Papierfabriken solche Systeme bisher einsetzen. Etwa 15 % der Papierfabriken führen nach dem Europäische Umweltmanagementsystem EMAS ein Umweltaudit durch.

---

67 Vereinbarung zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge vom 9. November 2000.

6.6.2 Weitere Empfehlungen zu Instrumenten

Die Analyse der Einsparpotenziale hat gezeigt, dass sowohl durch relativ kurzfristig mögliche Optimierungen an bestehenden Anlagen als auch langfristig durch den Einsatz neuer Technologien beachtliche Einsparpotenziale vorhanden sind.

Zum Erschließen der kurzfristigen Potenziale sind Energiemanagementsysteme oder Energieaudits förderlich. Nur eine systematische und regelmäßige Analyse und Bewertung von Einsparmöglichkeiten kann gewährleisten, dass eine Papierfabrik energetisch optimal betrieben wird und mögliche attraktive Einsparmöglichkeiten erkannt und realisiert werden. Ein Energiemanagementsystem, dass auch von der Geschäftsführung unterstützt wird, kann sich alleine durch die Umsetzung von gering investiven Maßnahmen selbst finanzieren. Mittelfristig sind jedoch auch größere Investitionen nötig um wirtschaftliche Einsparpotenziale zu heben. Die Vergabe von (zinsgünstigen) Investitionskrediten kann helfen Hemmnisse, die mit Budgetrestriktionen verbunden sind, zu überwinden.

Alleine durch Einsatz bester verfügbarer Technik und Optimierung bestehender Anlagen sind die Potenziale langfristig jedoch begrenzt. Ein wichtiger Aspekt ist daher die Förderung von Forschung und Entwicklung neuer effizienter Technologien und ihrer Markteinführung. Im Bereich effizienter Trocknungskonzepte oder Mahlverfahren ist hier eine relativ hohe Aktivität zu beobachten. In diesem Zusammenhang kommt auch Demonstrationsanlagen eine kritische Bedeutung zu, indem sie die Anwendbarkeit neuer Technologien nachweisen und mögliche Befürchtungen bezüglich Produktionsausfällen und anderen Risiken ausräumen können und so die Markteinführung beschleunigen. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Papierherstellern, Anlagenherstellern und Forschungseinrichtungen sowohl bei der Entwicklung neuer Technologien als auch bei der Optimierung der Prozessführung ist ein wichtiges Element für weitere Effizienzsteigerungen in der Papierindustrie. Anlagenhersteller und Papierfabriken können bei der gemeinsamen energetischen Optimierung der Prozessführung voneinander lernen. Das erlangte Wissen kann danach auch bei der Entwicklung neuer Produkte hilfreich sein.

In größeren Konzernen, die mehrere Werke betreiben, scheint ein internes Energie-Benchmarking zum Vergleich von Werten zum spezifischen Energieverbrauch sehr gut geeignet um mögliche Einsparpotenziale im Anlagenbestand aufzudecken.

6.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Analyse der Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung im Papiergewerbe hat gezeigt, dass mit den ausgewählten 16 Einsparoptionen eine Reduktion des Strombedarfs um 15 % und des Brennstoffbedarfs um 23 % bis 2035 technisch möglich ist – jeweils im Vergleich zu einem Frozen-Efficiency-Szenario. Die größten Potenziale zur Einsparung von Brennstoffen liegen im Bereich der Abwärmenutzung bzw. Optimierung der Wärmeflüsse in den Papierfabriken sowie einer effizienteren Trocknung der Papierbahn, die derzeit etwa die Hälfte des Energiebedarfs von Papierfabriken ausmacht. Stromeinsparungen sind vorwiegend bei den Mahl- und Schleifprozessen vorhanden – sowohl bei der Holzstoffherstellung als auch in der Papierfabrik bei der Nachmahlung. Die gesamte Papierindustrie, aber vor allem die Werke zur Zellstoffherstellung, weist ein hohes Potenzial für die Nutzung biogener Rohstoffe auf, etwa über die Vergasung von Ablauge.

Ein Großteil dieser Einsparungen ist bei gegebener Entwicklung der Szenario-Parameter[68] als wirtschaftlich einzustufen. Schnelleres technologisches Lernen könnte die Wirtschaftlichkeit weiter verbessern – gerade von innovativen Effizienztechnologien.

Die Energieeinsparungen gehen sowohl auf eine relativ kurzfristige Optimierung bestehender Anlagen zurück, als auch auf die Entwicklung und den Einsatz neuer Technologien, die erst langfristig ihre Wirkung entfalten können. Bei letzteren führt auch die lange Lebensdauer der Anlagen dazu, dass bis 2035 noch nicht alle Potenziale erschlossen werden können.

Über die hier quantifizierten 16 Einsparoptionen hinaus gibt es noch vielfältige Möglichkeiten in der Papierherstellung Energie und Treibhausgasemissionen einzusparen. Diese reichen von klassischen Optionen wie verstärktem Altpapiereinsatz über Brennstoffwechsel und eine höhere Füllstoffquote hin zu radikal neuen Verfahren wie einer wasserlosen Papierherstellung, die langfristig neue Impulse bringen können. Weiterhin impliziert der gewählte technologiebasierte Ansatz in dieser Studie, dass besonders viele kleinere Einsparmöglichkeiten nicht quantifiziert werden können.

Als hemmend für den Einsatz von neuen, effizienten Technologien zeigten sich die relativ anspruchsvollen Anforderungen an die Amortisationszeit von Investitionen mit häufig weniger als 2-3 Jahren, aber auch die Befürchtung, dass Eingriffe in den Produktionsprozess oder neuartige Verfahren zu Produktionsausfällen führen können oder die Produktqualität negativ beeinflussen könnten. Effizienztechnologien hingegen, die

68 langsam steigende Preise für Energieträger und Emissionszertifikate (bis 35 €/t CO_2 in 2035).

neben den Energieeinsparungen auch Vorteile wie eine erhöhte Produktionskapazität mit sich bringen haben besonders gute Chancen eine schnelle Verbreitung zu finden.

Vermutlich werden die Rahmenbedingungen in Zukunft Effizienzmaßnahmen noch lukrativer machen, indem zum einen der Emissionshandel ambitionierter wird und höhere Zertifikatepreise zu erwarten sind, und zum anderen auch bei den Energiepreisen langfristig weitere Steigerungen zu erwarten sind. Trotzdem werden die vorhandenen Einsparpotenziale alleine hierdurch nicht erschlossen. Ein systematisches Energiemanagement auf der einen Seite und ein stärkerer Fokus bei der Forschung und Entwicklung auf energie- und ressourceneffizienten Verfahren verbunden mit einer Förderung der Markteinführung neuer Technologien auf der anderen Seite werden entscheidend über die Geschwindigkeit des Effizienzfortschrittes bestimmen.

6.8 Literatur

AGEB (2010): Vorwort zu den Energiebilanzen: AG-Energiebilanzen. Online: http://www.ag-energiebilanzen.de, 17.2.2011

Andritz AG (2006): LemaxX Spiral. Online: spectrum.andritz.com/lemaxx_spiral.pdf, 8.4.2010

Blum, O.; Hutter, A. (2008): Praxisbeispiele zur Optimierung des Energiebedarfs in Papierfabriken. In: Allgemeine Papierrundschau, 02/2008, S. 19-20

Blum, O.; Maur, B.; Öller, H.-J. (2007): Revision of best available technique reference document for the pulp & paper industry: use of energy saving techniques. Papiertechnische Stiftung (PTS) (Hrsg.), München

Bos, J. H.; Staberock, M. (2006): Papierbuch: Handbuch der Papierherstellung, 2.: ECA Pulp and Paper.

Brand, J.; Pinter, H.; Sattler, M.; Schweighofer, M.; Starzer, O.; Tretter, H. (2005): Chancen der Papierindustrie im Rahmen der Klimastrategie: Energieeffizienz und CO_2-Emissionen der Österreichischen Papierindustrie – Entwicklungen und Potenziale. Wien: Austropapier

Brettschneider, W. (2007): Energiekostenreduzierung – auch in der Stoffaufbereitung, eine Herausforderung. In: twogether – Magazin für Papiertechnik, 24, S. 11-15

CEPI (2000): Euopean Declaration on Paper Recovery. Brüssel: Confederation of European Paper Industries

CEPI (2006): Euopean Declaration on Paper Recycling 2006-2010. Brüssel: Confederation of European Paper Industries

CEPI (2008): Key Statistics 2008: Confederation of European Paper Industries

Counsell, T.; Allwood, J. (2006): Desktop paper recycling: A survey of novel technologies that might recycle office paper within the office. In: Journal of Materials Processing Technology, 173 (1), S. 111-123

De Beer, J.; Worrell, E.; Blok, K. (1998): Long-term energy-efficiency improvements in the paper and board industry. In: Energy, 23 (1), S. 21-42

Dekker, J. C. (2008): Kompressionsmahlung: Die Entwicklung einer neuen Mahltechnologie zur Energieeinsparung bei der Papierherstellung: PTS Paper Symposium

Ecofys; Fraunhofer ISI; Öko-Institut (2009): Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Brussels: European Commission.

Erhard, K.; Arndt, T.; Miletzky, F. (2010): Einsparung von Prozessenergie und Steuerung vonPapiereigenschaften durch gezielte chemische Fasermodifizierung. In: European Journal of Wood and Wood Products, 68 (3), S. 271-280.

European IPPC Bureau (2010): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) – Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry: European Commission.

Fehrenbach, D. (2008): Identifikation und Modellierung sektorspezifischer Energieeinsparpotenziale in der Papierindustrie. Universität Karlsruhe, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.

Franzen, R. (2006): Recent developments in mechanical pulping. In: ipw – The magazine for the international pulp & paper industry, 9/2006, S. 52-56

Gabl, H. (2004): Papillon – A new refining concept. In: ipw – The magazine for the international pulp & paper industry (2), S. 43-50

Geistbeck, M.; Weig, X. (2007): Die Verwendung von Altpapier und dessen Grenzen. In: ipw – The magazine for the international pulp & paper industry, 3/2007, S. 45-49

Hekkert, M.; Vandenreek, J.; Worrell, E.; Turkenburg, W. (2002): The impact of material efficient end-use technologies on paper use and carbon emissions. In: Resources, Conservation and Recycling, 36 (3), S. 241-266

IEA (2008): Energy technology perspectives: scenarios and strategies to 2050, Paris: OECD/IEA

IFEU (2006): Ökologischer Vergleich von Büropapier in Abhängigkeit vom Faserrohstoff, Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

IUTA; PTS; LTT; EUTech (2008): Branchenleitfaden für die Papierindustrie. Duisburg: Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.; PTS Papiertechnische Stiftung; RWTH Aachen Lehrstuhl für Technische Thermodynamik; EUtech Energie & Management GmbH

Jochem, E.; Angerer; Gerhard; Ball, M.; Bradke, H.; Celik, B.; Eichhammer, W.; Mannsbart, W.; Marschneider-Weidemann, F.; Walz, R.; Wietschel, M.; Nathani, C.; Schön, M. (2003): Werkstoffeffizienz – Systemanalyse zu den Kreislaufpotenzialen energieintensiver Werkstoffe und ihrem Beitrag zur rationellen Energienutzung, Fraunhofer Verlag Stuttgart

Joelsson, J. M.; Gustavsson, L. (2008): CO_2 emission and oil use reduction through black liquor gasification and energy efficiency in pulp and paper industry. In: Resources, Conservation and Recycling, 52 (5), S. 747-763

Keniry, J. (2001): The economics of inert anodes and wettable cathodes for aluminum reduction cells. In: JOM – The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 53 (5), S. 43-47

Laurijssen, J.; De Gram, F.J.; Worrell, E.; Faaij, A. (2010): Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry. In: Energy, 35 (9), S. 3738-3750

Leinonen, A. (2006): A long search for energy efficient wood grinding – Mikael Lucander was awarded for his innovative research. In: link – KCL's customer magazine for re-inventing paper, 1/2006, S. 10-12

LfU; PTS (2002): Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie – Nutzung von Niedertemperaturabwärme. München: Bayrisches Landesamt für Umweltschutz (LfU)

Luiten, E.; Blok, K. (2003): The success of a simple network in developing an innovative energy-efficient technology. In: Energy, 28 (4), S. 361-391

Luiten, E.; Blok, K. (2004): Stimulating R&D of industrial energy-efficient technology. Policy lessons – impulse technology. In: Energy Policy, 32 (9), S. 1087-1108

Martin, A. (2004): Energy analysis of impulse technology: research-scale experimental paper-making trials and simulations of industrial applications. In: Applied Thermal Engineering, 24 (16), S. 2411-2425

Martin, N.; Worrell, E.; Ruth M.; Price, L.; Elliot, R.N.; Shipley, A.M.; Thorne, J. (2000): Emerging energy efficient industrial technologies: Berkeley National Laboratory

Metso Paper Inc. (2008): Turbine Segments – Next generation of low-energy refiner segments technology. Online: http://www.metso.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-040518-2256C-AD70B/$File/Turbine_Segments_brochure.pdf?openElement, 25.3.2010

Moberg, Å.; Johansson, M.; Finnveden, G.; Jonsson, A. (2010): Printed and tablet e-paper newspaper from an environmental perspective—A screening life cycle assessment. In: Environmental Impact Assessment Review, 30 (3), S. 177-191

Monte, M.C.; Fuente, E.; Blanco, A.; Negro, C. (2009): Waste management from pulp and paper production in the European Union. In: Waste Management, 29 (1), S. 293-308

Naqvi, M.; Yan, J.; Dahlquist, E. (2010): Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review. In: Bioresource Technology, 101 (21), S. 8001-8015

Nathani, C. (2002): Modellierung des Strukturwandels beim Übergang zu einer materialeffizienten Kreislaufwirtschaft – Kopplung eines Input-Output-Modells mit einem Stoffstrommodell am Beispiel der Wertschöpfungskette „Papier“. Heidelberg: Physica-Verlag

Ochoa de Alda, J.A.G. (2008): Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. In: Resources, Conservation and Recycling, 52 (7), S. 965-972

Ruohonen, P.; Hippinen, I.; Tuomaala, M.; Ahtila, P. (2010): Analysis of alternative secondary heat uses to improve energy efficiency—case: A Finnish mechanical pulp and paper mill. In: Resources, Conservation and Recycling, 54 (5), S. 326-335

RWI (2010): Statusbericht 2009 zur Umsetzung der Vereinbarung zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge vom 9.November 2000. Essen: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung

Schmid, C.; Brakhage, A.; Radgen, P.; Layer, G.; Arndt U.; Carter, J.; Duschl, A.; Lilleike, J.; Nebelung, O. (2003): Möglichkeiten, Potenziale, Hemnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch, Karlsruhe/München: Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

Sivill, L.; Ahtila, P.; Taimisto, M. (2005): Thermodynamic simulation of dryer section heat recovery in paper machines. In: Applied Thermal Engineering, 25 (8-9), S. 1273-1292

Sivill, L.; Ahtila, P. (2009): Energy efficiency improvement of dryer section heat recovery systems in paper machines – A case study. In: Applied Thermal Engineering, 29 (17-18), S. 3663-3668

Stumm, D. (2007): Untersuchungen zum chemischen Wasserrückhaltevermögen und zur Trocknungsfähigkeit von Papierstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rolle von chemischen Additiven: Fachbereich Chemie, Technische Universität Darmstadt

Thollander, P.; Ottosson, M. (2008): An energy efficient Swedish pulp and paper industry: exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments. In: Energy Efficiency, 1 (1), S. 21-34

VDP (2009a): Papier 2009 – Ein Leistungsbericht. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V.

VDP (2009b): Papier Kompass 2009. Bonn: VDP – Verband Deutscher Papierfabriken e.V.

Viforr, S. (2008): D1.1.11 Enzymatic pre-treatment of wood chip for energy reductions at mechanical pulp production – A review, Ecotarget: New and innovative processes for radical changes in the European pulp & paper industry, project within the EU Sixth Framework Programme.

7 Verarbeitung von Steinen und Erden

F. Reitze, E. Jochem (IREES)

Die Steine-Erden-Industrie, die zu den energieintensiven Industriebranchen in Deutschland gehört, wird energieseitig am meisten durch drei Teilbranchen, die Zementindustrie (WZ 26.51), die Kalkindustrie (WZ 26.52) sowie die Ziegelindustrie (WZ 26.40), geprägt. Zu diesen drei Industriezweigen gehören in Deutschland insgesamt 110 (häufig mittelständische) Unternehmen mit durchschnittlich 190 Mitarbeitern pro Betrieb und einem Bruttoproduktionswert von 4,6 Mrd. € im Jahr 2007. Insgesamt beschäftigten diese drei Industriezweige in Deutschland im Jahr 2007 etwa 19.000 Personen. Alle drei Industriezweige sind im Wesentlichen Vorlieferanten für die Bauindustrie (bei Kalk auch für die Eisenschaffende Industrie und die Chemische Industrie), hierbei im Wesentlichen im Inland und weniger im (meist) benachbarten Ausland.

7.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse

7.1.1 Branchenbeschreibung

Zusammen weisen Zement-, Kalk- und Ziegelindustrie einen Endenergiebedarf von ungefähr 36 TWh pro Jahr auf, wobei der Energiebedarf durchschnittlich zu 80 % über Brennstoff und zu 20 % über Strom gedeckt wird. Dieser Endenergiebedarf entspricht rund 76 % des gesamten Endenergieeinsatzes der Steine-Erden-Industrie in Deutschland. Gleichzeitig ist der Energiekostenanteil am Bruttoproduktionswert bei der Kalkindustrie mit 22 % im Vergleich zur Zement- (~16 %) und Ziegelindustrie (~14 %) am größten. Als größter Energieverbraucher mit rd. 50 % des Endenergiebedarfs der Steine- und Erden-Industrie wird die Zementindustrie besonders ausführlich behandelt.

7.1.1.1 Zementindustrie (WZ 26.51)

In der deutschen Zementindustrie mit einem Produktionsvolumen von über 34 Mio. Tonnen Zement im Jahr 2008 wird eine Vielzahl unterschiedlicher Zementarten und -qualitäten hergestellt. Von der gesamten Zementproduktion entfielen im Jahr 2008 rund 26,3 Mio. Tonnen auf den Inlandsmarkt und 8,3 Mio. Tonnen auf den Export. Der Gesamtumsatz der Zementbranche lag dabei 2008 mit 2,5 Mrd. € aufgrund der gestiegenen Energiekosten leicht über dem Niveau des Vorjahres (siehe Tabelle 7-1, BDZ 2009b).

Die Anzahl der Unternehmen hat im Zeitraum von 2000 bis 2008 um fast ein Drittel abgenommen. Ein deutlicher Einbruch ist im Jahr 2003 zu verzeichnen, danach hat sich die Anzahl der Unternehmen bei 22 Unternehmen stabilisiert (siehe Tabelle 7-1).

Der starke Rückgang der Anzahl der Unternehmen ist primär Folge eines Konzentrationsprozesses bei den Kerngesellschaften (BDZ 2009a, Destatis 2010). Die Anzahl der Zementwerke nahm im Vergleich dazu deutlich langsamer aber kontinuierlich ab. Die Zahl der Beschäftigten sank in der gleichen Zeit rapide von 11.144 Personen im Jahr 2000 auf 7.694 im Jahr 2008 (-31 %).

Die Zementindustrie liefert fast ausschließlich an die Baubranche im Hoch- und Tiefbau. Sie bedient einen eng abgegrenzten Markt, von dessen Konjunktur sie stark abhängt. Außerdem besteht eine zum Teil erhebliche Konkurrenz zu Produzenten anderer Werk- oder Baustoffe (z. B. Stahl, Natursteine, Ziegel). Dabei gilt die Zementindustrie insofern eher als konservativ, als in ihr Innovationen tendenziell eher als inkrementelle Verbesserungsinnovationen, denn als grundlegende Innovation umgesetzt werden (können). Hintergrund hierzu sind hohe Qualitätsanforderugnen und Sicherheits- und Gewährleistungs-Aspekte bei den mit den Zementen hergestellten Bauten.

Tabelle 7-1: Anzahl der Unternehmen und Werke, Umsatz und Beschäftigte der deutschen Zementindustrie, 2000 bis 2008

Jahr	Anzahl der Unternehmen*	Anzahl der Werke	Umsatz in Mio. €	Beschäftigte im Jahresdurchschnitt
2000	38	64	2.651	11.144
2001	38	62	2.410	10.746
2002	38	62	1.956	9.722
2003	25	60	1.618	8.496
2004	23	59	1.688	7.721
2005	22	58	1.792	7.624
2006	22	58	1.983	7.424
2007	22	56	2.256	7.483
2008	22	56	2.528	7694

Alle Daten für Betriebe; Umsatz ohne Mehrwertsteuer
* ab 2003 Konsolidierung von Kerngesellschaften
Quelle: BDZ 2009a, Destatis 2010

Der Zementmarkt ist in der Regel ein Lokal- oder Regionalmarkt, da die Transportwege aufgrund der hohen Transportkosten per Straße bei geringen Tonnagepreisen nicht lang sein dürfen (Ausnahme der Schiffstransport); somit ist der Wettbewerb in der regionalen Verteilung begrenzt. Der Absatzmarkt der Zementindustrie kann sich bei entsprechenden Rahmenbedingungen, die die Herstell- und Transportkosten betreffen, allerdings sehr schnell zu einem Weltmarkt in Hafenregionen entwickeln. Ein Beispiel dafür ist Zement aus Asien, der vor einigen Jahren aufgrund des niedrigen Ölpreises

und der Wirtschaftskrise in Asien mittels ansonsten leer fahrenden Transportschiffen nach Europa bzw. Deutschland geschifft wurde und in den Regionen der deutschen Seehäfen den Wettbewerb verschärfte.

In Industrieländern wie Deutschland stagniert die Pro-Kopf-Produktion von Zement seit Jahrzehnten, da es im Wesentlichen um die Befriedigung der Nachfrage von Re-Investitionen in die gebaute Infrasturktur geht. Die derzeitigen und zukünftigen Wachstumsmärkte liegen in den Schwellenländern. So finden bereits heute 50 % der weltweiten Zementproduktion in China statt; ca. 75 % der weltweiten Zementproduktion erfolgt in Schwellenländern.

Der Anlagenbau für die Zementindustrie hat in Deutschland einen sehr hohen technologischen Stand erreicht, wobei die energieeffizienten Technologien von den Anlagenbauern kontinuierlich weiterentwickelt werden (Industrie-Kultur 2007; Betonprisma 2008; VDZ 2009; BDZ 2005; BDZ 2010). Mit verantwortlich für diesen hohen technologischen Stand (BDZ 2005; Beton 2009) sind unter anderem die gesetzlichen Umweltvorgaben durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 17. BImSchV) bzw. die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) an die Zementwerke und eine lange Forschungs- und Entwicklungstradition dieser Branche.

7.1.1.2 Kalkindustrie (WZ 26.52)

Die Produkte der Kalkindustrie gehen im Wesentlichen in die Bauindustrie, die Stahlindustrie und in geringerem Umfang in die Agrar- und Forstwirtschaft. Auch die Kalkindustrie wurde von der Wirtschaftskrise in 2008/09 getroffen. So sank der Absatz im Jahr 2008 mit 21 Mio. Tonnen bei den ungebrannten Produkten und mit knapp 7 Mio. Tonnen Branntkalk um 6 % (Pressemitteilung des BV Kalk, 23. Juni 2009).

Im Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V. (BV Kalk) sind heute in Deutschland rund 100 Mitgliedsfirmen vertreten. Diese produzieren mit etwa 5.000 Beschäftigten etwa 7 Mio. Tonnen Branntkalk pro Jahr und erwirtschaften einen Gesamtumsatz von circa 700 Mio. € (BV Kalk 2010a). Der Export (~12 %) spielt – wie in der Zementindustrie – in der Kalkindustrie nur eine geringe Rolle (IG BCE 2009).

7.1.1.3 Ziegelindustrie (WZ 26.40)

Die Ziegelindustrie gehört zur mittelständisch geprägten Baustoffindustrie (RWI 2009). Infolge der Wirtschaftskrise verzeichnete die deutsche Ziegelindustrie 2008 in allen Produktbereichen deutliche Rückgänge (Ziegel 2010). 2008 wurden insgesamt 7,1 Mio. Kubikmeter Mauerziegel (-14,5 % gegenüber 2007) und etwa 729 Mio. Dachziegel (-15,4 % gegenüber 2007) produziert. Die finanziellen Umsätze der Mauerziegelher-

steller haben sich seit 1995 mehr als halbiert. Bei der Interpretation der Zahlen muss nach Auskunft des Verbandes berücksichtigt werden, dass die Ziegelhersteller nach dem vergleichsweise guten Jahr 2006 in 2007 ihre Kapazität erhöht und damit größere Lagerbestände aufgebaut hatten. Deshalb liegen die tatsächlichen Rückgänge bereinigt zwischen 7 – 8 % (Ziegel 2010).

Als Folge der jahrelangen Krise und des dadurch ausgelösten Konkurrenzdrucks sind die Preise für Ziegelprodukte in Deutschland nach wie vor auf dem niedrigsten Stand in ganz Europa, was den Export in die Nachbarländer begünstigt. Andererseits hat der Konkurrenzdruck mit anderen Baumaterialien dazu geführt, dass deutsche Ziegel weltweit eine sehr gute Qualität haben und es zahlreiche Innovationen gibt, wie z. B. bezüglich der Wärmedämmeigenschaften beim Mauerziegel und der Witterungsbeständigkeit durch Verglasung beim Dachziegel (Ziegel 2010).

Im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. sind etwa 140 Ziegeleien in Deutschland mit rund 10.000 Mitarbeitern zusammengeschlossen (online unter http:// ziegel.de/daten.html). Diese Unternehmen machen pro Jahr etwa 1,2 Mrd. € Umsatz und produzieren durchschnittlich knapp 9 Mio. m^3 Mauerziegel sowie 850 Mio. Dachziegel. Etwa 17 % der gesamten Produktionsleistung werden in europäische Nachbarländer exportiert.

7.1.2 Auswahl der Prozesse

Die Prozesse der Steine- und Erden-Industrie sind äußerst komplex, sodass die Produktionsprozesse später auf aggregierter Ebene bezüglich ihrer Energieeffizienz betrachtet werden.

Für alle drei hier ausgewählten Teilbranchen (Zement-, Kalk- und Ziegelindustrie) sind die nachfolgenden Prozesse von großer Bedeutung:

1. Aufbereiten der Rohstoffe und Homogenisieren der Rohmasse,
2. Trocknen,
3. Brennen (bei allen Produkten der drei Industriezweige der energieintensivste Prozessschritt),
4. Nachbereiten,
5. Verpacken und Verladen der Produkte.

7.1.2.1 Zementherstellung

Zementproduzenten benötigen große Mengen an thermischer und elektrischer Energie, deren Preise im langfristigen Trend steigen. Der Prozess der Zementproduktion besteht aus vier Hauptschritten (siehe Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2). Zunächst wer-

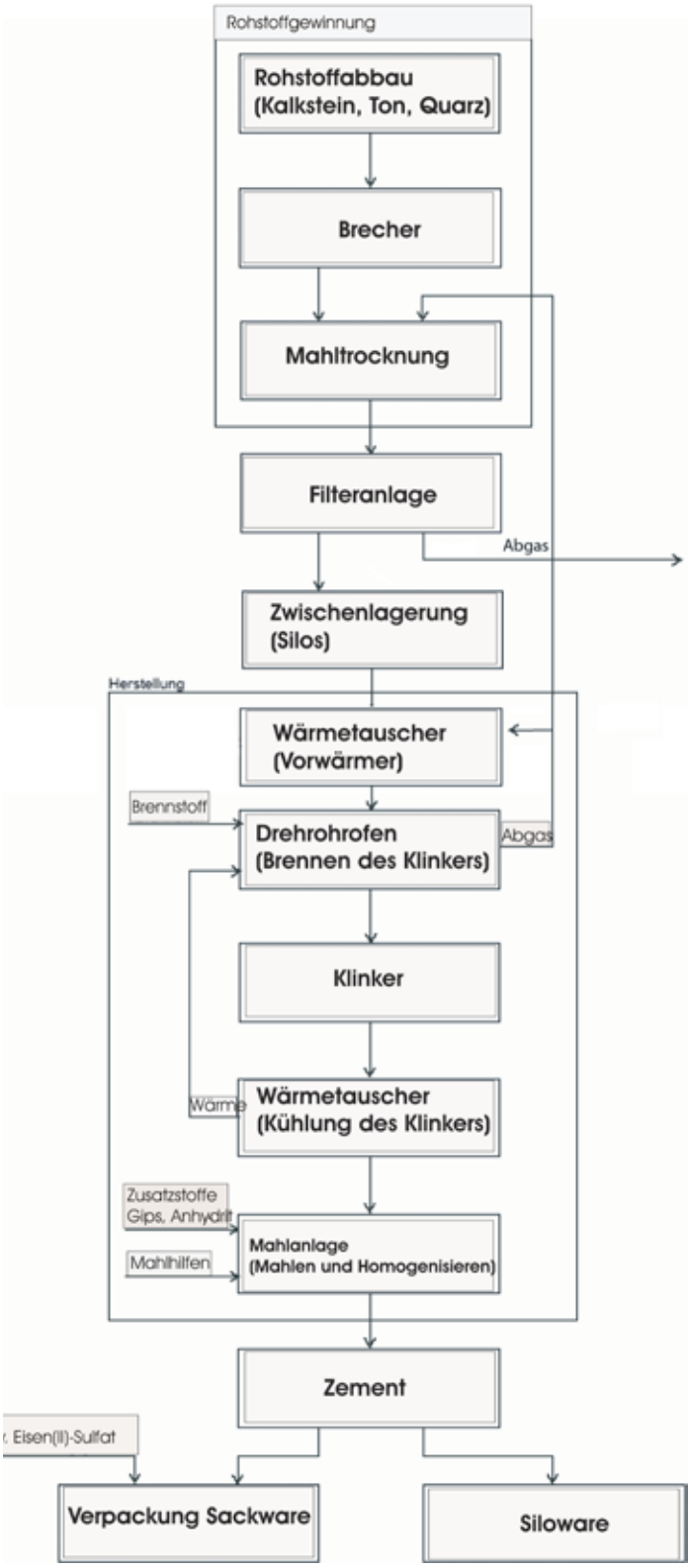
den die Rohmaterialien Kalkgestein, Alumosilikatgesteine (z. B. Tone) und Quarzminerale in Steinbrüchen gefördert. Aufgrund des geringen monetären Wertes des Kalkgesteins im Verhältnis zu seinem Gewicht und seinem Volumen und den sich daraus ableitenden Kosten für einen etwaigen Transport, sind Zementwerke in aller Regel am Standort der Rohmaterialförderung des Hauptbestandteiles Kalk angesiedelt. Das geförderte Rohmaterial wird im zweiten Schritt für den Ofenprozess in Brechern und Mühlen (stromintensiv) und gegebenenfalls in weiteren Schritten zu Rohmehl mit definierter Zusammensetzung aufbereitet. Im Ofenprozess (3. Hauptschritt) wird das aufbereitete Rohmaterial, bestehend aus Kalksteinen, Tonen oder natürlichem Mischgestein (Mergel), bei der notwendigen Sintertemperatur zu Klinker gebrannt. Eine wesentliche Voraussetzung für die Güte und Gleichmäßigkeit des gebrannten Produktes stellt dabei die genaue und gleichbleibende Zusammensetzung des ofenfertigen Rohguts dar, die in der Regel durch kontinuierliche Messtechnik überwacht wird.

Das aufbereitete Rohmehl wird beim Trockenverfahren in einer mehrstufigen Anlage in Zyklonvorwärmern zunächst erwärmt. Das Rohmehl wird in den Zyklonen im Gegenstrom mit den Ofenabgasen aufgewärmt. Zwischen rund 100 °C und ca. 400 °C erfolgt die Austreibung des adsorptiv an die Tonminerale im Rohstoff gebundenen Wassers. Im daran anschließenden Temperaturbereich bis ca. 750 °C werden die Tonminerale zersetzt und auch das chemisch gebundene Wasser freigesetzt. Bereits in den Vorwärmern setzt bei Temperaturen zwischen 550 °C und 600 °C die Freisetzung von CO_2 aus den Karbonaten (auch Kalzinierung oder Entsäuerung genannt), die durch die Anwesenheit von Silizium-, Eisen- und Aluminiumoxiden gefördert wird.

Sofern kein Vorkalzinierer eingesetzt wird, gelangt das vorgewärmte Rohmehl mit einer Temperatur von ca. 800 °C in den Drehrohrofen. Häufig wird ein Vorkalzinierer eingesetzt, indem Abgas aus dem Drehrohrofen (Tertiärluft) und auch eine Zufeuerung für eine weitere Temperaturerhöhung sorgen. Dadurch wird bereits in diesem dem Ofen vorgeschalteten Reaktor bei Temperaturen um 850 °C bis 900 °C eine fast vollständige Entsäuerung des Kalksteins erreicht. Mit einem Vorkalzinierer lässt sich die brennstoffbezogene Energieeffizienz von Zementanlagen nach dem Trockenverfahren optimieren, da sich der Ofen selbst dann kontinuierlicher betreiben lässt und da im Kalzinierer auch minderwertige Brennstoffe wie z. B. solche mit hohem Aschegehalt eingesetzt werden können. Der Einsatz eines Vorkalzinierers bewirkt in der Regel einen leicht erhöhten Strombedarf infolge des höheren Druckverlustes.

In Anlagen ohne Vorkalzinierer wird in der Kalzinierzone bei weiterer Temperaturerhöhung gegenüber der Vorwärmertemperatur die Entsäuerung fortgesetzt und erreicht bei Temperaturen um 900 °C die höchste Reaktionsgeschwindigkeit. Im Anschluss an

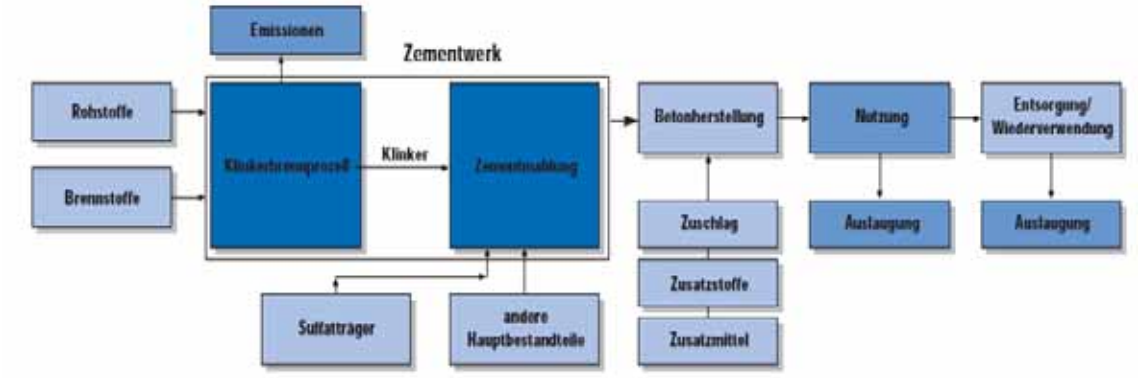
Abbildung 7-1: Prozesskette der Zementproduktion



Quelle: verändert nach Wecobis 2009

die Kalzinierzone erreicht das Einsatzmaterial die Sinterzone, wo bei Temperaturen um 1.450 °C die gewünschten zementtypischen Minerale Trikalziumsilikat und Dikalziumsilikat erzeugt werden. Diese beiden Minerale weisen die für Zemente notwendigen hydraulischen Eigenschaften auf und sind die Hauptkomponenten des Klinkers. Aus der Schmelze, die ungefähr 20 bis 30 % des Materials ausmacht, entstehen Trikalziumaluminat sowie Kalziumaluminatferrit. Im Klinkerkühler wird der fertig gebrannte Zementklinker im Gegenstrom zur Verbrennungsluft abgekühlt. Die so vorgewärmte Luft wird dem Ofen als Verbrennungsluft zugeführt.

Abbildung 7-2: Lebensweg von Zement und Beton



Quelle: VDZ, 1997

Die Zementmahlung stellt den vierten Verfahrensschritt dar, in dem der Klinker zusammen mit Zuschlagstoffen (z. B. granulierte Hochofenschlacke) zu dem fertigen Zement gemahlen wird. Dabei kommen herkömmlicherweise Kugelmühlen zum Einsatz, wobei jedoch auch energieeffizientere Wälzmühlen mit einem geringeren Strombedarf verwendet werden können. Die Feinheit und die Korngrößenverteilung des Mahlgrades beeinflusst dabei die Zementeigenschaften, wirkt sich daneben naturgemäß auch auf den notwendigen elektrischen Energiebedarf aus. Für den Versand wird ein Teil der Produkte schließlich noch in Transportgebinde (Säcke) abgefüllt, während ein ebenfalls bedeutender Anteil direkt als Silozement vermarktet wird.

Generell zeichnet sich die Verarbeitung von Steinen und Erden zu Zement durch einen hohen thermischen Energieaufwand aus (primär für das Brennen des Klinkers), an dem gemessen der Strombedarf (primär für Rohmehlaufbereitung sowie Mahlen des Klinkers) eine geringere Bedeutung hat. Etwa 10 % der aufgewendeten elektrischen Energie werden bei der Herstellung von Klinker zur Kühlung mit Hilfe von Kühlergebläsen benötigt (ABB Technik 2/2007).

Die Zementerzeugung ist emissionsintensiv und verursacht ca. 5 % des globalen CO_2-Ausstoßes (Angaben VDZ 2008 c). In Deutschland entstehen für jede produzierte Ton-

ne Klinker 0,81 t CO_2, (VDZ 2008c). Zwei Drittel davon (0,53 t CO_2/t Klinker) sind rohstoffbedingt, d. h., sie entstehen bei der Entsäuerung des Ausgangsmaterials Kalkstein.

Die Zementindustrie reduziert bisher ihre CO_2-Emissionen und den Bedarf an fossilen Brennstoffen überwiegend durch den Einsatz von Sekundärbrennstoffen (organische Abfallstoffe). Deren Anteil betrug im Jahr 2008 rund 54 % des Brennstoffbedarfs und war teilweise biogenen Ursprungs (z. B. Altholz oder Klärschlamm). Da diese biogenen Brennstoffe – wenn sie in hohen Anteilen verwendet werden – die Prozessführung zunehmend erschweren, bedarf es in diesem Bereich weiterer Optimierungsbemühungen. Falls die CO_2-Abscheidung technologische Marktreife erlangt und wirtschaftlich akzeptabel wird, könnten die CO_2-Emissionen längerfristig außerdem durch CCS (Carbon Capture and Storage) gesenkt werden.

7.1.2.2 Kalkherstellung

Unter Kalk im engeren Sinne werden heute die veredelten Produkte Branntkalk und Löschkalk (auch Kalkhydrat genannt) verstanden, die industriell gewonnen werden (BV Kalk 2010b). Die ungebrannten Kalk- und Dolomiterzeugnisse (Steinmehl, gemahlener kohlensaurer Kalk, Mergel etc.) werden an die Industrie, insbesondere in die Eisen- und Baustoffindustrie, in die Dünge- und Futtermittelerzeugung und das Baugewerbe geliefert.

Gleichzeitig wird der gebrannte Kalk von der Stahl- (~2.5 Mio. Tonnen p.a.) und Baustoffindustrie, von der Landwirtschaft, vom Umweltschutz (~1,5 Mio. Tonnen p.a.), vom Baugewerbe oder bei verschiedenen chemischen Herstellungsprozessen (~0,8 Mio. Tonnen p.a.) als Wirkstoff nachgefragt (IG BCE 2009; BV Kalk 2010c).

Kalkstein wird in der Regel im Tagebau gewonnen und vor Ort verarbeitet. Dabei werden stufenförmige Abbausohlen entsprechend der Topographie der Lagerstätte gebildet. Sobald der Grundwasserspiegel erreicht ist, muss unbedingt der Wasserhaushalt beachtet werden (BV Kalk 2010d).

Bei der Kalkherstellung werden mehrere Hauptprozessstufen durchlaufen:

1. Abbau,
2. Verarbeitung,
3. Brennen und optional
4. Mahlen (siehe Abbildung 7-3).

Nachdem der Abraum beseitigt ist, wird das anstehende Gestein in der Regel mittels Sprengung (Großbohrlochverfahren, Flächensprengung, Sprengung mit einem oder mehreren Zündern etc.) gewonnen. Allen Sprengverfahren ist gemeinsam, dass mit

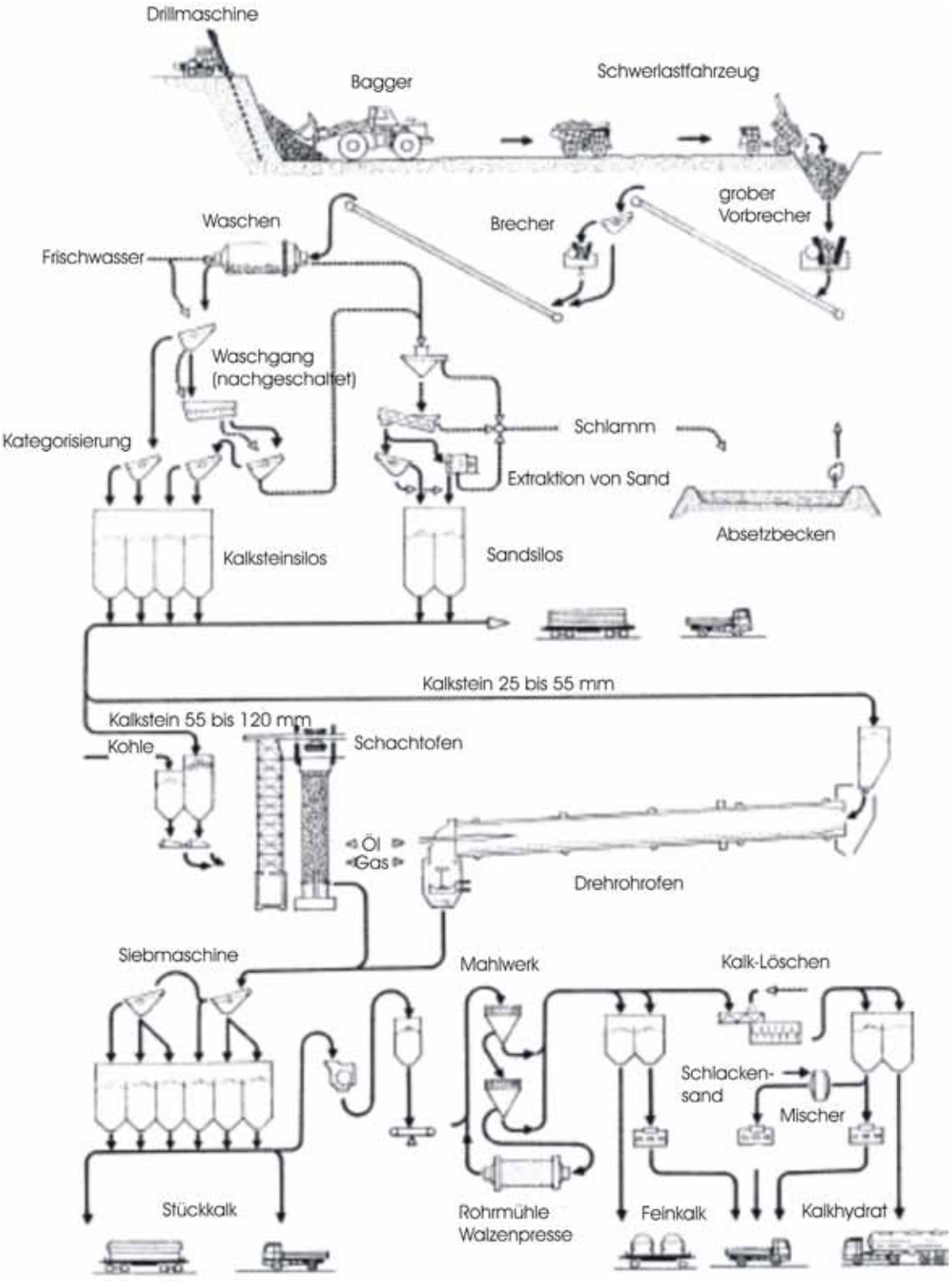
dieselhydraulischen Großbohrlochmaschinen in regelmäßigen Abständen Löcher mit Durchmessern von 95 bis 380 mm in den Stein gebohrt werden. Diese Bohrlöcher werden mit Sprengstoff gefüllt und anschließend mit elektrischen Zündern versehen und gesprengt. Nur wenige übergroße Gesteinsbrocken, die sogenannten Knäpper, müssen nachträglich zerkleinert werden, meistens durch eine Fallbirne. Das Rohmaterial ist nun bereit für die Weiterverarbeitung. Nur wenige Betriebe, vor allem die für Kreidevorkommen im norddeutschen Raum, können ohne Sprengung auskommen, da das weiche Gestein dort mit Eimerkettenbaggern oder aber durch Schrappen mit Hydraulikbaggern abgebaut wird (BV Kalk 2010d).

Das gesprengte Gestein (Haufwerk) wird mit Hydraulik- bzw. Hochlöffelbaggern oder schweren Rad-Schaufelladern auf Schwerlastkraftwagen von 20 bis 80 Tonnen Fassungsvermögen verladen, die das Gestein zur weiteren Verarbeitung zu den Großbrechanlagen (Backen- oder Kreiselbrecher) befördern. In den Großbrechanlagen wird durch schlagende oder drehende Bewegung der Stein auf eine definierte Korngröße herunter gebrochen. Teilweise sind mehrere Brecher hintereinander geschaltet. Die Härte des Gesteins, die angestrebte Korngrößenverteilung und die täglich zu bewältigende Rohsteinmenge bestimmen Art, Größe und Konstruktion des Brechaggregates (BV Kalk 2010c).

In der Regel lassen sich Verunreinigungen durch einfaches Absieben vom Stein trennen. Teilweise ist dem Brechen des Gesteins noch ein Waschvorgang nachgeschaltet, der sicherstellt, dass alle Fremdbestandteile entfernt werden. In diesem Fall durchlaufen die Kalksteine eine Waschtrommel (Schwertrommelwäsche) und werden anschließend über Siebanlagen geleitet, sodass Verunreinigungen mit dem Wasser abfließen können. Das gereinigte Korngemisch wird auf Siebanlagen nach Korngrößen klassiert. Ständig rotierende, exzentrisch gelagerte oder mit Unwuchtgewichten versehene Wellen versetzen die großen Siebkästen mit unterschiedlich großen Maschenweiten in starke Schwingungen. Das Korngemisch wandert auf diese Weise langsam über die Gitter und wird in verschiedene Größen, die Kornfraktionen, zerlegt. Nach dieser Klassierung wird das Steinmaterial nach Verwendungsbereichen getrennt. Die Körnungen werden gelagert, zum Teil in Prallmühlen nachgebrochen, teilweise wird das Gestein in Rohr- oder Kugelmühlen zu Steinmehl weiterverarbeitet. Der klassierte oder gemahlene Kalkstein ist bereits ein begehrter Rohstoff (siehe Abbildung 7-3, BV Kalk 2010c).

Der größte Teil jedoch wird in definierter Korngröße den Brennbetrieben des Kalkwerkes zugeführt, um zu Branntkalk verarbeitet zu werden. Dabei wird der Kalkstein bei hohen Temperaturen von etwa 900 bis 1.200 °C unter Entzug von CO_2 zu gebranntem Kalk (CaO) umgewandelt. Der ofenfallende Branntkalk ist stückig. Nach einer Grobzerkleinerung in Prall- und Hammermühlen wird ein Teil als Stückkalk verkauft (ca. 25 %

Abbildung 7-3: Schematische Darstellung der Kalkherstellung



Quelle: nach Umweltbundesamt 2001

der Produktion). Der Rest wird in Mühlen verschiedenster Konstruktion zu Feinkalk gemahlen oder zu Kalkhydrat gelöscht (BV Kalk 2010e).

Im Zuge der industriellen Entwicklung haben sich verschiedene Ofentypen für die Kalkindustrie herausgebildet (BV Kalk 2010e):

- Schachtofen:

  In einem senkrecht stehenden zylinderähnlichen Brennaggregat werden die stückigen Kalksteine oben auf der Gichtbühne, rund 30 Meter über dem Erdboden, aufgegeben und rutschen langsam in die Brennzone. In der Brennzone wird der Kalkstein entsäuert, d. h., das mineralisch gebundene Kohlendioxid wird abgespalten. Der nunmehr gebrannte Kalk sinkt weiter nach unten, durchläuft die Kühlzone und wird am untersten Ende des Schachtofens abgezogen. Für den Brennprozess können alle festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffe eingesetzt werden. Dabei werden die festen Brennstoffe, wie Kohle und Koks, dem Kalkstein vor der Beschickung zugemischt, während die übrigen Brennstoffe in der Brennzone zugeführt werden (BV Kalk 2010e).

- Drehrohrofen:

  Im Gegensatz zum feststehenden, senkrechten Schachtofen sind Drehrohröfen leicht geneigte zylindrische Rohre, die sich um ihre Längsachse drehen. Die Länge eines solchen Ofens kann bis zu 120 m betragen. Der Durchmesser liegt zwischen vier und fünf Metern. Bei diesem Ofentyp wird der Kalkstein am leicht erhöhten Ende aufgegeben und durchwandert durch die Drehbewegung langsam den Ofen. Am Ende des Ofens, direkt beim Eintritt der Flamme, wird der fertige Branntkalk über einen Kühlrost oder Kühlschacht abgezogen, Wegen der hohen Temperaturen sind die Brennaggregate mit feuerfesten Steinen (Dolomit- oder Magnesitsteinen, Schamotte) ausgemauert (BV Kalk 2010e).

Kalkwerke sind dabei aufgrund ihrer Steinbrüche stets an ihre Standorte gebunden. Neben ungebrannten Produkten – Sande, Schotter, Splitte oder stückigem Kalkstein – sind die Hauptprodukte Branntkalk oder Kalkhydrat, die per Bahn oder Silo-Lkw an die industriellen Abnehmer geliefert werden.

Die Eisen- und Stahlindustrie, aber auch die chemische Industrie stellen spezifische Anforderungen, damit der Kalk für ihren Einsatzzweck die idealen Eigenschaften aufweist. Die Einhaltung dieser Anforderungen trotz der unterschiedlichen, naturgegebenen physikalischen und chemischen Eigenschaften des Rohsteins verlangt eine ausgefeilte Produktionstechnik. Die Höhe der Brenntemperatur, die Verweildauer des Kalksteins im Ofen und die Art des eingesetzten Brennstoffes werden so variiert, dass das Endprodukt den speziellen Anforderungen der Abnehmer genügt (BV Kalk 2010e).

7.1.2.3 Ziegelherstellung

Ziegeleierzeugnisse werden zu den grobkeramischen Erzeugnissen gerechnet. Bei der Herstellung von Ziegeleiprodukten werden vorwiegend Tone oder tonhaltige Materialien, wie z. B. Schieferton, Lehm oder Mergel, verwendet. Alle Eigenschaften der Ziegel (leichte Formbarkeit, hohe Trockenfestigkeit, geringe Rohdichte des gebrannten Produktes etc.) sind mit der Struktur der Tonmineralien erklärbar. Zur Erzielung eines größeren Porenvolumens können organische und anorganische Porosierungsmittel (Sägemehl, Papierfangstoff, geschäumtes Polystyrol, Kieselgur, Perlit etc.) eingesetzt werden (Rentz et al. 2001). Außerdem werden zusätzlich bei der Herstellung Brennhilfsmittel, Brennstoffe und Sorptionsmittel (z. B. Calciumcarbonat, Calciumhydroxid, Feinkalk etc.) verwendet. Zum Teil wird nach dem Trocknen des Formlings eine Glasur oder der Engobe aufgebracht. Dies geschieht bei einigen Erzeugnissen auch am frischen oder gebrannten Formling (Verein Deutscher Ingenieure 1993).

Ziegeleierzeugnisse stellen Massenprodukte dar, die als Baustoffe in den verschiedensten Bereichen des Baugeschehens Anwendung finden. So können in Abhängigkeit von dem Verwendungszweck oder dem Herstellungsverfahren folgende Produkte unterschieden werden (Bender und Händle 1982): Mauerziegel, Dachziegel, Pflasterklinker und Schornsteinziegel.

Bei der Herstellung der Ziegelprodukte werden die Hauptprozessstufen

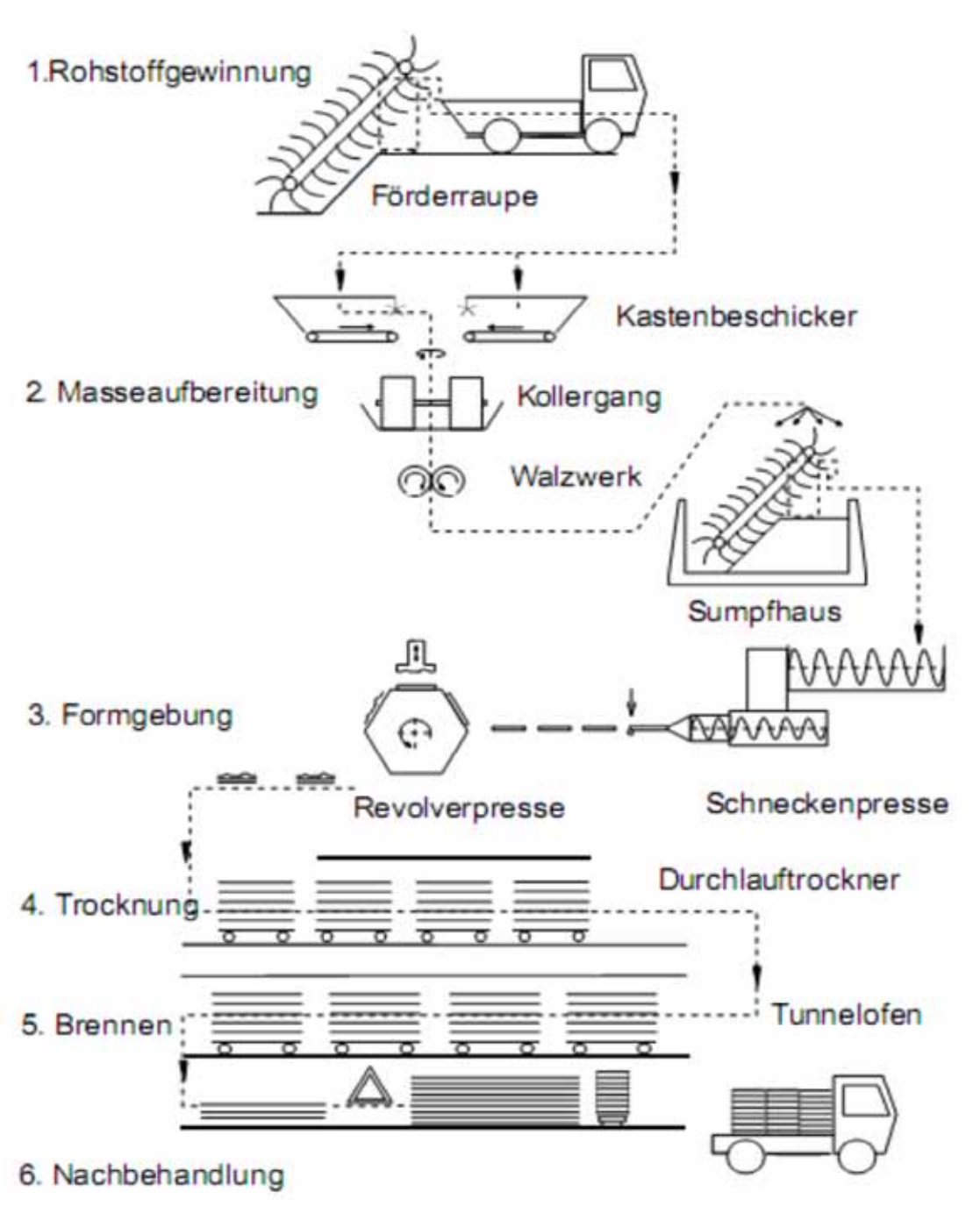
1. Rohstoffgewinnung,
2. Massenaufbereitung,
3. Formgebung,
4. Trocknung,
5. Brennen und
6. Nachbehandlung durchlaufen (siehe Abbildung 7-4).

Eventuell findet anschließend noch eine zusätzliche Oberflächenbehandlung durch Glasieren, Engobieren oder Oberflächenstrukturierung statt (Bender und Händle 1982).

Der Abbau des Rohmaterials erfolgt mit Hilfe von Schaufel- oder Eimerkettenbaggern. Je nach Entfernung der Tongrube findet der Transport zum Ziegelwerk mittels Förderbändern oder LKW statt. Anschließend erfolgt die Massenaufbereitung mittels Trocken-, Halbnass- oder Nassverfahren. Die Wahl des entsprechenden Verfahrensprinzips hängt von dem Rohstoff, dem Formgebungsverfahren, Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten und der Qualität der Produkte ab. Die Trockenaufbereitung, die zu hochwertigen Erzeugnissen führt, nimmt in Europa bei der Klinkerproduktion eine bevorzugte Stellung ein (Bender und Händle 1982), wobei in Deutschland allerdings überwiegend das Nassaufbereitungsverfahren eingesetzt wird (Rentz et al. 2001). Im Gegensatz

dazu ist das Halbnassverfahren das bei der Ziegelherstellung allgemein übliche Verfahren, bei welchem mittels von Kastenbeschickern die Mengenzuteilung erfolgt (siehe Abbildung 7-4).

Abbildung 7-4: Schematische Darstellung der Pressdachziegelherstellung



Quelle: European Clay Brick and Roof Tile Industry 1998

Anschließend werden die unterschiedlichen Materialien gemischt und in einem Walzwerk, dem sogenannten Kollergang, gewalzt. In diesem Arbeitsschritt kommt es zu einer Zerkleinerung der gröberen Bestandteile und somit zu einer Homogenisierung der Gesamtmasse, der dadurch eine gute Verformbarkeit verliehen wird. Dabei kann es zu kombinierten Vorgängen des Quetschens und Mischens mittels verschiedener Gerätschaften (Tonraspler, Siebkneter, Mischer etc.) kommen. Teilweise wird während des Mischprozesses auch Wärme in Form von Heißwasser oder Heißdampf zugeführt, um ein besseres Lösen und Aufschließen der kleinsten Teilchen zu gewährleisten (Krause et al. 1985). Zur weiteren Homogenisierung bzw. Bevorratung der Masse wird der Ton in Silos oder Sumpfhäusern mit entsprechender Mechanisierung zwischengelagert (Bender und Händle 1982).

Heute erfolgt die sich anschließende Formgebung durch unterschiedliche Formgebungsmethoden, wie z. B. Streichen, Extrudieren, Pressen, Rollen etc. (Bender und Händle 1982). Zum größten Teil wird die homogenisierte Masse in Strangpressen (mit und ohne Vakuum) durch eine Vortriebsschnecke verdichtet und mittels eines auswechselbaren Mundstückes in einen Endlosstrang der gewünschten Abmessungen gepresst. Die abschließende Zerteilung des Endlosstranges in die gewünschte Ziegelhöhe erfolgt mittels Drahtschneidern. Bei der Herstellung von Pressdachziegeln schließt sich an die Strangpresse ein weiterer Pressvorgang in einer Revolverpresse (siehe Abbildung 7-4) an, in welcher die endgültige Formgebung mittels Ober- und Unterform erfolgt (Bender und Händle 1982).

Danach erfolgt bei Temperaturen bis etwa 100 °C die Trocknung der Rohlinge. Dabei kommen je nach Werksgröße, Mechanisierungsgrad und Trockenempfindlichkeit der Masse verschiedene Trocknungssysteme (z. B. Kammer-, Tunnel-, Durchlauf- oder Schnelltrockner) zum Einsatz. Die Beheizung der Trockner erfolgt in der Regel durch Ofenabwärme sowie durch die Energieträger Gas oder Heizöl (Krause et al. 1985). Bei dieser Trocknung wird dem Rohling das zum Formen erforderliche Wasser so langsam entzogen, dass es zu keinerlei Rissbildung oder Verkrümmung kommt. Teilweise wird im Anschluss an die Trocknung die gesamte Oberfläche der Rohlinge glasiert oder engobiert, um die Dichtigkeit der Ziegel zu steigern oder eine gewünschte Farbgebung zu erzielen. Üblicherweise erfolgt das Auftragen der Glasur in einer Spritzkabine (Heukschel und Muche 1974).

Beim nachfolgenden Brennvorgang werden die Rohlinge zwischen 400-1.300 °C kontinuierlich in einer meistens oxidierenden Atmosphäre in sogenannten Tunnelöfen gebrannt. Die Brenndauer beträgt durchschnittlich je nach Brenngut zwischen 10 und 60 Stunden (Bender 1997; Clauss 1997). Die Tunnelöfen sind bis zu 100 Meter lang und umfassen Vorwärm-, Brenn- und Abkühlzone, die von den Rohlingen nacheinander auf

Öfenwägen durchlaufen werden. Typische Betriebsdaten von derartigen Tunnelöfen sind in Tabelle 7-2 dargestellt. Zu erwähnen bleibt, dass derartige Brennöfen außer zu Reparaturarbeiten i.d.R. nicht abgeschaltet werden, um hohe Anfahr- und Abfahrverluste des Ofens zu vermeiden. Schließlich dauert das Ab- und Anfahren eines Tunnelofens mehr als vier Wochen, ohne dass dieser Zeitraum zu 100 % produktiv genutzt werden kann (Gubler und Wurche 2006). Dies hat zur Folge, dass Ziegel das ganze Jahr über hergestellt werden.

Als Alternative kommt die Schnellbrandtechnologie mit ihren alternativen Charakteristika in Frage, bei welcher Rollenöfen zum Einsatz kommen (Renz et al. 2001). Im Anschluss an den Brennvorgang erfolgt die Erzeugnissortierung im Rahmen der maschinellen Ofenentleerung bzw. der Tunnelofenwagenentladung oder manuell. Teilweise werden die gebrannten Produkte in Schleifmaschinen weiterverarbeitet, für den Transport verpackt und mit Hubstaplern, Mobilkränen oder Portalkränen verladen (Renz et. al. 2001).

Tabelle 7-2: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen für verschiedene Ziegelprodukte

	Einheit	**Klinker**	**Leichtlochziegel**	**Hochlochziegel**	**Dachziegel**
Kapazität	t/h	1 – 8	3 – 15	3 – 15	3 – 6
Ofenlänge	m	80 – 125	60 -120	60 -120	80 – 140
Ofennutzquerschnitt	m^2	1,3 – 6	4 – 12	4 – 12	4 – 10
Besatzdichte	kg/m^3	650 – 1.500	350 – 500	500 – 570	200 – 400
Brenntemperatur	°C	1.000 – 1.250	900 – 1.050	950 – 1.050	1.000 – 1.060
Spez. Wärmebedarf für Trocknen und Brennen	kJ/kg	1.600 – 3.000	1.000 – 2.200	1.000 – 2.200	1.750 – 2.800
Abgasvolumenstrom	m^3/h	5.000 – 20.000	10.000 – 50.000	10.000 – 50.000	10.000 – 40.000
Abgastemperatur	°C	140 – 200	100 – 150	100 – 150	130 – 180

Quelle: Verein Deutscher Ingenieure 1993; Renz et al. 2001

7.2 Analyse der Prozesse

7.2.1 Zementindustrie

Der Strombedarf in Zementwerken verteilt sich hauptsächlich auf die beiden Mahlprozesse (Rohstoff- und Klinkermahlung) und den Ofenprozess (Fischli et al. 1992). Eine Aufteilung des gesamten Strombedarfes der Zementherstellung nach Ellerbrock und Mathiak (1994) ist in Tabelle 7-3 aufgelistet. Dabei beträgt der Gesamtstrombedarf pro Tonne Zement in Europa zwischen 90 – 150 kWh, in Deutschland etwa 100 kWh (BREF 2009). Die Zementmahlung trägt zu rund 40 % bei, die Rohstoffmahlung zu 25 %, der Strombedarf für den Antrieb des Drehrohrofens und der Ventilatoren für den Klinkerkühler etwa 20 % (Ellerbrock und Mathiak 1994; BREF 2009; CIS/ecra 2009).

Tabelle 7-3: Aufteilung des Strombedarfes bei der Zementherstellung

Verfahrensschritt	**Anteil am Strombedarf**
Tagebau- und Mischbettbetrieb	5 %
Rohstoffmahlung	25 %
Rohmehlhomogenisierung	5 %
Brennen und Kühlen des Klinkers	20 %
Zementmahlung	40 %
Fördern, Verpacken, Verladen	5 %

Quelle: Ellerbrock und Mathiak 1994; CIS/ecra 2009

Bei Rohstoffmahlung und Klinkermahlung handelt es sich um von Elektromotoren angetriebene Mühlenprozesse. In traditionell eingesetzten Rohrmühlen (auch Kugelmühlen bezeichnet) wird die Zerkleinerungsarbeit durch die Stahlkugeln geleistet, die von der rotierenden Mahltrommel bewegt werden und einen Strombedarf von etwa 30 bis 50 kWh/t haben. Dabei wird nur ungefähr 5 % der eingesetzten mechanischen Energie aus den Elektromotoren in Zerkleinerungsarbeit umgesetzt.

Deutlich effizienter sind so genannte Gutbett-Walzmühlen bei denen Mahlgut von oben in den Spalt zwischen zwei gegenläufig rotierenden Walzen aufgegeben wird (Hanstein 2001). Das Mahlgut rutscht durch die Bewegung der Walzen und den Druck des oben aufliegenden Materials in den Zwischenraum und wird dort zerkleinert. In einer Gutbettwalzmühle, die einen Strombedarf von etwa 10 bis 18 kWh/t besitzen, lassen sich gegenüber Kugelmühlen zwischen 15 % und 50 % der elektrischen Energie einsparen. Mit Gutbettwahlmühlen alleine lässt sich allerdings nicht diejenige Qualität erreichen, die in Kugelmühlen erzielt wird und die für das Endprodukt Zement benötigt wird. Neue Mahlverfahren können den spezifischen Strombedarf zwar deutlich senken, sind aber oft mit Qualitätseinbußen verbunden. Um die notwendige Produktqualität zu erreichen,

kann in einer Gutbettwalzmühle vorgemahlen werden und in einer Kugelmühle die endgültige Produktqualität eingestellt werden (Hanstein 2001). Unter den Neuanlagen hat sich deshalb in Deutschland inzwischen die Kombimahlung mit Gutbettwalzenmühle und Kugelmühle durchgesetzt.

Eine moderner Drehrohrofen (Vorcalcinieranlage mit fünfstufigem Zyklonvorwärmer, Klinkerkapazität 3.000 t/d) erreicht unter optimalen Bedingungen bei Betrieb mit Steinkohle als Kurzzeitmittel einen spezifischen Brennstoffenergieverbrauch von 2.900 bis 3.300 kJ/kg Klinker und zusätzlich 150-320 kJ/kg Klinker im Langzeitmittel (BREF 2010); der Durchschnitt[69] der Anlagen in Europa liegt heute bei etwa 3.500 kJ/kg Klinker, der Energiebedarf reicht von etwa 3.000-6.500 kJ/kg Klinker (BREF 2010). Der theoretische Mindestbedarf an thermischer Energie, der zum Klinkerbrennen notwendig ist, liegt nach BREF (2010) zwischen 1.700-1.800 MJ/t Klinker.

Die wesentlichen Abwärmeströme beim Klinkerbrennprozess sind das Ofenabgas sowie – je nach Anlagentechnik – überschüssige Kühlluft aus dem Klinkerkühler mit einem Temperaturniveau von etwa 250 bis 400 °C. Ein wesentlicher Nachteil der Drehrohröfen ist die hohe spezifische Wärmeabstrahlung des Ofenmantels. Die Tendenz geht deshalb zum Bau immer größerer Ofeneinheiten, zu kleineren Durchmessern und kürzeren Öfen und damit geringeren spezifischen Wandwärmeverlusten. Beispielsweise kann durch die Verlagerung eines Teils der Entsäuerung des Rohmehls in den Calcinator eine Verkürzung des Ofens erreicht werden. Durch moderne Rostkühler mit sich selbst einstellendem bzw. kontrollierendem Kühlluftverteilungssystem kann der spezifische thermische Energiebedarf in etwa um 0,27 GJ/t Klinker (9 %) verringert werden (persönliche Mitteilung eines Branchenexperten).

7.2.2 Kalkindustrie

Hinsichtlich des gesamten Energiebedarfs spielen nur die Herstellung von Branntkalk und gelöschtem Kalk eine Rolle, da für deren Herstellung das energieaufwändige und emissionsintensive Brennen (Kalzinieren) notwendig ist. Bei der Kalkindustrie fallen unabhängig vom brennstoffintensiven Brennvorgang Mahlvorgänge an, die sich durch ihre vergleichsweise hohe Stromintensität auszeichnen. In Europa liegt der Strombedarf je nach Ofentyp zwischen 5 – 50 kWh/t Klinker (siehe Tabelle 7-4).

Die grundsätzlichen Verarbeitungsschritte der Kalkherstellung sind derjenigen der Zementherstellung sehr ähnlich. Deshalb kann in der Kalkindustrie die gleiche Mühlentechnologie wie in der Zementindustrie eingesetzt werden, um Gesteinsmehl oder

69 ohne die schlechtesten 10 % der Anlagen.

Feinkalk herzustellen. Verfahrensoptimierungen können deshalb häufig nicht nur in einem Industriezweig angewendet werden, sondern zuweilen gleichzeitig in mehreren Zweigen der Steine-Erden-Industrie.

Tabelle 7-4: Typischer Strom- und Brennstoffbedarf verschiedener Kalköfen in EU-27

Ofentyp	**Brennstoffbedarf bzw. Verbrauch in GJ/t Kalk[1]**	**Strombedarf in kWh/t Kalk**
Langdrehrohrofen (LRK)	6,0 – 9,2	18 – 25
Drehrohrofen mit Vorwärmer (PRK)	5,1 – 7,8	17 – 45
Gleichstrom-Regenerativ-Ofen (PFRK)	3,2 – 4,2	20 – 40
Ringschaftofen (ASK)	3,3 – 4,9	18 – 35 [2] < 50 [3]
Schaftofen mit Mischfeuerung (MFSK)	3,4 – 4,7	5 – 15
Andere Ofentypen (OK)	3,5 – 7,0	20 – 40
[1] 80 % des gesamten Brennstoffbedarfs der Kalkproduktion [2] Korngröße 40 – 150 mm [3] Korngröße < 40 mm		

Quelle: BREF 2009

Beim Verfahrensschritt Brennen kommt teilweise eine ähnliche Brenntechnologie zum Einsatz (Flender 2005), dies jedoch nur bei Drehrohröfen. Heutzutage werden bei der Kalkindustrie in der Mehrzahl andere Ofensysteme eingesetzt (BV Kalk 2010e).

7.2.3 Ziegelindustrie

Der Energieverbrauch der Ziegelproduktion hängt primär vom energieintensiven Teilprozess „Brennen“ (im Tunnelofen ablaufend) ab. Insgesamt werden 90 % der in der Ziegelei eingesetzten Energie durch fossile Energieträger gedeckt (Gubler und Wurche 2006). Tabelle 7-5 listet den Energiebedarf der einzelnen Teilschritte beim Brennen von Ziegeln in einem Tunnelofen nach Gubler und Wurche (2006) auf.

Der Energiebedarf der stationär arbeitenden Tunnelöfen unterscheidet sich jedoch je nach Produktgruppe (Dachziegel, Mauerziegel, Vormauerziegel, Klinker etc.). So liegt der Nettoenergiebedarf von Klinkern bzw. Vormauerziegeln bei etwa 1.265 kJ/kg und von Mauerziegeln bei gut 810 kJ/kg (Ziegelindustrie International 2002).

Der Nettoenergiebedarf bei der Produktion von Mauerziegeln ist im Vergleich gering, da die überwiegende Zahl der in Deutschland eingesetzten Tunnelöfen relativ neu ist und einen guten Erhaltungszustand aufweist (Ziegelindustrie International 2002).

Tabelle 7-5: Energiebedarf und Energieverluste beim Brennen von Ziegeln in einem Tunnelofen

Teilprozess	Energiebedarf
Gefügeumwandlung	80 – 130 kJ/kg
Ausfahrverluste	130 kJ/kg
Rauchgasverluste	330 – 420 kJ/kg
Transmissionsverluste Aussenwand	130 kJ/kg
In Kühlluft abgeführte Restwärme des gebrannten Backstein	630 – 840 kJ/kg
Kalkumwandlung	15 kJ/kg und Massenprozent bezogen auf den getrockneten Rohling
Energiefreisetzung durch Kohlenstoff	- 335 kJ/kg und Massenprozent bezogen auf den getrockneten Rohling

Quelle: Gubler und Wurche 2006

Während Tunnelöfen über einen längeren Zeitraum mit gleich bleibender Leistung betrieben werden, unterliegt der Trocknungsprozess häufig einem Tagesrhythmus in der Bereitstellung nasser Rohlinge. Somit befinden sich die meisten Trockner hinsichtlich Durchsatzleistung und damit auch Energieverbrauch nicht in einem stationären Zustand (Ziegelindustrie International 2002). Aufgrund von Messungen kann ein durchschnittlicher Energiebedarf von Trocknern von 4.300 kJ/kg (± 5 %) bezogen auf die verdampfte Wassermenge angegeben werden (Ziegelindustrie International 2002).

Den größten elektrischen Energiebedarf bei der Ziegelproduktion weist die Formgebung auf, gefolgt vom Produktionsschritt Brennen sowie der Trocknung (vgl. Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6: Durchschnittlicher elektrischer Energiebedarf in Prozent eines Ziegelwerkes

Produktionsbereich	Strombedarf in %
Aufbereitung des Rohmaterials und Transport	13,6
Walzwerk	14,6
Formgebung	27,0
Setzanlage	2,8
Trocknung	18,0
Brennen	18,0
Entladung	3,0
Verpackung	3,0

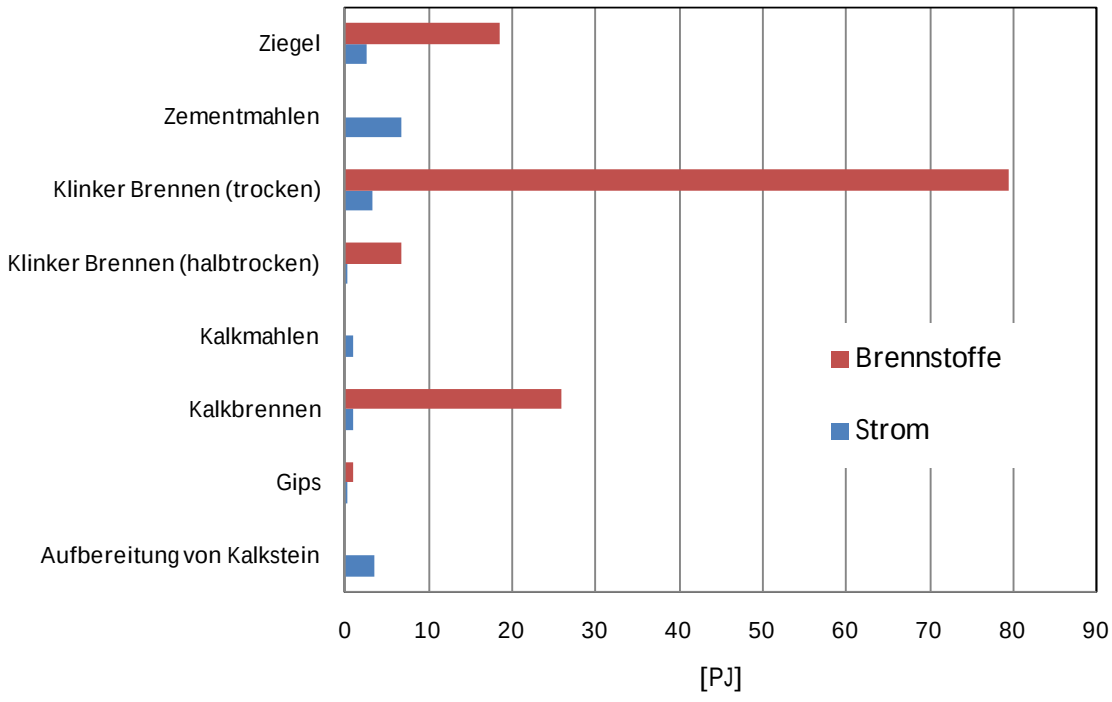
Quelle: Fraschini 1992

7.2.4 Zusammenfassung: THG-Emissionen und Energieverbrauch

Die Verarbeitung von Steinen und Erden zu den Hauptprodukten Zement, Kalk und Ziegel zeichnet sich durch einen hohen thermischen Energieaufwand aus, an dem gemessen der Strombedarf nicht so bedeutend ist. Innerhalb der drei Produktgruppen ist die Zementherstellung aufgrund ihres Produktionsvolumens mit Abstand am bedeutendsten. Der gesamte Energiebedarf der Steine-und-Erden-Industrie beträgt laut dem Statistischen Bundesamt (2009) im Basisjahr 2007 rund 222 PJ, wovon knapp 108 PJ auf die Zementherstellung entfallen.

Von allen untersuchten Prozessen der Steine-und-Erden-Industrie weist das Klinkerbrennen nach dem Trockenverfahren bei der Zementherstellung mit knapp 80 PJ den größten thermischen Energiebedarf auf, gefolgt vom Brennstoffbedarf beim Kalkbrennen (~26 PJ) bzw. dem thermischen Energiebedarf der Ziegelindustrie (~18 PJ) (siehe Abbildung 7-5). Der Strombedarf ist mit knapp 32 PJ im Vergleich dazu relativ gering.

Abbildung 7-5: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007

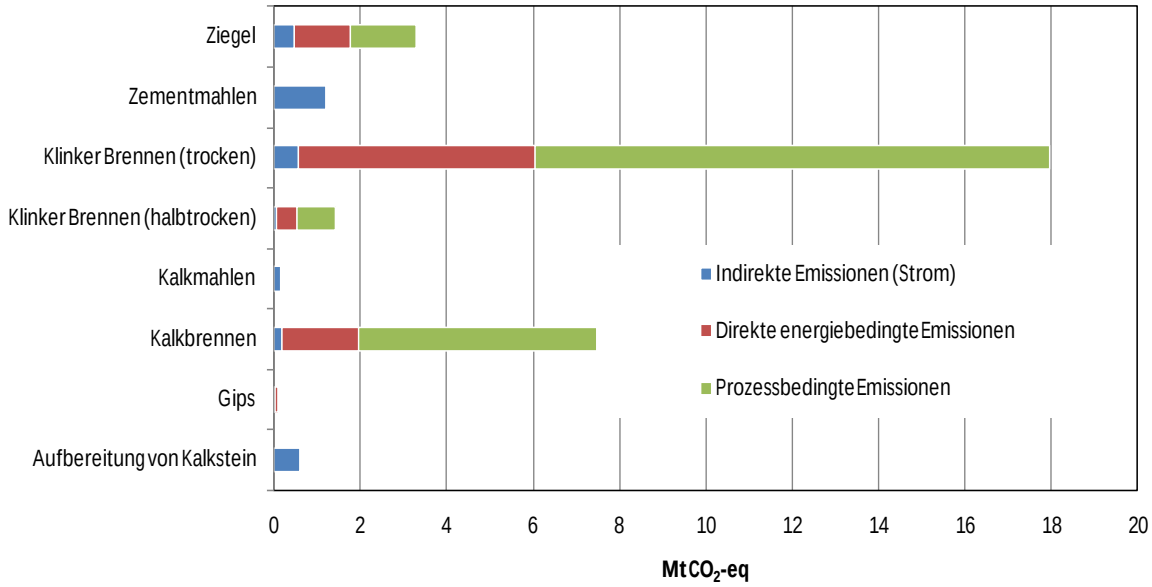


Quelle: eigene Berechnungen von Fraunhofer ISI und IREES (siehe auch Tabelle 7-11)

Rohstoffbedingt bzw. prozessbedingt entstehen beim Klinkerbrennen mit etwa 19 Mio. t CO_2-eq (67 %) und beim Kalkbrennen mit etwa 8,2 Mt CO_2-eq (~28 %) die meisten

Emissionen von insgesamt 29 Mio. t der gesamten Steine-und-Erden-Industrie (siehe Abbildung 7-6).

Abbildung 7-6: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007



Quelle: eigene Berechnungen von Fraunhofer ISI und IREES (siehe auch Tabelle 7-11)

Tabelle 7-7: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO_2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Aufbereitung von Kalkstein	3,38	-	-	0,61	-
Gips	0,19	0,95	-	0,03	0,07
Kalkbrennen	0,98	25,96	2,70	0,18	1,80
Kalkmahlen	0,84	-	-	0,15	-
Klinker Brennen (halbtrocken)	0,27	6,83	0,90	0,05	0,47
Klinker Brennen (trocken)	3,17	79,36	11,90	0,57	5,49
Zementmahlen	6,68	-	-	1,20	-
Ziegel	2,66	18,59	1,54	0,48	1,29

Quelle: eigene Berechnungen von Fraunhofer ISI und IREES

7.2.4.1 Zementindustrie

Der spezifische Brennstoffenergiebedarf der deutschen Zementwerke ging in den letzten Jahrzehnten deutlich von knapp 8.000 kJ/kg Klinker auf unter 4.000 kJ/kg Klinker

zurück (VDZ 2009b). Als Brennstoff eignen sich diverse fossile Brennstoffe sowie biogene und nicht-biogene Sekundärbrennstoffe, wobei in den letzten Jahren eine zunehmende Substitution fossiler Brennstoffe zu erkennen ist (siehe Tabelle 7-8).

Heute erfolgt das Brennen des Klinkers in Drehrohröfen, in denen mittlerweile ausnahmslos die Abgaswärme zur Vorwärmung des Rohmaterials genutzt wird. Der überwiegende Teil der Ofenanlagen ist mit Zyklonwärme-Tauschersystemen ausgestattet. Die Nutzung der Abwärme zur Vorwärmung von Rohmaterial, Brennstoff und Verbrennungsluft stellt in den meisten Fällen die wirtschaftlichste Lösung dar. So werden pro Zyklonvorwärmerstufe nach Experteneinschätzung etwa 3 % Brennstoffe eingespart.

Im Jahr 2007 betrug der absolute thermische Energiebedarf 92,4 PJ (siehe Tabelle 7-8). In der Zementindustrie ist die Struktur des Brennstoffeinsatzes ungewöhnlich mit viel Kohle, schwerem Heizöl und brennbaren Abfallstoffen (z. B. Autoreifen) sowie biogenen Abfallstoffen (vgl. Tabelle 7-8). Zudem werden 14,3 PJ elektrischer Energie von der Zementindustrie benötigt, d. h. spezifisch etwa 100 kWh/t Zement.

Tabelle 7-8: Brennstoffeinsatz der Steine-und-Erden-Industrie in Deutschland im Basisjahr 2007 unterteilt nach Energieträgern

Wirtschaftszweig Prozess	**Verarbeitung von Steine und Erden**	**Herstellung von Ziegeln u. Baukeramik**	**Herstellung v. Erzeugnissen aus Beton, Zement, Gips**	**Zement**	**Kalk**	**Rest**
Nr. WZ 2003	26 o. 26.1, 26.2, 26.3	26.4	26.6	26.51	26.52	–
Nr. WZ 2008	23 o. 23.1, 23.2, 23.3, 23.31	23.32	23.6	23.51	23.52	–
Absoluter Energiebedarf in PJ						
EEV gesamt	222	31	30	107	27	96
Brennstoffe inkl. Fernwärme	190	28	23	92	25	80
darunter						
Steinkohle	23	0,01	0,18	15	5	11
Braunkohle	43	0,01	0,77	25	11	21
Mineralöle	28	2	8	12	2	14
Gase	51	21	13	0,53	6	37
Erneuerbare	26	5	0,13	23	0,53	–
Sonstige Energieträger	19	0,45	0,10	17	0,18	6
Fernwärme	0,35	–	–	0,32	–	0,10
Strom	32	3	7	15	2	16

Quelle: Statistisches Bundesamt 2009

Rund zwei Drittel der CO_2-Emissionen bei der Zementherstellung sind rohstoffbedingt und entstehen durch die chemische Reaktion des als Rohstoffs eingesetzten Kalksteins prozessbedingt (Vereinigung der österreichischen Zementindustrie 2009a). Absolut entstehen gut 21 Mio. Tonnen an direkten und indirekten CO_2-Emissionen im Jahr 2007 bei der Zementproduktion (siehe Abbildung 7-6). Werden nur die direkten CO_2-Emissionen der Zementproduktion betrachtet, handelt es sich um etwa 629 kg CO_2/t Zement. Weitere Studien, die sich mit den Möglichkeiten zur Reduktion der CO_2-Emissionen in der Steine-Erden-Industrie beschäftigen sind z. B. McKinsey&Company, 2008; CIS/ecra, 2009; WBSCD/IEA 2009.

7.2.4.2 Kalkindustrie

Die Kalkindustrie ist eine der energieintensivsten Industrien (IG BCE 2009). Der thermische Energiebedarf für die Dekarbonatisierung von Kalkstein (CaCO3 ->CaO + CO_2) beträgt 3.154 MJ/t CaO, bei einer Zersetzungstemperatur von 900 °C (Umweltbundesamt Österreich 2007). Der tatsächliche Energieverbrauch variiert stark mit dem Ofentyp, im Allgemeinen ist der Verbrauch von Schachtöfen deutlich geringer als der von Drehrohröfen. Weitere wesentliche Einflussgrößen sind die Produktqualität (Weichbrand/Hartbrand, Rest-CO_2-Gehalt des Produkts), die Rohstoffzusammensetzung (z. B. Mg-Gehalt), die Feuchte des Rohmaterials, die Korngröße sowie die Art des Brennstoffs (Umweltbundesamt Österreich 2007).

Im Jahr 2007 betrug der spezifische Energiebedarf 4,39 GJ/t Kalk. Dies bedeutet einen absoluten Energiebedarf von etwa 27 PJ in 2007 (siehe Tabelle 7-8), wobei in den letzten Jahren eine Veränderung des Energiemixes in der Kalkindustrie stattfindet. Die Öfen in der Kalkindustrie können mit Erdgas, Kokereigas, Kohle, Koks, leichtem und schwerem Heizöl oder diversen Abfällen (Öl, Plastik, Papier, Tiermehl, Sägespänen etc.) befeuert werden. Der Einsatz von Abfällen in der Kalkindustrie ist sehr begrenzt, da sie die Produktqualität deutlich beeinflussen können. Bei bestimmten Einsatzzwecken, z. B. bei der Trinkwasseraufbereitung, kann nur hochreiner Kalk eingesetzt werden.

Nicht bei allen Ofentypen können jedoch alle Brennstoffarten zum Einsatz kommen. So gibt es beispielsweise Schachtöfen, die aufgrund ihrer Bauweise oder den Anforderungen der Kunden nur mit Koks befeuert werden können.

Die spezifischen brennstoffbedingten CO_2-Emissionen der deutschen Kalkindustrie betrugen im Jahr 2007 385 kg CO_2/t Kalk. In absoluten Zahlen entspricht dies 2,7 Mio. t CO_2-eq. in 2007. Gleichzeitig entstehen rohstoffbedingt (Entsäuerung des Kalksteins) etwa 785 kg CO_2/t Kalk. In absoluten Zahlen entspricht dies 5,5 Mio. t CO_2-eq. in 2007. Direkte Emissionen der Kalkproduktion und indirekte Emissionen durch Stromver-

brauch und Energiebedarf ergeben zusammen 8,2 Mio. t CO_2-eq. in 2007 (siehe Abbildung 7-6).

7.2.4.3 Ziegelindustrie

Der spezifische Energieverbrauch der Ziegelindustrie unterlag in der Vergangenheit erheblichen Schwankungen. Im Jahr 2007 betrug der spezifische Energiebedarf 1,6 GJ /t Ziegel, wenn man von einem Endenergiebedarf von knapp 21 PJ für die reine Ziegelproduktion ausgeht (siehe Tabelle 7-7). Die Herstellung von Ziegeln und Baukeramik weist zusammen einen absoluten Endenergiebedarf von etwa 31 PJ in 2007, wobei seit einigen Jahren eine Veränderung des Energiemixes in der Ziegelindustrie stattfindet. Davon entfallen knapp 28 PJ auf thermischen Energiebedarf und gut 3 PJ auf elektrischen Energiebedarf.

Die spezifischen CO_2-Emissionen der deutschen Ziegelindustrie betrugen im Jahr 2007 118 kg CO_2/t Ziegel. In absoluten Zahlen entspricht dies 1,5 Mio.t CO_2-Emissionen.

7.3 Analyse der Einsparoptionen

Die Größe der Unternehmen spielt bei der Realisierung noch nicht erschlossener Energie-Effizienzpotenziale eine wichtige Rolle. Die Zement- und Kalkindustrie hat hierbei den Vorteil mittelgroßer Unternehmen, während die durchschnittliche Unternehmensgröße der Ziegelindustrie kleiner ist. Bei kleineren Unternehmen ist es wegen der Vielfalt der Aufgaben des technischen Personals nicht einfach, alle energietechnischen Neuerungen zu kennen; andererseits sind hier die Entscheidungswege in kleinen Unternehmen sehr kurz.

Je größer die Unternehmen sind, desto differenzierter sind häufig die Energieflüsse und die bekannten Kenntnisse über mögliche Effizienzpotenziale infolge des mehr auf Energiefragen spezialisierten Personals größer. Wenn nach EEG 2009 ein Energiemanagement zum Einsatz kommt (z. B. im Zementindustrie-Bereich), sind in der Regel auch Daten über den spezifischen Energieverbrauch einzelner Anlagen und Maschinen vorhanden. Bei kleineren Unternehmen ist dies jedoch noch nicht häufig der Fall.

Ebenso weist die Massenproduktion im Vergleich zur Kleinserienproduktion in der Regel stets größere Effizienzoptionen auf. Zu beachten ist, dass bei manchen Branchen z. B. der Zementindustrie, selbst kleine Unternehmen grundsätzlich eine Massenproduktion betreiben. Höchstens im Forschungsbereich kann es dort zu einem frühen Zeitpunkt zur ersten Herstellung kleinerer Mengen im Labor- oder Pilotmaßstab kommen (z. B. Celitementproduktion im Jahr 2010).

In allen Bereichen der Steine-Erden-Industrie führt bereits die Optimierung von unterschiedlichen Querschnittstechnologien zu gewissen Energieeinsparungen. Zur Erhöhung der Energieeffizienz bieten sich hier generell hochenergieeffiziente Elektro-Motoren und drehzahlgesteuerte Motoren (z. B. für Ventilatoren, Druckluft, Mühlen) an. Diese Aspekte wurden in der Vergangenheit aus Wirtschaftlichkeitsgründen häufig nicht realisiert. Allerdings wird bei vielen Unternehmen die Entscheidung derartiger Effizienz-Investitionen nach der Amortisationszeit (einem Risikomaß) und nicht nach einem Rentabilitätsmaß getroffen. Weitere Effizienzpotenziale können durch die Verbesserung spezieller Verfahrensschritte innerhalb der Subsektoren erschlossen werden, insbesondere bei den Mahl- und Ofenprozessen.

Laut Expertenaussagen rechnen sich eine erhebliche Zahl von Effizienz-Projekten nicht alleine über die Energieeffizienz, sondern erst in Kombination mit einer verbesserten Produktqualität oder anderen Produktivitätsfortschritten (z. B. Kapital- oder Arbeitsproduktivität). Beachtet werden muss außerdem, dass genannte Energieeffizienzpotenziale mehrerer Maßnahmen häufig keinesfalls kumulativ addiert werden dürfen, da sie entweder von einander abhängen oder bereits zum Teil eingesetzt werden oder für bestimmt Produktqualitäten nicht eingesetzt werden können.

Effizienzoptionen sind generell von der eingesetzten Technologie abhängig. Dabei muss berücksichtigt werden, ob eine Technik generell in der Branche oder nur in Teilbereichen für Produktsegmente eingesetzt werden kann. Bei der Abschätzung der vorhandenen Effizienzpotenziale müssen deshalb unbedingt die Charakteristika bzw. Randbedingungen der bewerteten Unternehmen berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu können Verfahrensoptimierungen innerhalb der Steine-und-Erdenindustrie meistens in mehreren Subbranchen angewendet werden.

7.3.1 Zementindustrie

Bei der Betrachtung der Effizienzoptionen sollten prinzipiell immer die hergestellten Zementarten mit berücksichtigt werden, um den entsprechenden Rahmenbedingungen, Produktqualitäten und Spezifika Rechnung zu tragen.

Die bei der Zementherstellung eingesetzten Technologien weisen heute nach Aussagen von Zementherstellern kaum noch Effizienzpotenziale auf. Bei den thermischen Prozessen sei eine Steigerung der Energieeffizienz bei der Zementherstellung nach Industrieaussagen weitestgehend ausgereizt, sodass das Verbesserungspotenzial von Zementwerken auf der thermischen Seite nach Industrieaussagen ungefähr bei 5 % liegt. Beim Brennprozess sind selbst keine gravierenden Unterschiede für die verschiedenen Zementarten bekannt, sodass für den Brennprozess keine Unterteilung nach Zementarten notwendig ist. Allerdings wird bei diesen Aussagen davon ausge-

gangen, dass die Abwärme des Ofens, der Ofenabgase und des fertigen Klinkers durch Abgabe von Wärme an Dritte oder zur Stromerzeugung nicht weiter genutzt werden können.

Ebenso wenig Potenzial (insgesamt ~5-7 %) wird von Industrieseite auf Seiten der Stromeffizienz gesehen. Die hergestellte Zementsorte hat sicherlich einen gewissen Einfluss auf den spezifischen Stromverbrauch der jeweiligen Zementproduktion und sollte daher u. a. beim Mahlprozess mit berücksichtigt werden.

Insgesamt wird aus diesen Gründen die Kurve des Energieeinsparpotenzials im Zementbereich über die letzten zwei Jahrzehnte immer flacher. Dies liegt auch daran, dass die hohe Energieintensität der Branche seit jeher einen deutlichen Anreiz zur Steigerung der Energieeffizienz darstellte.

Die Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzinvestitionen schwankt generell, abhängig davon, wie umfangreich die Eingriffe in bestehende Anlagen sind oder wie innovativ oder etabliert die eingesetzten Techniken sind. Neue Entwicklungen werden in der Regel in Projekten mit zwei bis drei Jahren Laufzeit entwickelt. Die Markteinführung hängt stark von dem jeweiligen Bereich ab. Wenn eine Neuheit sehr weit außerhalb des aktuellen Rahmens liegt, kann dies unter Umständen sehr lang dauern, da Erfahrungen in Pilotanwendungen gesammelt werden müssen. Ultrahochfester Beton z. B. wurde bereits 1978 zum ersten Mal patentiert. Trotzdem liegt der Marktanteil in Deutschland heute noch bei unter 0,1 %. D. h., Produkt-Neuentwicklungen kommen häufig (zunächst) aus verschiedensten Gründen nur in Nischenanwendungen zum Einsatz.

7.3.1.1 Gesamtoptimierung des Systems Zementherstellung

Um die Energieeffizienz zu optimieren und die CO_2-Emissionen zu reduzieren, wird auch an der energetischen Gesamtoptimierung des Systems der Zementherstellung geforscht. Als Beispiel für geschlossene Kreisläufe ist die Abwärmenutzung bei thermischen Prozessen zur elektrischen Energiegewinnung zu erwähnen. Im chinesischen Markt ist diese Verknüpfung „State of the art“. Dies ist dort v.a. auf die im Vergleich zu Europa unsichere Stromversorgung sowie auf politische Vorgaben zurückzuführen. In Europa steht die Verknüpfung von Abwärmenutzung und elektrischer Energiegewinnung erst am Anfang. Dies liegt v.a. an den vergleichsweise hohen Kosten der ORC-Anlagen sowie der sicheren externen Stromversorgung in Europa.

7.3.1.2 „Low-carbon cements” bzw. „carbon negative cements”

Einen relativ neuen Ansatz stellt die Substitution des Rohstoffes Kalkstein bei den sogenannten „low-carbon cements/carbon negative cements“ dar (WBSCD/IEA 2009). Im

letzten Jahr ist es beispielsweise Wissenschaftlern des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) gelungen, im Labormaßstab ein zementäres Bindemittel (Celitement) mit sehr günstiger Stoff- und Energiebilanz herzustellen. Dieses patentierte Verfahren benötige weniger Kalkstein als Rohstoff, kommt mit wesentlich niedrigeren Temperaturen (< 300 °C) aus, spart damit bis zu 50 % Brennstoff und setzt auch bis zu 50 % weniger CO_2 frei (KIT 2009a, b). 2014 soll eine erste industrielle Referenzanlage mit einer Produktionskapazität von 30.000 Tonnen im Jahr in Betrieb gehen.

Bei Celitement handelt es sich jedoch nur um eine von mehreren neuen Bindemittelarten (z. B. Novacem, Calera, Calix, Geopolymerzement, Belit-Zement, Calciumsulfoaluminat-Zement etc.), die sich bei verschiedenen Unternehmen derzeit im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden (CSI/ecra 2009). Jeder dieser neuartigen Ansätze verfolgt unter anderem das Ziel, den Rohstoff Kalkstein, der für einen Großteil der CO_2-Emissionen der Zementindustrie verantwortlich ist, zu substituieren. Es bleibt abzuwarten, inwieweit derartige Zemente tatsächlich im großindustriellen Maßstab produziert werden können und wie dann die Energie- bzw. Treibhausgasbilanzen aussehen. Außerdem ist die Akzeptanz dieser neuen Bindemitteltypen bei den Kunden völlig unbekannt. Bisher handelt es sich bei der Zementindustrie wegen der sehr langen Standzeiten der Bauten im Hoch- und Tiefbau eher um eine vorsichtig innovierende Branche, die eher auf Altbewährtes setzt. Hinzu kommt, dass diese neuartigen Zementarten eventuell zwar den Energieeinsatz beim Klinkerbrennen deutlich reduzieren können, es an anderer Stelle der Produktionslinie jedoch zu Energiebedarfssteigerungen kommen kann; ebenso sind Langzeituntersuchungen bzw. Langzeitprobleme wegen geforderter Produkteigenschaften noch volllkommen ungeklärt.

In 15 Jahren werden sicherlich Anteile von kalksteinfreien Systemen am Markt zu finden sein, ob diese allerdings substantiell sein werden, ist eher fraglich. Es gibt noch viele offene Fragen und Probleme bei der Herstellung dieser Bindemittel. Zudem wäre es eine komplett neue Fertigung , d. h., es müssten unter anderem auch die Verarbeitungsprozesse angepasst werden.

7.3.1.3 Mehrkomponentenzemente

Durch die Erhöhung des Anteils an verschiedenen Zumahlstoffen (Hochofenschlacke, Hüttensand, Flugasche, Puzzolan etc.) kann der Klinkeranteil pro Tonne Zement reduziert werden (CIS/ecra 2009). Die Mehrkomponentenzemente haben große Erfolgsaussichten, um CO_2-Emissionen zu reduzieren und sind auch in größerem Rahmen umsetzbar. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum Standardverfahren mit der gleichen Klinkermenge eine dementsprechend größere Menge an Zement erzeugt werden kann.

Zumahlstoffe wurden – historisch betrachtet – dem Zement zu einem gewissen Anteil aus verschiedenen Gründen schon sehr früh zugesetzt. ***Hüttensand*** beispielsweise wird seit über 150 Jahren verwendet. Es handelt sich um ein Abfallprodukt der Eisenherstellung. In Deutschland werden heutzutage mehr als drei Millionen Tonnen Hüttensand in der Zementherstellung verwendet. Kompositzement kann beispielsweise bis zu 60 % aus Hüttensand, zu 35 % aus Klinker und zu 5 % aus übrigen Bestandteilen zusammengesetzt sein. Sinnvoll ist die Verwendung von Hüttensand nur, wo keine langen Transportwege anfallen, also bei Zementwerkstandorten in einem bestimmten Umkreis von Standorten der Roheisenerzeugung. Der Emissionshandel oder steigende Brennstoffpreise liefern für die Erhöhung des Anteils an Zumahlstoffen einen deutlichen monetären Anreiz.

Ein anderer Zumahlstoff ist ***Flugasche***, die in Kohlekraftwerken anfällt. Auch diese Option ist nur in einem gewissen Umkreis von Kohlekraftwerken sinnvoll. Bei zu hohen Transportkosten wird die Zumahlung unrentabel. In Deutschland werden heutzutage etwa sechs Mio. Tonnen Flugasche in der Zementproduktion verwendet (persönliche Mitteilung eines Branchenexperten). Flugasche kann dem Zement allerdings nur bis zu 20 % zugesetzt werden, andernfalls werden u. a. die Abbindeeigenschaften des Zements ungünstig verändert. Auch andere eingesetzte Zumahlstoffe verändern die Eigenschaften des Zements, der jedoch die nationalen Qualitätsstandards weiterhin einhalten muss. Um diesen Veränderungen zu begegnen, wird intensiv an der Weiterentwicklung von Komposit-Zementen gearbeitet. Die Anforderungen an die Zementeigenschaften kommen dabei zumeist aus der Baupraxis.

Generell muss bei der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Mehrkomponentenzementen auch die ausreichende Verfügbarkeit der Substitute (z. B. Flugasche, Hüttensand etc.), die zu einer Reduktion des Klinkeranteils bei den entsprechenden Zementarten beitragen sollen, und der Wettbewerb um diese Substitute genügend berücksichtigt werden. Gerade die Abschätzung der Verfügbarkeit von Klinkersubstituten erweist sich jedoch als äußerst schwierig und kann regional gesehen große Variationsbreiten aufweisen (WBSCD/IEA, 2009).

Laut CIS/ecra (2009) wird erwartet, dass der Klinkerfaktor in Europa im Jahr 2030 zwischen 70-75 % und im Jahr 2050 zwischen 65-70 % liegen wird. Auch Studie von Allplan und VDZ (VÖZ 2010) sieht in der Substitution des Zementklinkers im Zement durch andere Zementhauptbestandteile das entscheidendes Potenzial zur Verminderung des Energieeinsatzes bei der Zementherstellung.

7.3.1.4 Vorcalcinierung

Die Weiterentwicklung der Zyklonvorwärmeröfen konventioneller Technik führte seit etwa 1970 zur Einführung der Vorcalciniertechnik beim Trockenverfahren der Zementherstellung (BREF 2010). Die Vorteile liegen in niedrigeren spezifischen Investitionen bzw. Betriebskosten, einer hohen Produktionskapazität, einer gleichmäßigen Prozessführung sowie zusätzlichen Möglichkeiten zur Emissionsminderung (VDZ 2008a).

Bei der Vorcalcinierung wird das aus der zweituntersten Zyklonstufe austretende Heißmehl von aus dem Drehofen aufströmenden Heißgas mitgerissen und in den Calcinator geführt, der zwischen Zyklonvorwärmer und Drehofen angeordnet ist. Im Calcinator läuft aufgrund einer intensiven Interaktion von Ofengas und Brenngut die Entsäuerungsreaktion ab, sodass der Vorentsäuerungsgrad des Rohmehls auf über 90 % erhöht wird. Durch die Erhöhung der Vorentsäuerung im Vergleich zu konventionellen Anlagen kann der Drehofen kleiner ausgelegt bzw. bei gleichen Dimensionen mit höherer Leistung betrieben werden (VDZ 2008a).

7.3.1.5 Brennerdesign sowie biogene und nicht biogene Sekundärbrennstoffe

Zwar wird auch am optimalen Brennerdesign und -betrieb von Drehrohrofen-brennern geforscht, diese Forschung betrifft aber weniger die Wirkungsgradsteigerung des Brenners, sondern hauptsächlich die Anpassung an den steigenden Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der Hauptfeuerung, die Optimierung der Brennstoffmischung sowie die Primärluftführung, Sauerstoffanreicherung, Verbrennung mit reinem Sauerstoff und dadurch bedingt auch die Vermeidung von NO_x-Emissionen (VDZ 2009b; CSI/ecra 2009). Ein wesentlicher Vorteil eines Brennertausches ist die einfache Nachrüstbarkeit, der meist ohne größere Veränderungen am Ofen selbst realisiert werden kann.

In erster Linie kommt es zunächst einmal zu einem Ersatz klassischer Brennstoffe (schweres Heizöl, Petrolkoks, Kohle) durch neuartige Brennstoffe, die häufig zumindest zu einer Emissionsreduktion führen können. Bei Alternativbrennstoffen handelt es sich um aufbereitete Industrie-, Gewerbe- und Siedlungsabfälle (z. B. Altreifen, Biomasse, Tiermehl, Sägemehl, Klärschlamm, Papierrückstände, Holzreste, Plastik etc.). Dabei sind hauptsächlich die gestiegenen Energiekosten Treiber für den Einsatz von Alternativbrennstoffen. Innerhalb der Zementindustrie wird in Deutschland mit mehr als 50 % Substitution fossiler Brennstoffe bereits heute ein relativ hohes Maß beim Einsatz alternativer Brennstoffe erreicht. Einzelne Zementfabriken in Europa setzen bereits 98 % alternativer Brennstoffe ein (CIS/ecra, 2009; WBSCD/IEA, 2009).

Prinzipiell führt der Einsatz von alternativen Brennstoffen nicht automatisch zu einem geringeren spezifischen Energiebedarf. Eine günstigere CO_2-Bilanz im Hinblick auf den EU Emissionshandel spielt jedoch eine Rolle. Insbesondere der Einsatz von Biomasse wirkt sich positiv auf die spezifischen CO_2-Emissionen der Zementherstellung aus. Immerhin sind etwa 40 % der CO_2-Emissionen einer Zementfabrik brennstoffbedingt (WBSCD/IEA, 2009).

Dabei muss erwähnt werden, dass die Zementindustrie – ähnlich wie bei den Klinkersubstituten für Mehrkomponentenzementarten und „Low-carbon-Zementtypen“ (siehe Abschnitt 7.3.1.2 bzw. 7.3.1.3) – Schwierigkeiten bei der Verfügbarkeit der benötigten alternativen Brennstoffe in der benötigten Menge/Qualität und zu vernünftigen Kosten bekommen könnte. Gerade bei den Kosten für die biogenen Brennstoffe müssen auch die Transportwege mitbeachtet werden. Zudem dürfte in Zukunft der inter-sektorale Wettbewerb um Biomasse und Landnutzung weiter zunehmen. Aufgrund des zunehmenden Wettbewerbes um die Biomasse zu energetischen und stofflichen Nutzungszwecken, der erwarteten Preissteigerung bei den biogenen Brennstoffen (CIS/ecra 2009) und der vorhandenen Förderung des Einsatzes erneuerbarer Energien in anderen Industriesektoren dürfte es für die Zementindustrie zunehmend schwieriger werden, die biogenen Brennstoffe in ausreichender Menge zu beschaffen. Für die Zementproduktion ist es dabei absolut wichtig, dass die Sekundärstoffe eine bestimmte Zusammensetzung besitzen. Deshalb können für die Zementproduktion nicht Abfälle mit beliebiger Zusammensetzung eingesetzt werden. Die Sekundärbrennstoffe weisen in ihrem Ausbrennverhalten deutlich mehr Schwankungen auf als Kohle. Daher ist es für die Hersteller eine hohe Herausforderung, die Gleichmäßigkeit der Zementherstellung trotz wechselnder Brennstoffqualitäten bzw. Rohmaterialen dauerhaft zu garantieren. Eine derartige Gleichmäßigkeit ist für einen Zementproduzenten jedoch von elementarer Bedeutung. Solch eine Gleichmäßigkeit bezüglich des fertigen Produktes lässt sich mit einem Anteil von 20-30 % inhomogenen Sekundärbrennstoffen erzielen, nicht aber bei einer Verwendung von Anteilen über 50 bis 70 % (persönliche Mitteilung eines Branchenexperten).

7.3.1.6 Optimierung der Verbrennungsführung bzw. der Ofensteuerung

Die Optimierung der Verbrennungsführung, die z. B. die Minimierung des Luftüberschusses bewirkt, wird durch das Zusammenspiel von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik erzielt. Auch der Einsatz von sogenannten Mineralisatoren bzw. Fließmitteln kann das Brennverhalten der Rohstoffe z. B. durch Veränderung der Viskosität positiv beeinflussen (CSI/ecra 2009).

Generell trägt eine fortschrittliche Ofenregelung mit Verbrennungsluftvorwärmung stets zu einer optimalen Ofenbetriebsführung bei und kann dadurch neben einer Senkung des Energiebedarfs auch geringere Instandhaltungskosten, eine Verbesserung der Produktqualität oder eine Steigerung der Produktionsleistung bewirken. Dazu trägt auch die Optimierung der Ofenkonstruktionen durch wärme- und strömungstechnische Simulationen bei. Gleichzeitig erfolgt eine kontinuierliche Überwachung des Verbrennungsprozesses sowie ein hoher Automatisierungsgrad, wobei die Ofenprozessführung eine unterschiedliche Komplexität aufweisen kann. Diese reicht von der einfachen Temperatursteuerung bis hin zu mathematischen Modellen zur Steuerung diverser Ofenparameter (Gasmenge, Brennluftmenge, Durchlaufgeschwindigkeit etc.).

Zementklinker wird heute in Deutschland zum überwiegenden Teil (ca. 88 %) nach dem Trockenverfahren in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern hergestellt. Darüber hinaus erfolgt die Klinkerproduktion zu ungefähr 11 % nach dem so genannten Halbtrockenverfahren. Insgesamt entfällt etwa 1 % der genehmigten Klinkerproduktion in Deutschland auf Schachtöfen (http://vdz-congress.org/421.98.html). Die Errichtung von Brennöfen für die Zementindustrie ist generell sehr kapitalintensiv, sodass für diese mit einer Lebensdauer von etwa 30-50 Jahren gerechnet werden muss (CSI/ecra 2009).

7.3.1.7 Abwärmenutzung – betriebsintern oder zur Stromerzeugung (ORC)

Wärmerückgewinnung ist bereits weit verbreitet in der Zementherstellung. Verbleibende Energieverluste sind z. B. durch Nutzung von Kühlerabluft und ggf. Bypassgas minimiert. Bei der heute üblichen Abwärmenutzung werden die heißen Rauchgase zur Vorwärmung der Verbrennungsluft sowie der fertig gebrannte heiße Klinker zur Vorwärmung des Brenngutes oder zur Trocknung der Rohstoffe genutzt (CSI/ecra 2009, VDZ 2008a). Dennoch liegen bei einer weiterführenden Abwärmenutzung noch ungehobene Potenziale, wobei das verfügbare Temperaturniveau Grenzen setzt.

Jedoch muss stets auch die Wirtschaftlichkeit von Abwärmenutzungsmöglichkeiten mit berücksichtigt werden (VÖZ 2010). So verfügt beispielsweise die österreichische Zementindustrie 2007 über ein noch nutzbares Abwärmepotenzial von 420 GWh oder etwa 10 % des Brennstoffenergieeinsatzes, wobei die Abwärmenutzung nur an einzelnen Fällen wirtschaftlich möglich ist. Dieser Anteil wird auf 45 % der nutzbaren Abwärme der Zementindustrie in Österreich geschätzt (VÖZ 2010).

Zu erwähnen sind in diesem Kontext Pilotprojekte zur Wärmerückgewinnung, ORC (Organic Rancine Cycle)/GuD-Kraftwerke, Wärmeauskopplung, Wärmerückgewinnung etc. Die Potenziale der Stromgewinnung aus den Zementherstellungsprozessen dürften wegen der relativ niedrigen Temperaturen der Abwärmeströme begrenzt sein.

So ist das ORC-Verfahren zur Stromerzeugung bei Zementwerken in Deutschland mit nur einer Anlage (in Lengfurt) realisiert, was aufgrund relativ günstiger Strompreise und hohen Investitionskosten dieser bisher wenig angewandten Technologie zu erklären ist. Man kann jedoch davon ausgehen, dass sich die ORC-Technologie innerhalb der nächsten zehn Jahre in der Zementbranche in Deutschland und anderen OECD-Ländern verbreiten wird (persönliche Mitteilung eines Branchenexperten). Die Stromerzeugung aus Abwärme bietet im Gegensatz zur direkten Wärmenutzung den Vorteil, die erzeugte elektrische Energie in ein öffentliches Netz einzuspeisen, wenn auch wenn kein Wärmebedarf besteht (VÖZ 2010).

Eine Verringerung von Wärmeverlusten bzw. eine bessere Wärmerückgewinnung führt in Abhängigkeit vom Alter der Zementanlage zu sichtbaren Einsparungen (IV Salzburg 2009). In älteren Zementwerken ist ein Ausbau der Abwärmenutzung sicherlich noch möglich. Dabei macht bei konventionellen Drehrohrofenanlagen die Strahlungsabwärme des Drehrohrofens neben der Rohgasenthalpie den größten spezifischen Energieverlust aus (VÖZ 2010). Um das Abwärmepotenzial zu quantifizieren, bräuchte es neben den vorliegenden Abschätzungen von CIS/ecra (2009) bzw. VÖZ (2010) weiterer differenzierten Erhebungen, denn das jeweilige Temperaturniveau einzelner Anlagen sowie ihr Re-Investitionszyklus ist bei den Überlegungen wegen der Frage der Rentabilität von Beduetung.

7.3.1.8 Optimierung Klinkerkühler

Zur Erreichung einer hohen Energieeffizienz wird bei der Klinkerkühlung versucht, möglichst hohe Verbrennungslufttemperaturen und im Gegenzug möglichst geringe Klinkertemperaturen zu erreichen. Fortschritte in der Rostkühlertechnik haben bereits in den vergangenen Jahren zu einer deutlichen Verbesserung der thermischen Effizienz und der Verfügbarkeit der Ofenanlagen geführt und erhöhten auch die Wärmrückgewinnung bzw. die Produktionskapazitäten (VDZ 2008a, b, c; CSI/ecra 2009). Weiterhin kommen auch noch Dreh- oder Satelittenkühler zum Einsatz (CSI/ecra 2009).

Drehzahlgeregelte Antriebe (variable speed drives) erweisen sich dabei als ergiebige Effizienzoptionen, da Gebläse große Luftvolumina durch Drehrohrofen, Mühlen, Filter bzw. Rostkühler transportieren und je nach Durchsatz bis zu 70 % Stromeinsparungen erzielen können. Alle Luftströme müssen angepasst und geregelt werden, da die benötigte Luftmenge stark von den atmosphärischen Bedingungen, Prozessbedingungen und dem Belüftungsbedarf abhängt (ABB Technik 2/2007). Häufig stellen Multidrive-Systeme die optimale Antriebslösung für den Kühlerbereich dar (ABB Technik 2/2007).

7.3.1.9 Optimierung Mahltechnologie

Der Elektroenergieaufwand für die Zementherstellung beträgt in 2009 in Deutschland im Mittel etwa 100 kWh pro Tonne Zement, wobei allein 30 % auf das Vermahlen von Klinker und Zumahlstoffen zu Zement verwendet werden (VDZ 2009a). Die Zerkleinerung von Gestein und Klinker benötigt insgesamt den größten elektrischen Energieeinsatz, größere Energieeinsparpotenziale liegen nach Aussagen der Zementindustrie am ehesten noch im Bereich dieser Mahltechnik (VDZ 2009b; BREF 2010). Dabei können ganz unterschiedliche Technologieansätze zum Tragen kommen (BREF 2010). Der elektrische Energiebedarf für die Zementmahlung ist zudem stark von der Zementsorte und damit von der Zementfeinheit und der Mahlbarkeit der Zementhauptbestandteile abhängig (VÖZ 2010).

Langfristig ist dabei mit einer fortschreitenden Substitution der Kugelmühlen zu rechnen, die jedoch auch in ihrer Leistung gesteigert werden können (CSI/ecra 2009; VDZ 2009b). Bereits heute werden in der Zementindustrie schon vielfach die energetisch effizienteren Gutbettwalzenmühlen bzw. Vertikalwälzmühlen eingesetzt (CIS/ecra 2009; VÖZ 2010). Große Wälzmühlen ermahlen heute stündlich bis zu 500 t Rohmehl und haben einen Energiebedarf von etwa 10 bis 16 kWh/t Rohmehl (http://vdz-congress.org/421.98.html). Seit einigen Jahren ist bei der Zementmahlung weltweit ein Trend hin zu Vertikal-Wälzmühlen zu erkennen. Bezüglich des Energiebedarfs liegen die Vertikalwälzmühlen zwischen Kugel- und Gutbettwalzenmühlen (BREF 2010). Mit derartigen Vertikalwälzmühlen lassen sich jedoch nicht alle Zementqualitäten herstellen, die mit Hilfe von Kugelmühlen produziert werden können. Nach Auskunft des VDZ sind daher auch nur vereinzelte Mahlanlagen dieses Typs in Europa in Betrieb. Aufgrund der oben erwähnten Qualtitätseinbußen im Bezug auf den Mahlgrad bzw. die Korngrößenverteilung geht der VDZ davon aus, dass diese Technologie zukünftig eher nicht in bedeutendem Umfang in Deutschland eingesetzt werden wird. In Ländern, die keine so hochwertigen Zementarten produzieren, kommt der Vertikalwälzmühle jedoch eine bedeutende Rolle bei der Zementherstellung zu.

Die Diffusionsraten der Gutbettwalzen- bzw. Vertikalwälzmühlen sind jedoch wegen der Eigenschaften dieser Mühlenarten in Deutschland auch zukünftig beschränkt. In der Steine-Erden-Branche ist es insgesamt äußerst schwierig eine Diffusionsrate dieser Technologien abzuschätzen, da die Qualitätsanforderungen an den fertigen Zement, die verschiedenen Zementarten sowie die eingesetzten Zumahlstoffe für die Wahl der Mühlenart von entscheidender Bedeutung sind. Die Qualitätsanforderungen an das fertige Produkt beschränken den Einsatz der Gutbettwalzenmühlen in der Zementindustrie, da durch den Einsatz von Gutbettwalzenühlen im Vergleich zu konventionellen Kugelmühlen ein deutlicher Effekt auf die Korngrößenverteilung erzielt wird.

Prinzipiell werden Gutbettwalzenmühlen bei der Zementproduktion in Deutschland nur in Kombination mit Kugelmühlen betreiben, um den Qualitätsanforderungen an den fertigen Zement gerecht zu werden.

Gutbettwalzenmühlen führen im Vergleich zu Kugelmühlen zwar zu einer Effizienzsteigerung (~30 %), aber der Einsatz dieses Mühlentyps ist mit hohen Investitionen verbunden (CSI/ecra 2009). Zu beachten ist dabei, dass durch den qualitätsbedingten kombinierten Betrieb von Kugel- und Gutbettwalzenmühlen die Energieeinsparung im Vergleich zum reinen Gutbettwalzenmühlenbetrieb verringert wird. Desweiteren lohnt sich die Investition in eine effizientere Mühle nach Aussagen des VDZ für einen Zementproduzenten niemals allein wegen deren besserer Energieeffizienz. Aber auch das getrennte Vormahlen von Vorprodukten der Portlandzemente auf eine bestimmte Feinheit und das anschließende gemeinsame Feinmahlen der Vorprodukte auf die Fertiggutfeinheit kann zur Stromeffizienz beitragen. Dadurch kann die Arbeitsweise der Vor-Mühlen und der Feinmühlen besser als beim gemeinsamen Mahlen auf das jeweilige Mahlgut eingestellt und damit meist eine höhere Energieausnutzung erzielt werden als beim gemeinsamen Vermahlen (VDZ 2008a).

Eine Alternative dazu stellt das getrennte Feinmahlen der Komponenten auf Fertiggutfeinheit und das anschließende Mischen der mehlfeinen Stoffe dar. Im Übrigen brannten laut BREF (2010) im Jahr 2008 in Deutschland von insgesamt 58 Zementwerken nur 38 Zementwerke ihren Klinker selbst, während 20 Zementwerke bereits fertig gebrannten Klinker lediglich zu Zement durch Mahlen aufbereiteten.

7.3.1.10 Einführung von Energiemanagementsystemen

Generell lassen sich gewisse Energieeffizienzpotenziale auch in der Zementindustrie durch Energiemanagementsysteme, eine Optimierung der Steuerungstechnik und des Lastmanagements oder CFD-basierende numerische Simulationen erzielen.

Eine optimierte Prozessführung birgt stromseitig ein Einsparpotenzial von ca. 5 % bezogen auf den gesamten Strombedarf bei der Zementherstellung. Verbesserte Druckluftanwendungen und deren teilweiser Ersatz durch mechanische Anwendungen (z. B. eine mechanische Förderung des Mahlgutes anstelle einer pneumatischen Förderung) reduzieren den spezifischen Strombedarf weiter.

7.3.1.11 Sonstige Effizienzoptionen

Die österreichische Zementindustrie betreibt ebenfalls eine Forschungsinitiative bezüglich eines effizienten Energieeinsatzes. Dabei werden in der Branche systematisch die Energieeffizienzmaßnahmen erhoben (Vereinigung der österreichischen Zementindust-

rie 2009). Forschungsansätze dieser Forschungsinitiative betreffen ebenfalls neue Zementsorten oder Katalysatortechnologien wie z. B. die Selective Catalytic Reduction (SCR)-Technologie (Vereinigung der österreichischen Zementindustrie 2009b).

Weitere aktuelle Forschungsansätze zur Effizienzsteigerung des Zementherstellungsprozesses betreffen u. a. die Porenanalytik mittels Neutronenstreuung, die digitale Hochleistungsbildverarbeitung zur Sicherung und Bestimmung der Qualität von Zement (Vereinigung der österreichischen Zementindustrie 2009a), Prozessanalyse und -steuerungsverfahren, die Prozessfiltration (ZKG 2009) sowie die Verbesserung der Haltbarkeit von Beton. Aber auch die Entwicklung effizienterer Querschnittstechnologien (z. B. Druckluft, Transportbänder, Gebläse) führt zur Reduktion des Energiebedarfes.

Weitere Effizienzoptionen der Zementindustrie können beispielsweise in VÖZ (2010), CIS/ecra (2009), WBSCD/IEA (2009) etc. nachgeschlagen werden.

7.3.2 Kalkindustrie

In der Kalkindustrie können innovative Verfahren im Bereich der energieaufwendigen Mahltechnologie und bei der Ofentechnologie zu Energieeinsparungen führen. Während Innovationen und Modifikationen im Mahlbereich zu Einsparungen auf der Stromseite führen, werden durch Modifikationen am Kalkofen Wärmesparpotenziale erschlossen. Ansonsten weist die Kalkherstellung nur noch recht kleine Effizienzpotenziale auf, da es sich um relativ unkomplizierte und altbewährte Technik handelt.

Außerdem muss bei der Betrachtung der Effizienzoptionen berücksichtigt werden, dass gleichzeitig u. a. durch die steigenden Anforderungen bezüglich des Umweltschutzes in Deutschland der elektrische Energiebedarf pro Tonne Kalk auch zukünftig anwachsen wird. Daher ist bereits ein auf gleichem Level stagnierender Strombedarf bei der Kalkherstellung mit der Realisierung eines gewissen Effizienzpotenzials verbunden.

7.3.2.1 Optimierung Brennöfen

Die eingesetzten Ofentypen sind bei der Kalkherstellung deutlich vielfältiger als bei der Zementherstellung (BREF 2010). Neben vergleichbaren Drehrohröfen werden zusätzlich Schachtöfen, Ringschachtöfen, Doppelschrägöfen, Mehrkammeröfen und andere Typen eingesetzt. Dabei ist der Energiebedarf von Schachtöfen im Allgemeinen deutlich geringer als der Bedarf von Drehrohröfen. Der Einsatz von hocheffizienten Filtern kann den Wassergehalt am Eingang des Kalkofens verringern und somit Verdampfungsenergie einsparen. Außerdem kann der Ofen durch eine besser isolierende feuerfeste Auskleidung (thermische Isolierung) verbessert und somit die Wärmeverluste in diesem Verfahrensschritt verringert werden.

Die allgemeine Zuordnung des Strombedarfs im Brennprozess zu einzelnen Aggregaten ist kaum möglich. Weitere Maßnahmen zur Optimierung der Brennöfen bzw. der Optimierung der Verbrennungsführung sind bereits bei der Zementindustrie in Abschnitt 7.3.1.6 aufgeführt.

7.3.2.2 Betriebsintern Abwärmenutzung zur Stromerzeugung

Die Möglichkeiten der Abwärmenutzung (betriebsintern oder zur Stromerzeugung) werden im Rahmen der Zementindustrie (siehe Kapitel 7.3.1.7) behandelt. Dieselben Technologien können auch bei der Kalkindustrie zur Nutzung der Abwärme eingesetzt werden.

7.3.2.3 Optimierung Mahltechnologie

Ebenso wie bei der Zementherstellung erfolgt nach dem Brennen und Abkühlen bei der Kalkherstellung ein Mahlprozess, um die definierte Korngröße des Endprodukts zu erhalten. Bei der Mahltrocknung von Kalkstein zu Kalksteinmehl oder der Mahlung von Branntkalk zu Feinkalkmehl sind Stromeinsparpotenziale vorhanden, die durch die Substitution von Kugelmühlen durch Walzenschüsselmühlen mit integriertem Hochleistungssichter erschlossen werden können.

So werden etwa 75 % des in Deutschland produzierten Branntkalkes gemahlen, der Rest wird als Stückkalk verkauft. In der Kalkindustrie weisen die Gutbettwalzenmühlen (siehe 7.3.1.9) aber bereits heute eine Diffusionsrate von etwa 98 % auf, da beim Kalk keine Qualitätsprobleme mit diesem Verfahren entstehen. Das moderne Zerkleinerungsprinzip und der Hochleistungssichter reduzierten den Strombedarf im Vergleich zu konventionellen Kugelmühlen um bis zu 40 %. Das Potenzial ist aber realisiert.

7.3.2.4 Sonstige Effizienzoptionen

Auch die Auswahl des Brennstoffs hat einen direkten Einfluss auf die Energieeffizienz. Weitere Einflussgrößen sind die Produktqualität (Weichbrand/Hartbrand, Rest-CO_2-Gehalt des Produktes), die Rohstoffzusammensetzung, die Feuchte des Rohmaterials, die Geometrie des Ofens, die Prozesssteuerung sowie die Korngröße (Umweltbundesamt Österreich 2007; BREF 2010).

Gleichzeitig kann auch die thermische Energie von Prozessabgasen mit niedriger Temperatur genutzt werden (Gebr. Pfeifer AG 2010). Weitere Optionen für Energieeinsparungen sind: Einführung bzw. Erweiterung von Blindstromkompensation, die Einführung von Energiemanagementsystemen, die Optimierung der Aufgabenkörnung bzw. Trocknungsanlage, Reduktion von Materialtransporten, stabiler und gleichmäßiger

Ofenbetrieb, generelle Prozessoptimierung, Brennersteuerung, Verringerung von Falschlufteinbringung, Ersatz von Radladern etc.

7.3.3 Ziegelindustrie

Die Produktion von Dach- und Mauerziegeln weist aufgrund des relativ guten und modernen technischen Zustandes der für diese Produktgruppen heute eingesetzten Brennöfen ein relativ geringes Effizienzpotenzial von etwa 12 – 14 % auf. Dagegen lässt die Produktion von Vormauerziegeln und Klinkern größere Möglichkeiten zur Energieeinsparung (bis zu 30 %) erkennen, da die technischen Anlagen älterer Bauart sind und zugleich höhere Abgasverluste beobachtet werden (Ziegelindustrie International 2002).

7.3.3.1 Verbundoptimierung Tunnelofen – Trockner

Nach einer Analyse von Gubler und Wurche (2006) muss die energieeffiziente Optimierung einer Ziegelei am Tunnelofen ansetzen, zumal der zweite wesentliche Wärmeverbraucher einer Ziegelproduktionsanlage, der Trockner, mit der Abwärme des Tunnelofens betrieben werden kann (Wärmerückgewinnung). Schließlich speichern die Ziegeleiprodukte nach ihrer Fertigstellung im Tunnelofen eine noch relativ große Wärmemenge, durch deren maximale Rückgewinnung und prozessinterne Nutzung sich die Energieeffizienz der Gesamtanlage optimieren lässt (Gubler und Wurche 2006). Darunter fallen z. B. die Verbrennungsluft-Vorwärmung, Zwischenspeicherung der Verbundenergie oder die ofeninterne Nutzung der Kühlwärme. Laut Gubler und Wurche (2006) kann die für den Trockner erforderliche Prozesswärme unter optimalen Bedingungen zu etwa 40 % aus der Abwärme des Tunnelofens zurückgewonnen und zur Trocknung der feuchten Rohlinge eingesetzt werden. D. h., annähernd 60 % des für die Trocknung erforderlichen Energiebedarfs muss im optimalen Trocknerbetrieb durch Stützbrenner im Trockner erzeugt werden (Gubler und Wuche, 2006). Solch ein Wärmeverbund zwischen Tunnelofen und Trocknungsanlage hat sich generell als äußerst energieeffizient erwiesen (RWI 2009). Dies bedeutet jedoch auch, dass Ofen- und Trocknerbetrieb zeitlich abgestimmt im Synchronbetrieb betrieben werden müssen und nicht im diskontinuierlichen Betrieb an Wochenenden und Feiertagen.

Hinzu kommt, dass auch laut Ziegelindustrie International (2002) die in der Kühlzone des Tunnelofens freiwerdende Verbundwärme für die energetisch optimierte Trocknung von Ziegelrohlingen ausreicht. Somit ist eine Zusatzheizung der Trockner grundsätzlich nicht erforderlich, kann aber zur besseren Regelbarkeit notwendig sein. Heutzutage arbeiten Trockner daher mit teilweise unnötig hohem Zusatzenergieeinsatz (Ziegelindustrie International 2002).

Eine effizientere Kühlung kann thermische Energiekosten einsparen, da dadurch z. B. auch das Überhitzen der Tunnelöfen vermieden wird, während die Ausschussrate gleichzeitig sinkt (Ziegelindustrie International 2009). Durch eine Änderung der Kühlzone und eine Rückführung der heißen Abluft in die Brennkammer lassen sich im Vergleich zu einer konventionellen Anlage 8 – 14 % Energiekosten einsparen (Ziegelindustrie International 2009).

Es empfiehlt sich weiterhin, das Temperaturniveau in den verschiedenen Zonen des Tunnelofens auf das jeweils tatsächlich notwendige Niveau zu reduzieren (Gubler und Wurche 2006). Dazu muss das Rohmaterial dem Tunnelofen in gleichmäßiger und definierter Zusammensetzung zugeführt werden. Weitere Einsparungen können durch die Anpassung der Betriebsparameter eines Tunnelofens in Teillastbetrieb (Brennkurve, Vorschubgeschwindigkeit, Schubluftmenge etc.) an die tatsächlichen Erfordernisse erzielt werden (Gubler und Wurche 2006).

Weitere Energieeinsparungen bietet die Schnellbrandtechnologie in Rollenöfen im Vergleich zu konventionellen Tunnelöfen, da diese u. a. aufgrund ihrer geringeren Größe eine flexiblere Regelung der Ofenparameter ermöglichen (Renz et al. 2001). Aber auch durch eine Zusatzisolierung z. B. der Trockenkammer für Ziegel lassen sich Wärmeverluste erheblich reduzieren (Ziegelindustrie International 2009).

7.3.3.2 Einführung Energiemanagementsystem/Prozessoptimierung

Die Einrichtung eines Energiemanagementsystems ermöglicht eine objektive Kontrolle der Energieverbräuche und schafft die Basis für eine Zuordnung der Verbrauchsdaten zu den einzelnen Produktionsbereichen (Münzer und Leis 1997). Diese Informationen erleichtern das Auffinden von Effizienzoptionen erheblich (Tönsing 1996).

7.3.3.3 Sonstige Effizienzoptionen

Ähnlich wie bei der Zementindustrie kann jedoch auch durch den Einsatz von effizienteren Querschnittstechnologien (Gebläseoptimierung, drehzahlgeregelte Antriebe, Optimierung des Druckluftbedarfes sowie des Lastmanagement bzw. der Steuerungstechnik etc.) zu deutlichen Einsparungen führen. Beispielsweise ist es einem Unternehmen gelungen, durch Verkürzung des Hubweges den Wirkungsgrad ihrer Hubpressen zu verbessern, was nach firmeneigenen Angaben eine Stromkostenreduktion gegenüber konventionellen Geräten um etwa 70 % bewirkt (Ziegelindustrie International 2009).

Des Weiteren bewirken folgende technische und organisatorische Maßnahmen Energieeinsparungen (Quelle: Gubler und Wurche, 2006; Fortschrittbericht für die Ziegelindustrie für das Jahr 2008; RWI 2002 & 2009):

- Beseitigung von Undichtigkeiten an Trocknern und Öfen sowie Isolierung von Rohrleitungen
- Leichtere Ofenwagenaufbauten, Roboterbeladung
- Verbesserung der strömungstechnischen Bedingungen, die einen optimierten Wärmeübergang zur Folge hat
- Einsatz verbesserter Brenner, Einsatz von thermischer Nachverbrennung
- Einsatz von Wärmetauschern
- Stromerzeugung aus Abwärmen der Ziegelindustrie (z. B. mittels ORC-Anlagen, Stirlingmotoren etc.)
- Luftfreie Brenner
- Einsatz drehzahlgeregelter und hocheffizienter Elektromotoren
- Einführung und Ausbau von Energiemanagementsystemen bzw. von Lastmanagement
- Optimierung durch Simulation (z. B. Trocknungskinetik)
- Anpassung des Luftdurchsatzes an theoretischen Wert
- Wochenendabsenkung der Trockenlüfter, Optimierung der Trocknerumwälzung
- Absenkung der Rauchgastemperatur durch Vergleichmäßigung der Besatzdichte, Anpassung der Brennkurve an die Ofenauslastung
- Abschaltung einzelner Produktionslinien innerhalb eines Marktgebietes
- Einführung der 7-Tage-Woche zur Realisierung eines Durchlaufbetriebes mit kontinuierlicher Abnahme der Ofenkühlluft durch den Trockner (bis zu 20 % Einsparungen).
- Energiezufuhr durch Ausbrennstoffe/Wahl des Porosierungsmittels.

7.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

Die mögliche zukünftige Wirkung der nachstehend diskutierten Effizienzoptionen bezieht sich nur auf Teile des amtlichen Endenergieverbrauchs der Steine-und-Erden-Industrie von insgesamt 222 PJ im Jahr 2007 (siehe Kapitel 7.2.4). Im Jahr 2007 können laut amtlichen Energiebedarfsstatistiken der Zementindustrie, der Kalkindustrie und der Ziegelindustrie zusammen etwa 131 PJ an Brennstoffbedarf und rund 18 PJ an Strombedarf zugewiesen werden (siehe Tabelle 7-11). Die Herstellung von Erzeugnis-

sen aus Beton, Zement und Gips, mit knapp 23 PJ von Energiebedarf sowie THG-Emissionen abgeschätzt. Die Szenarien unterscheiden sich dabei zum einen in der Potenzialdimension und zum anderen in Bezug auf ökonomische Parameter wie Energie- und CO_2-Zertifikatpreise (siehe Kapitel 1.4).

Tabelle 7-9: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie, 2007 – 2035

	Produktion [kt]					
Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Aufbereitung von Kalkstein	25.811	24.233	24.450	23.888	23.289	22.648
Gips	953	953	953	953	953	953
Kalkbrennen	7.016	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
Kalkmahlen	5.262	5.250	5.250	5.250	5.250	5.250
Klinker Brennen (halbtrocken)	1.707	0	0	0	0	0
Klinker Brennen (trocken)	22.675	23.903	23.790	22.978	22.122	20.896
Zementmahlen	33.400	32.743	32.589	32.363	32.061	31.660
Ziegel	13.278	13.017	12.956	12.866	12.746	12.587

Quelle: Annahmen von Fraunhofer ISI und IREES

Die betrachteten Subbranchen dieser verarbeitenden Industrie weisen sowohl einen elektrischen als auch einen thermischen Energiebedarf auf, der unterschiedlich groß ist (siehe Tabelle 7-10).

So liegt der spezifische Strombedarf der Steine-und-Erden-Industrie im Basisjahr 2007 bei allen untersuchten Subbranchen bzw. Produktionsschritten zwischen 0,1 bis 0,2 GJ pro Tonne (siehe Tabelle 7-10). Der gesamte elektrische Energiebedarf kann in allen Sektoren der Branche durch Realisierung spezieller Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel mehr oder weniger stark reduziert werden (siehe Tabelle 7-13). Insgesamt beläuft sich der elektrische Energiebedarf der in dieser Studie betrachteten Sektoren und Prozesse der Steine-und-Erden-Industrie im Jahr 2007 auf 18,18 PJ (siehe Tabelle 7-11).

Diese reduzieren sich bis 2035 im Frozen-Efficiency-Szenario auf 16,8 PJ und im Technische-Diffusion-Szenario auf nur 15,3 PJ. Der Rückgang um 8,5 % im Frozen-Efficiency-Szenario ist durch strukturelle Veränderungen wie z. B. den leichten Produktionsrückgang beim Zement und durch die neuen Bindemittelarten bedingt. Der weitere Rückgang um gut 10 % im Technische-Diffussion-Szenario ist durch unterstellte Effizienzgewinne bedingt (siehe Tabelle 7-10 und Tabelle 7-12).

Der verminderte ***Strombedarf*** der gesamten Gruppe der Steine-und-Erden-Industrie ist bedingt durch den hohen Anteil der Zementproduktion an dem Gesamtstrombedarf (in 2007: knapp 56 % und in 2035 Technisches Szenario 54 %). Allein für das Ze-

mentmahlen entfällt mit etwa 6,7 – 5,5 PJ der größte Anteil des Strombedarfs der Steine-Erden-Industrie (siehe Tabelle 7-11).

Tabelle 7-10: Resultierender spezifischer Energiebedarf je Prozess der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie nach Szenario, 2007 – 2035

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aufbereitung von Kalkstein	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gips	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kalkbrennen	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Kalkmahlen	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Klinker Brennen (halbtrocken)	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Klinker Brennen (trocken)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Zementmahlen	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ziegel	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aufbereitung von Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gips	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
Kalkbrennen	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5
Kalkmahlen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klinker Brennen (halbtrocken)	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Klinker Brennen (trocken)	3,5	3,5	3,5	3,4	3,3	3,1	2,7	3,1	2,7
Zementmahlen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ziegel	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,1	1,0	1,1	1,0

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 7.1 bis 7.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Im Gegensatz zum Strom ergibt sich auf der Brennstoffseite ein inhomoges Bild. Der absolute Energiebedarf im Jahr 2035 reicht dabei je nach Szenario von 95 bis 132 PJ (siehe Tabelle 7-11). Der spezifische Brennstoffbedarf reicht für die einzelnen Produktionsschritte – je nach Szenario und Jahr – von 0,9 GJ/t bis zu 4,0 GJ/t (siehe Tabelle 7-10). Bei den beiden Produktionsschritten „Aufbereitung von Kalkstein“ und. „Zementmahlen“ wird kein Brennstoff benötigt. Auch auf der Brennstoffseite liegt mit etwa 65 % in 2007 der größte Energiebedarf bei der Zementindustrie (siehe Tabelle 7-11).

Beim Brennstoffbedarf wird der Einfluss der Effizienzoptionen deutlich: Im „Technischen Diffusionsszenario“ wird davon ausgegangen, dass Mehrkomponentenzementarten und „Low-carbon-Zementtypen“ bis zum Jahr 2035 erfolgreich zur Marktreife entwickelt worden sind und gewisse Marktanteile ausmachen, deren Erreichen jedoch gewissen Unsicherheiten unterliegt (siehe Kapitel 7.3.1.2 und Kapitel 7.3.1.3).

Tabelle 7-11: Absoluter Energiebedarf und THG-Emissionen der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie je Prozess bzw. nach Szenario, 2007 – 2035

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aufbereitung von Kalkstein	3,38	3,20	2,97	3,15	2,89	3,15	2,65	2,97	2,65
Gips	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19	0,18
Kalkbrennen	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Kalkmahlen	0,84	0,84	0,84	0,83	0,81	0,78	0,72	0,78	0,72
Klinker Brennen (halbtrocken)	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Klinker Brennen (trocken)	3,17	3,33	2,93	3,26	2,84	3,28	2,77	3,25	2,73
Zementmahlen	6,68	6,52	6,33	6,36	6,10	6,36	5,99	5,90	5,54
Ziegel	2,66	2,59	2,52	2,59	2,52	2,58	2,50	2,58	2,50
Summe	18,18	17,65	16,75	17,36	16,33	17,31	15,79	16,65	15,31

	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Aufbereitung von Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gips	0,95	0,95	0,95	0,94	0,92	0,89	0,85	0,89	0,85
Kalkbrennen	25,96	25,90	25,90	25,40	25,13	24,67	24,27	24,67	24,27
Kalkmahlen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klinker Brennen (halbtrocken)	6,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Klinker Brennen (trocken)	79,36	83,26	73,13	80,64	68,96	73,79	57,39	73,79	57,39
Zementmahlen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ziegel	18,59	18,14	17,62	17,91	17,17	14,85	12,33	14,85	12,33
Summe	131,69	128,25	117,61	124,89	112,18	114,20	94,84	114,20	94,84

	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Aufbereitung von Kalkstein	605	538	323	528	315	528	289	499	289
Gips	100	98	87	97	84	93	79	93	79
Kalkbrennen	7.480	7.451	7.392	7.417	7.339	7.366	7.279	7.366	7.279
Kalkmahlen	151	141	92	139	89	132	79	132	79
Klinker Brennen (halbtrocken)	1.417	0	0	0	0	0	0	0	0
Klinker Brennen (trocken)	17.964	18.809	16.345	17.886	14.778	14.982	10.318	14.979	10.314
Zementmahlen	1.196	1.095	690	1.069	665	1.069	653	991	604
Ziegel	3.302	3.193	2.953	3.177	2.921	2.964	2.585	2.964	2.585
Summe	32.214	31.326	27.882	30.313	26.191	27.134	21.281	27.023	21.229

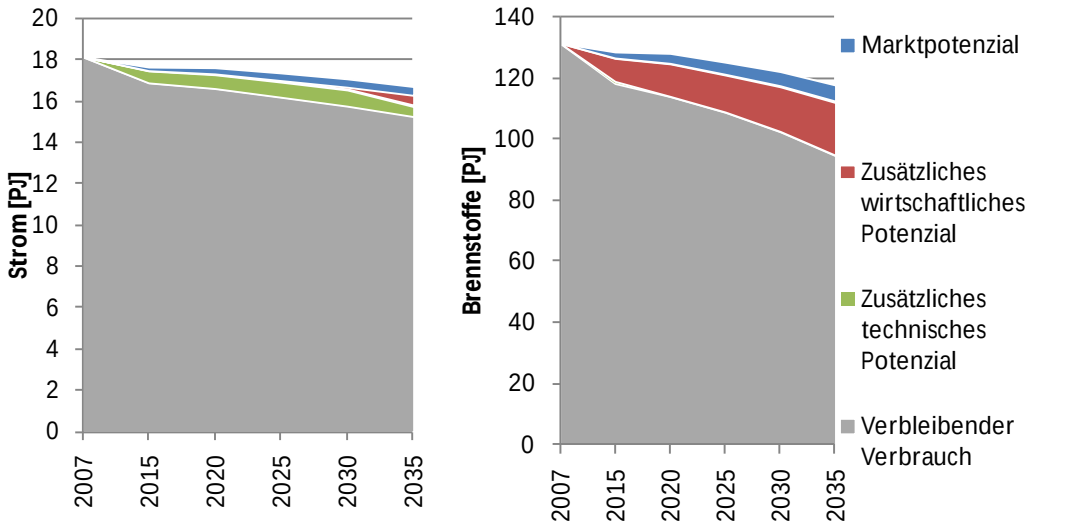
Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 7.1 bis 7.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Diese sichtbare Substitution konventioneller Produktionsmengen durch diese neuartigen Zementarten im Technischen Diffusionsszenario ab etwa 2025 – 2030 hat einen großen Anteil an der unterstellten Reduktion des thermischen Energiebedarfs des Klinkerbrennens. Dabei muss beachtet werden, dass sich alle Low-carbon-Zementtypen 2010 noch im mehr oder weniger fortgeschrittenen F&E-Stadium befinden und bestenfalls Produktionsmengen im Labormaßstab hergestellt werden.

Die Verfügbarkeit von Klinkersubstituten (z. B. Hüttensand, Flugaschen etc.) bzw. Abfallstoffen wird zukünftig bei der Produktion von derartigen Zementarten eine bedeu-

tende Rolle für die tatsächliche Realisierbarkeit einer wirtschaftlichen Massenproduktion spielen. Daher muss diesem Gesichtspunkt bei der Bewertung der neuen Zementarten eine verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die Autoren gehen jedoch davon aus, dass trotz aller heutigen Probleme bis 2030 neue Zementarten, die auf Klinkersubstituten basieren, im nenneswerten Umfang hergestellt werden können. Zumal auch eine ausreichende Verfügbarkeit von bereits bekannten oder noch unbekannten Substituten ausgegangen wird.

Abbildung 7-7: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie, 2007 – 2035



Strom [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	18,2	17,7	17,7	17,4	17,1	16,8
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,6	0,7	0,7	0,8	0,5

Brennstoffe [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	131,7	128,7	128,3	125,3	122,1	117,6
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	2,0	3,4	4,1	4,8	5,4
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	7,6	10,7	12,2	14,7	17,3
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 7.1 bis 7.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Heute wird Klinker in Deutschland zu etwa 90 % nach dem Trockenverfahren hergestellt. Das Klinkerbrennen nach dem Halbtrockenverfahren ist bereits heute nur noch auf vereinzelte Standorte in Deutschland beschränkt. Die dabei anfallende Klinkermenge ist im Vergleich zum Klinkerbrennen nach dem Trockenverfahren unbedeutend.

Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass die Produktion nach dem Halbtrockenverfahren in Deutschland im Laufe der nächsten Jahre vollkommen eingestellt werden wird (persönliche Auskunft VDZ). Aus diesen Gründen wird bei der vorliegenden Studie für die untersuchte Periode bis 2035 nur noch auf das Klinkerbrennen nach dem Trockenverfahren eingegangen (siehe Tabelle 7-9 bis Tabelle 7-13). Je nach betrachtetem Szenario reduziert sich die CO_2-Emissionsbilanz der in diesem Kapitel betrachteten Industrieprozesse bzw. Subbranchen von 32 Mio. t CO_2-eq. auf minimal gut 21 Mio. t CO_2-eq. im Frozen-Efficiency-Szenario (siehe Tabelle 7-11). Beim Klinkerbrennen, dem Kalkbrennen und der Ziegelproduktion handelt es sich brennstoff- und rohstoffbedingt um die drei Sparten mit den eindeutig meisten CO_2-Emissionen. Im Gegensatz dazu entstehen bei den mechanischen Prozessen (Zementmahlen, Kalkmahlen, Kalkaufbereitung) nur relativ geringe Emissionsmengen (siehe Tabelle 7-11). Beim Kalkmahlen beispielsweise fallen in allen vier Szenarien jährlich nur zwischen 79.000 und 151.000 t CO_2-eq. an.

Das Gesamtbild der Veränderungen für den Strom- und Brennstoffbedarf führt zu einem relativ gleichmäßigen Trend abnehmenden Bedarfs bis 2035 je nach den Annahmen der einzelnen Szenarien (vgl. Abbildung 7-8). Beim Strombedarf werden die wirtschaftlichen Potenziale weitgehend im Marktgeschehen ausgenutzt, während beim Brennstoff das wirtschaftliche Potenzial durch bestehende Hemmnisse nur zum Teil ausgeschöpft wird.

Hier sei auf einige wichtige Einflüsse hingewiesen:

- Beim Klinkerbrennen nach dem Trocken-Verfahren tragen verschiedene Maßnahmen zum Energieeffizienzpotenzial bei. So wird beim Technischen Szenario im Jahr 2035 durch alternative Zementtypen (low-carbon Zementtypen), die ab 2025 Marktanteile gewinnen, auf thermischer Seite ein Effizienzpotenzial von 3,76 PJ und 1.434 kt CO_2-eq. realisiert (siehe Tabelle 7-12).
- Die Ziegelindustrie ist dem KMU-Bereich zuzuordnen und somit verfügen viele Unternehmen dieser Branche noch über kein Energiemanagementsystem. Deshalb können durch die breite Einführung eines derartigen Systems in der Ziegelbranche im Jahr 2035 im Vergleich zum Frozen-Efficiency-Szenario 5,3 PJ an thermischer Energie eingespart werden.
- Auf der Stromseite tragen die mechanischen Mahlprozesse und deren Optimierung beim Zement- und Kalkmahlen oder der Rohstoffaufbereitung im Vorfeld des Klinkerbrennens zu deutlichen Strombedarfsrückgängen bei.
- Beim Strombereich kann zwischen technischen und wirtschaftlichen Potenzialen (z. B. durch hocheffiziente Mühlen, Motoren und Ventilatoren, Stromrückgewinnung von Bremsstrom bei Transport- und Verpackungsanlagen etc.) unterschieden werden (siehe Abbildung 7-8).

· Im Gegensatz dazu bestehen bei den Brennstoffen sehr hohe Unsicherheiten, welche technischen Innovationen sich im Bereich der Brennstoffverwendung sowie der neuen Bindemittel im ökonomischen Wettbewerb zukünftig durchsetzen könnten. Daher handelt es sich im Fall der Brennstoffe um ein konservatives technisches Potenzial (siehe Abbildung 7-8 bzw. Tabelle 7-12). Dies ist allerdings wegen der extrem langen Re-Investitionszeit der Anlagen nicht so problematisch.

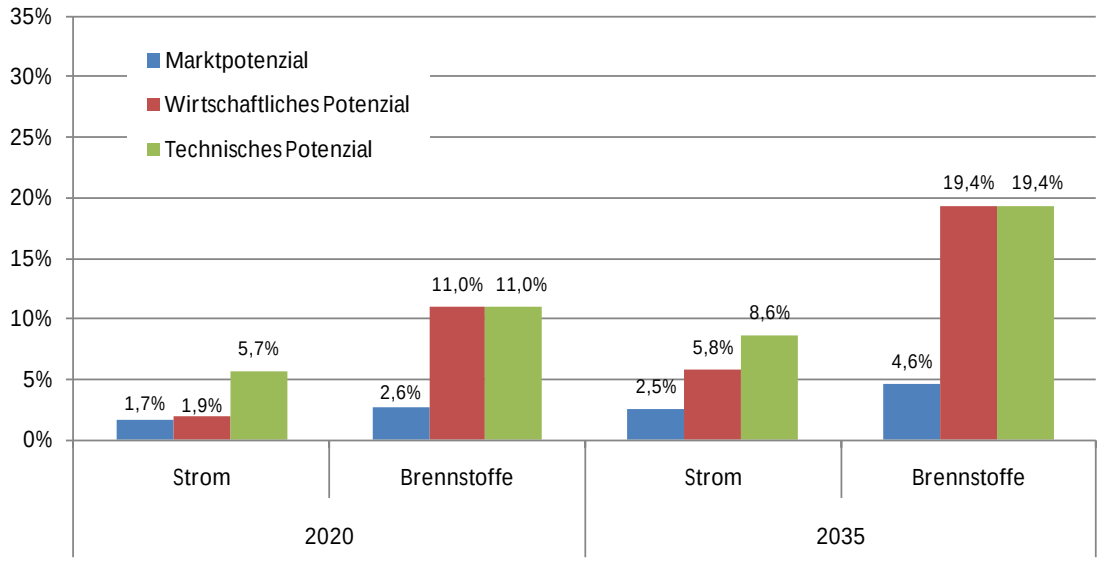
Tabelle 7-12: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale der vier Subbranchen je Einsparoption (technisches Potenzial), 2020 bzw. 2035

	Energie-Einsparpotenzial						THG Vermeidung		
	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brennstoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Steine-Erden	1,68	2,43	14,24	22,64	**14%**	**19%**	4.281	6.552	**25%**
Aufbereitung von Kalkstein	0,43	0,54	-	-	**18%**	**0%**	72	59	**11%**
Effizienteres Homogenisieren von Rohstoffen	0,06	0,12	-	-			10	13	
Effizienzsteigerung Kugelpressen	0,37	0,42	-	-			62	46	
Gips	0,01	0,01	0,06	0,10	**6%**	**10%**	5	8	**8%**
Optimierte Verbrennungsführung	-	-	0,02	0,04			2	3	
Prozessoptimierung	0,01	0,01	-	-			1	1	
Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	-	-	0,04	0,05			3	4	
Kalkbrennen	-	-	1,43	1,86	**0%**	**7%**	99	128	**3%**
Optimierte Verbrennungsführung	-	-	0,44	0,71			31	49	
Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	-	-	0,99	1,15			68	80	
Kalkmahlen	0,06	0,12	-	-	**14%**	**0%**	9	13	**9%**
Prozessoptimierung	0,06	0,12	-	-			9	13	
Klinker Brennen (halbtrocken)	- 0,00	0,00	0,65	0,75	**1%**	**13%**	116	197	**16%**
Abwärmenutzung, z.B . zur Stromerzeugung	0,00	0,01	-	-			1	1	
Brennstoffsubstitution	-	-	-	-			71	145	
Effiziente Kühlsysteme	- 0,01	- 0,01	0,40	0,43			26	29	
Optimierte Verbrennungsführung	0,00	0,01	0,11	0,18			8	13	
Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	0,00	0,00	0,14	0,14			10	10	
Klinker Brennen (trocken)	0,07	0,18	8,81	14,64	**7%**	**22%**	3.562	5.609	**36%**
Abwärmenutzung, z.B . zur Stromerzeugung	0,07	0,08	-	-			11	9	
Alternative Zementtypen	0,01	0,07	0,66	3,50			254	1.334	
Brennstoffsubstitution	-	-	-	-			2.089	2.461	
Effiziente Kühlsysteme	- 0,07	- 0,08	2,96	3,38			193	225	
Mehrkomponentenzemente	-	-	1,15	1,98			540	930	
Optimierte Verbrennungsführung	0,06	0,10	1,43	2,62			109	192	
Vorkalzinierung	-	-	1,73	2,23			306	393	
Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	0,01	0,01	0,86	0,93			61	65	
Zementmahlen	1,11	1,56	-	-	**25%**	**0%**	187	170	**15%**
Effizienzsteigerung der Kugelmühlen	0,54	0,87	-	-			91	95	
Substitution von Kugelmühlen	0,57	0,68	-	-			96	75	
Ziegel	0,01	0,02	3,29	5,29	**1%**	**30%**	229	368	**12%**
Energiemanagement System	0,01	0,02	2,36	3,61			165	252	
Optimierte Kühlzone und Abwärmenutzung	-	-	0,54	1,10			38	76	
Wärmerückführung zur Trocknung	-	-	0,38	0,58			27	40	

Quelle: eigene Annahmen von Fraunhofer ISI und IREES

Bei den neuen Bindemitteln wird davon ausgegangen, dass diese in Deutschland im Jahr 2030 einen Marktanteil von 12 % bzw. von 20 % im Jahr 2035 erreichen werden. Bei den Mehrkomponentenzementen wird ein Marktanteil von insgesamt etwa 60 % in 2035 erwartet. Sollte diese Marktdurchdringung in Deutschland bis 2035 aufgrund der weiter oben erwähnten Gründe nicht von den entsprechenden Zement- bzw. Bindemittelarten erzielt werden, reduziert sich in Abhängigkeit von der Diffussionsdifferenz entsprechend auch das wirtschaftliche Potenzial bei den Brennstoffen mehr oder weniger deutlich.

Abbildung 7-8: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen der Steine-Erden Industrie bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario



Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 7.1 bis 7.3 genannten Datenquellen und Annahmen

7.4.1 Berücksichtigte Einsparoptionen und deren Effizienzpotenziale

Aufgrund der Datenverfügbarkeit und der komplexen Produktionsprozesse innerhalb der Steine-und-Erden-Industrie konnten nicht alle in Kapitel 7.3 aufgeführten Effizienzoptionen mit quantitativen Kennwerten in die Untersuchung mit einfließen.

Alle in der Studie berücksichtigen Effizienzoptionen (siehe Tabelle 7-13) und deren spezifische Effizienzpotenziale, beziehen sich auf konventionelle Produktionsprozesse, wie sie heute in Deutschland in der Regel stattfinden.

Generell berücksichtigt die Studie bei der Modellierung der Ergebnisse mögliche Effekte, die durch das Zusammenwirken mehrerer Effizienzmaßnahmen entstehen, d. h., die für einzelne Maßnahmen angegebenen Zahlen dürfen nicht addiert werden, und bei den spezifischen Angaben muss darauf geachtet werden, ob sie das ganze oder nur einen Teil des Produktspektrums umfassen. D. h., die Angaben in Tabelle 7-13 sind nur als Effizienzpotenzial bei Realisierung der entsprechenden Effizienzoption als Einzelmaßnahme zu verstehen, und die Effizienzpotenziale der einzelnen Maßnahmenbündel können nicht zu einem Gesamtpotenzial aufsummiert werden, da die Realisierung von Maßnahmenbündeln sich gegenseitig ihr Potenzial vermindern und häufig an

anderer Stelle des Produktionsprozesses unter Umständen mit einem Mehrverbrauch an Energie verbunden sind.

Tabelle 7-13: In die Untersuchung eingeflossene Maßnahmenbündel zur Energieeffizienz und deren Effizienzpotenziale (Angaben in GJ/t Zement, GJ/t Kalk oder GJ/t Ziegel)

Prozess-Schritt	**Energieeffizienz-Option**	**Stromeinsparung in GJ/t**	**Brennstoffeinsparung in GJ/t**
Herstellung von Gips	Optimierte Verbrennungsführung	-	0,060
	Prozessoptimierung	0,016	-
	Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	-	0,080
Kalkbrennen	Optimierte Verbrennungsführung	-	0,252
	Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	-	0,270
Kalkmahlen	Prozessoptimierung	0,030	-
Rohstoffaufbereitung für Klinkerbrennen	Effizienteres Homogenisieren von Rohstoffen	0,007	-
	Effizienzsteigerung Kugelpressen	0,020	-
Klinkerbrennen (Halbtrocken-Verfahren)	Abwärmenutzung zur Stromerzeugung	0,030	-
	Brennstoffsubstitution	-	-
	Effiziente Kühlsysteme	-0,010	0,360
	Optimierte Verbrennungsführung	0,007	0,180
	Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	0,002	0,280
Klinkerbrennen (Trocken-Verfahren)	Abwärmenutzung zur Stromerzeugung	0,030	-
	Alternative Zementtypen	0,020	1,000
	Brennstoffsubstitution	-	-
	Effiziente Kühlsysteme	-0,005	0,200
	Optimierte Verbrennungsführung	0,007	0,180
	Vorkalzinierung	-	0,280
	Wärmenutzung zur Materialvorwärmung	0,002	0,177
	Mehrkomponentenzemente	-	0,200
Zementmahlen	Effizienzsteigerung der Kugelmühlen	0,015	-
	Substitution von Kugelmühlen durch Gutbett-Walzenmühlen	0,070	-
Herstellung von Ziegeln	Energiemanagement-System	0,002	0,185
	Optimierte Verbrennungsführung	-	0,116
	Rohlingtrocknung	-	0,054

Quelle: IREES

So ist es möglich, dass Maßnahmen, die zu einer Reduktion des thermischen Energiebedarfes beitragen, häufig an einer anderen Stelle des Produktionsprozesses den Strombedarf erhöhen (CIS/ecra 2009). Ein solcher Mehrbedarf an Energie kann jedoch nicht immer zu 100 % genau einem einzigen Maßnahmenbündel zugeordnet und kann

daher in Tabelle 7-13 auch nicht ausgewiesen werden. Auch in der Studie von CIS/ ecra (2009) wird mehrfach darauf hingewiesen, dass ein Aufsummieren der Einzeloptionen nicht möglich ist. Zudem ist die Diffusionsrate einer Effizienzoption (z. B. der Gutbettwalzenmühle) durch Qualitätsanforderungen begrenzt. Des Weiteren hängt die Energieeffizienz von den Diffusionsraten der einzelnen Maßnahmenbündel ab. Belastbare Statistiken bzw. Einschätzungen über die heutige Diffusion einzelner Technologien in der Steine-und-Erden-Industrie sind jedoch aufgrund der vielfältigen Produktionsprozesse nur äußerst schwer oder überhaupt nicht öffentlich verfügbar.

7.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren

Die gleichen Hemmnisse oder fördernden Faktoren gelten häufig mehr oder weniger für alle Größenklassen der Unternehmen und über die Branchengrenzen hinweg innerhalb der gesamten Steine- und Erden-Industrie, da es sich meist um energieintensive Prozesse handelt und die Energiekostenanteil bei rd. 10 % an den Produktionskosten liegen.

Technische Grenzen

Der Einsatz von Sekundärbrennstoffen wird nach Ansicht der Branche vom Emissionshandels-Schema nicht ausreichend honoriert. Sekundärbrennstoffe werden daher unabhängig vom Emissionshandel eingesetzt. Treiber hierfür sind die gestiegenen Energiekosten. Die Unternehmen der Branche achten seit vielen Jahren allein aufgrund der hohen Energiekosten auf den Einsatz energieeffizienter Technologie. Der Einsatz von alternativen Brennstoffen ist teilweise aufwendig. Jede Charge an alternativen Brennstoffen (z. B. Altreifen etc.) muss vor Verwendung bezüglich ihrer Zusammensetzung analysiert werden, um die hohen Standards für Zement in Deutschland erfüllen zu können. Außerdem sind eventuell größere technische Veränderungen an der bestehenden Anlage notwendig, um alternative Brennstoffe einzusetzen. Die Art der Brennstoffsubstitution ist bei den verschiedenen Branchen in der Gruppe sehr unterschiedlich und verschieden weit implementiert; bei der Zementproduktion ist sie beispielsweise weitgehend für organische Abfallstoffe ausgereizt. Auch die Akzeptanz des Einsatzes alternative Brennstoffe ist ein wichtiger Gesichtspunkt (z. B. bei Altreifen), da die Unternehmen um ein umweltfreundliches Image bemüht sind.

Auch in der Kalkindustrie kann nicht jede denkbare Innovation technisch umgesetzt werden (z. B. können in der Kalkindustrie keine Autoreifen als Sekundärbrennstoff eingesetzt werden, da es dadurch zu Qualitätseinbußen kommt).

Betriebsinterne Entscheidungsmuster

Wenige Unternehmen betreiben ***Eigenstromerzeugung.*** Aufgrund der Komplexität der Technologie und dem damit verbundenen Änderungsbedarf in der Wertschöpfungskette und dem zusätzlichen Kapitalbedarf ist die Eigenstromerzeugung für die meisten Firmen kein Thema.

Teilweise wird in Unternehmen über Investitionen noch immer alleine anhand der Amortisationszeit als einzigem, ökonomischen Entscheidungskriterium entschieden, obwohl es sich bei der ***Amortisationszeit*** um ein Risikomaß handelt (Schröder u. a. 2009). Dadurch werden Investitionen, die hochrentabel sind, häufig nicht realisiert. Eine Amortisationszeit von ein bis zwei Jahren ist gewünscht, fünf Jahre werden schon sehr kritisch betrachtet. Eine so kurze Amortisationszeit ist aber prinzipiell wegen der langen Lebensdauer der Anlagen (15 bis 20 Jahre) und den hohen Investitionssummen als Maßstab nach Meinung der Autoren unangemessen, da dadurch häufig Investitionen mit interner Verzinsung von mehr als 20 – 30 % von den Industrieunternehmen nicht getätigt werden. Hinzu kommt, dass der Einkauf der Unternehmen häufig nur die für die Anlage anfallenden Investitionen betrachten, keine hinreichenden technischen Spezifikationen zu Energieeffizienzaspekten hat und die Energieverbräuche der Anlagen von den Herstellern nicht angegeben werden, dann kann man auch keine Lebenszykluskosten in den Entscheidungen mit berücksichtigen.

Der ***Kapitalbedarf*** umweltfreundlicher und energieeffizienter Technologien stellt auch einen wichtigen Punkt dar. Die Kapitalrückflusszeiten werden aufgrund der unsicheren langfristigen politischen Rahmenbedingungen (s.u.) nicht selten als zu lang betrachtet, zumal da die entsprechenden Industrieanlagen normal effizienter Ausstattung schon einen hohen Kapitalbedarf erfordern.

Die Zementproduzenten können nur schrittweise Verbesserungen machen. Tiefgreifende Prozess-Innovationen sind kaum noch vorstellbar, da man in Deutschland schon relativ nah an dem theoretisch Möglichen ist (~ 60 % über dem theoretischen Minimum). Nach Aussagen der Hersteller von Drehrohröfen sind ***die Treiber für neue Entwicklungen in erster Linie die Kundenbedürfnisse*** und erst an zweiter Stelle andere Gründe (z. B. die Möglichkeit der Klinkerreduktion bei der Zementproduktion). Ordert der Kunde keine energieeffiziente Technologie, wird das Industriewerk nach Kundenwunsch gebaut, obwohl energieeffizientere Technik im Angebot des Technologieanbieters vorhanden sei. Dies liege auch daran, dass die Kunden der Technologieanbieter häufig auch hohen Investitionssummen eher mehr Aufmerksamkeit schenken als den Betriebskosten der Anlagen.

Energieeffizienzmaßnahmen rangieren häufig in den Unternehmen nicht in der Gruppe der hohen Prioritäten und strategischen Investitionen. Generell besteht auch häufig die Befürchtung, dass Energieeffizienzmaßnahmen am Prozess die Produkt- bzw. Prozesseigenschaften negativ beeinflussen könnten.

Ein weiteres Hemmnis für deutsche Betriebsstätten internationaler Großunternehmen sei eine begrenzte Verfügbarkeit von Investitionsmitteln. Denn multinationale Unternehmen investierten meist dort, wo sie den schnellsten Kapitalrückfluss erzielen könnten. Da im Ausland häufig kostengünstiger wegen geringerer Umwelt-Auflagen produziert werden könne, fließen viele Investitionsmittel in diese Standorte außerhalb Deutschlands bzw. Europas.

Im KMU-Bereich existiert häufig nur ein einziger Gaszähler und nur wenige Messtellen für Strom für den gesamten Betrieb. Häufig haben die technischen Leiter der KMU-Betriebe nicht die Zeit, sich um die Energieflüsse im Unternehmen zu kümmern.

In der Kalkindustrie macht man sich primär aufgrund des Kostendruckes Gedanken zur Energieeffizienzverbesserung, bei schwankenden Energiepreisen wie in der Periode 2007 bis 2010 führe dies zu keinen – aber eigentlich erforderlichen – konstanten F&E-Bemühungen.

Betriebsexterne Hemmnisse seitens der Mitakteure im Innovationsprozess

Der Zementmarkt in Deutschland ist gesättigt. Aufgrund der wirtschaftlich schwierigen Situation wird es in Deutschland nach Meinung der Zementindustrie voraussichtlich in Zukunft keine neuen Zementwerke geben. Gleichzeitig wird der relativ große ***Aufwand für die Genehmigung einer neuen Linie*** bemängelt. Aufgrund der Sättigungstendenzen wurde in den letzten Jahren das F&E-Budget der Unternehmen reduziert, allerdings in jüngerer Vergangenheit wieder aufgestockt (auch zur Erforschung der CO_2-Emissions-Reduktionsoptionen).

Die ***Abwärmenutzung*** ist vielen Firmen intern zu komplex und extern zu riskant, sodass sie deren Nutzung häufig wieder verworfen haben. Hinzu kommt, dass aus ökonomischer Sicht eine ganzjährige Nutzung der Abwärme notwendig wäre, was wegen der fehlenden Nähe zu anderen Betrieben oder Fernwärmenetzen meist nicht möglich ist.

Die ***Zementkunden*** weisen in der Regel gegenüber neuartigen Produkten eine konservative und eher ablehnende Haltung auf. Als Grund dafür sind die lange Lebensdauer der Bauwerke/Infrastruktur und die damit verbundenen hohen Qualitätsanforderungen bzw. Gewährleistungsverpflichtungen anzusehen. In diesem Zusammenhang muss auch die nationale bzw. ***europäische Normierung von Zementen*** (z. B. DIN EN

197-1, DIN 1164 etc.) erwähnt werden, die für die Einhaltung von Qualitäts-Standards sorgt. Man vertraut daher generell eher auf bewährten Zement, als neue Zementsorten auszuprobieren. Dauerhaftigkeit ist der entscheidende Faktor bei der Zementherstellung.

Deshalb muss oftmals erst durch einen ***niedrigeren Preis ein Anreiz zum Kauf neuentwickelter Zementsorten*** geschaffen werden. Dies würde aber für den Hersteller meist keine hinreichende Kostendeckung bedeuten, und sein Risiko wäre relativ groß. Neue energieeffizienter hergestellte Produkte auf den Markt zu bringen, dauert sehr lang.

Ein sehr großes Innovations- und Investitionshemmnis in der Zementbranche stellt nach Aussagen der Betreiber die Unsicherheit über die ***Ausgestaltung der nächsten Handelsperiode*** der CO_2-Zertifikate dar, bedingt durch die schwer abschätzbare Entwicklung der internationalen Klimapolitik ab 2013. Eine rasche Klärung der politischen Vorgaben und Rahmenbedingungen wird für äußerst wichtig für die Branche angesehen, zumal der EU-Emissionshandel als nicht zielführend im Hinblick auf das originäre Ziel, Treibhausgasemissionen einzusparen, zu bewerten sei. Die Sinnhaftigkeit des Instrumentes wird vor diesem Hintergrund in Frage gestellt. Die eher ***kurzfristige Ausrichtung des EU-Emissionshandels berücksichtigt nicht die lange Lebensdauer der Industrieanlagen***. Ebenso verhindern die langen Lebensdauern der Anlagen insbesondere aufgrund der hohen Investitionen einen frühzeitigen kompletten Ersatz der Anlagen durch effizientere Neuanlagen. Gegenüber kurz- und mittelfristigen Politikänderungen könne man daher nicht adäquat reagieren.

Die ***Integration des Emissionshandels*** in die Strukturen und Prozesse der Unternehmen stellt nach Aussagen der betroffenen Unternehmen einen ***erheblichen organisatorischen und finanziellen Aufwand*** dar. Der bürokratische Aufwand mit seinen hohen Kosten – auch Transaktionskosten – werden von der Branche als unverhältnismäßig hoch eingestuft.

In der Zementindustrie spielt das umweltfreundliche Image eine Rolle für die Außenwirkung des Unternehmens. Dabei zählt die Wirkung nach außen auf den Kunden.

Schnell oder zügig zu erklärende Forschungsfragen haben eine größere Chance, gefördert zu werden als komplexe Fragestellungen, da einfache Sachverhalte schneller zu vermitteln sind. Komplexität technologischer F&E-Fragen stelle somit ein Innovationshemmnis dar.

Weitere Hinweise – wenn auch kein Hemmnis

Ein zu beachtender Fakt – wenn auch kein Hemmnis – für eine eher langsame Verbreitung energieeffizienter Technologien in der Steine- und Erden-Industrie ist die lange Lebensdauer vieler Produktionsanlagen.

7.6 Branchenspezifische politische Instrumente

Die bestehenden branchenspezifischen Instrumente sind im Wesentlichen der EU-Emissionshandel, die Selbstverpflichtungen der betroffenen Industriezweige, das KfW-Beratungsprogramm und -Kredit-Förderprogramm für KMUs (s. u.). Betrachtet man die o.g. Hemmnisse, dann fällt auf, dass manche von ihnen, insbesondere der KMU, durch die bestehenden Politik-Maßnahmen nicht adressiert werden (vgl. Abschnitt 2.5).

7.6.1 Bestehende Instrumente

7.6.1.1 EU-Emissionshandel

Seit dem 1. Januar 2005 benötigen große energieintensive Industrieanlagen laut der EU-Emissionshandelsrichtlinie für ihren CO_2-Ausstoß eine entsprechende Anzahl von Emissionsrechten. Die Teilnahmeverpflichtung bezieht sich auf die Betreiber bestimmter Anlagen der Sektoren Energiewirtschaft und Industrie mit einer Mindestwärmeleistung von 20 MW, die in Annex I der EU-Emissionshandelsrichtlinie aufgelistet sind.

In der ersten und zweiten Handelsperiode erfolgte eine Gratiszuteilung von Emissionsrechten (Grandfathering). In Deutschland basierte die Berechnung der Gratiszuteilung auf einem Benchmark bzw. auf historischen Emissionswerten der jeweiligen Anlage. Hierbei wird unterschieden in bestehende Anlagen (§7 und 8 ZuG 2007; § 6 bis 8 ZuG 2012) und in Neuanlagen (§ 10 und 11 ZuG 2007; § 9 ZuG 2012). In den Zuteilungsverordnungen für 2007 und 2012 sind die entsprechenden Benchmarks genau beziffert. Die zentralisierten Zuteilungsregeln des Europäischen Emissionshandels für die dritte Handelsperiode sehen vor, dass Anlagen aus Industriesektoren ab 2013 eine Gratiszuteilung auf Basis von produktspezifischen Benchmarks für 10 % der besten Anlagen erhalten sollen, wobei die Höhe und die Anzahl der Benchmarks, die dann für Neu- und Bestandsanlagen gleichermaßen gelten sollen, von der EU Kommission noch festzulegen sind.

Der Anteil der Gratiszuteilung soll im Jahr 2013 bei 80 % der Zuteilungsmenge liegen, die auf Grundlage der EU-weit harmonisierten Zuteilungsregeln errechnet wurde. Der Anteil an Gratiszuteilungen soll dann bis 2020 kontinuierlich auf 30 % abschmelzen. Für das Jahr 2027 ist ein Gratisanteil von Null vorgesehen. Allerdings sollen Anlagen

aus „carbon-leakage“ gefährdeten Sektoren weiterhin 100 % dieser Zuteilungsmenge gratis erhalten. Darunter fallen Sektoren, deren Produktionskosten, gemessen an der Bruttowertschöpfung, um mehr als 30 % durch den EU-Emissionshandel ansteigen, wobei direkte Kosten (für Kauf von EUAs) und indirekte Kosten (i. e. über Strompreiserhöhungen infolge des EU-EH) zur Anrechnung kommen.

Zu den „Leakage-Sektoren“ zählen außerdem Sektoren, deren Handelsintensität, gemessen als das Verhältnis der Summe von Exporten und Importen zur Summe von Importen und innerhalb der EU hergestellten Waren 30 % übersteigt. Exporte und Importe beziehen sich dabei jeweils auf Importe/Exporte von Drittregionen in die EU. Auch eine Kombination der beiden Kriterien kann zur Einstufung als „Leakage-Sektor“ führen, sofern der Produktionskostenanstieg mindestens 5 % beträgt und die Handelsintensität gleichzeitig 10 % übersteigt. Die „Leakage-Sektoren“ mussten von der Europäischen Kommission bis Ende 2009 benannt werden. Der Zementsektor in der EU (und damit auch in Deutschland) zählt unter den oben genannten Kriterien zu den „Leakage-Sektoren“.

Einer Studie, erstellt von McKinsey im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie (BDZ) und des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ) im Jahr 2008, geht davon aus, dass eine vollständige Versteigerung der CO_2-Emissionszertifikaten bis zum Jahr 2020 dazu führen könnte, dass mindestens die Hälfte der Zementklinkerproduktion in Deutschland durch Importe aus Ländern außerhalb der Europäischen Union (z. B. Nordafrika) ersetzt würde. Deshalb sieht die deutsche Zementindustrie das oberste Ziel für die dritte Handelsperiode des EU-EH in einer kostenfreien Zuteilung der Zertifikate auf der Basis „anspruchsvoller, aber fairer“ Benchmarks (BDZ 2009b). Einer Studie des Umweltbundesamtes zufolge (Umweltbundesamt 2008) wären für die deutsche Zementindustrie im Durchschnitt auch bei hohen Auktionsanteilen nur moderate Wettbewerbswirkungen wegen des hohen Transportkostenanteils am Kostenpreis von Zement zu erwarten. Dabei ist zu beachten, dass die Wettbewerbswirkungen für grenznahe Standorte oder für Standorte, die an schiffbaren Wasserstraßen liegen, durchaus merklich ausfallen können.

7.6.1.2 Selbstverpflichtung der Industrie

Die Selbstverpflichtung der deutschen Industrie aus dem Jahre 1995 hatte branchenspezifische Zielsetzungen der Verminderung der spezifischen Energieverbräuche und CO_2-Emissionen. Diese Zielsetzungen wurden zur Vermeidung geplanter pretialer Instrumente der Bundesregierung zum Klimaschutz von den Branchen erklärt; ihre Einhaltung wird jährlich überprüft und die Zielsetzungen wurden für 2010 ergänzt. Ob die-

se Ziele im Mittel der Periode 2008/2012 erreicht wurden, wird sich erst nach 2012 zeigen.

Zementindustrie

Die Zementindustrie ist eine derartige freiwillige Selbstverpflichtung zum Umwelt- und Klimaschutz eingegangen und bekennt sich zum Leitbild der nachhaltigen Entwicklung (BDZ, 2009a; VDZ 2009, VDZ 2008b). Die Selbstverpflichtung der deutschen Zementindustrie beinhaltet zwei Ziele:

- die Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs sowie
- die Senkung der von der Zementbranche erzeugten CO_2-Emissionen.

Die Selbstverpflichtung aus dem Jahr 1995 formulierte eine 20%ige Reduktion der energiebedingten spezifischen CO_2-Emissionen bis 2005, bezogen auf das Jahr 1990. Dieses Ziel wurde im Jahr 2000 weiterentwickelt und beinhaltet nun eine 28%ige Reduktion bis zum Zeitraum 2008/2012 (Löckener und Timmer, 2002; VDZ, 2009). Die Ziele sollen durch die Ausschöpfung vorhandener verfahrenstechnischer Potenziale, die Verminderung des Einsatzes von fossilen Brennstoffen durch Verwendung von Sekundärbrennstoffen und die Substitution gebrannten Zementklinkers erreicht werden (BDZ, 2009a).

Kalkindustrie

Die deutsche Kalkindustrie hat sich bereit erklärt, ihre spezifischen Emissionen bis 2012 um 15 % gegenüber 1990 zu senken (http://www.kalk.de/8.html).

Ziegelindustrie

Die Ziegelindustrie hatte sich in einer freiwilligen Selbstverpflichtung dazu verpflichtet, bis zum Jahr 2012 gegenüber dem Stand von 1990 den spezifischen CO_2-Emissionen um 28-30 **%** zu senken.

7.6.1.3 Beratungszuschüsse und Kreditprogramme der KfW

Annähernd 1000 Unternehmen der Steine-und-Erden-Industrie sind KMU, meistens kleinere Ziegelhersteller und Unternehmen aus den weniger energieintensiven Industriezweigen wie Betonstein- und Naturstein-Industrie, Transportbeton etc. Diese Unternehmen können sowohl das geförderte Beratungsprogramm der KfW als auch verschiedene Kreditprogramme der KfW in Anspruch nehmen. Nach ersten Einschätzungen war die Inanspruchnahme dieser Programme durch Unternehmen der Steine u. Erden-Industrie relativ gering.

7.6.2 Weitere Empfehlungen zu Instrumenten

Die hier vorgeschlagenen ergänzenden Maßnahmen basieren auf den Interviews und den Ergebnissen des Workshops sowie auf den genannten Hemmnissen. Hierbei geht es vor allem darum, dem Bündel der beobachteten Hemmnisse durch ein entsprechendes Maßnahmenbündel die hemmende Wirkung simultan und damit wirksam zu nehmen.

7.6.2.1 Informations- und Fortbildungskampagnen

Eine breite ***Informationskampagne über Wirtschaftlichkeitsberechnungen*** würde für große Teile der Steine-und-Erden-Industrie, insbesondere den weniger energieintensiven Branchen, sehr effektiv für mehr Investitionen in Energieeffizienz sein, da die meisten Energieeffizienz-Investitionen sehr lange Lebensdauern (bis zu 25 Jahren) haben (nicht erforderlich für die Zement- und Teile der Kalk-Industrie).

Während bei energieintensiven Prozessen (z. B. in der Zement- und Kalkindustrie) der Energiefluss im Betrieb bereits zu 90-95 % erfasst bzw. kontrolliert wird, ist dies in anderen Branchen deutlich weniger der Fall. Daher sind ***Fortbildungen zur Messtechnik für KMUs*** ausgewählter Branchen oder für die Geschäftsführer zur Sensibilisierung der technischen Spezifikationen bei Ausschreibungen als Hilfe für den Einkauf (z. B. Ziegelindustrie, Natur- und Betonstein-Industrie etc.) anzubieten.

Andere ***Informationskampagnen und wohl vorbereitete Fortbildungsangebote für die Energieverantwortlichen*** in den Betrieben zu Querschnittstechniken wie Druckluft, Kesselanlagen, innerbetriebliche Logistik auf der Basis von Best-Practice-Beispiele zur Energieeffizienz, zur Abwärmenutzung oder CO_2-Reduktion durch Einsatz erneuerbarer Energien in der Steine-und-Erden-Industrie wären sehr wichtig, um die bestehenden Kenntnisdefizite abzubauen. Dabei könnte auch die Organisation über die jeweiligen Branchenverbände zu einem branchenübergreifenden Informationsaustauschs sehr förderlich sein, um die bereits realisierten Problemlösungen von anderen Branchen auf die eigenen Prozessabläufe zu übertragen.

7.6.2.2 Effizienz-Forschungsprogramme der Bundesregierung

Von den befragten Experten der Steine-und-Erden-Industrie wird die bestehende Unterstützung bei der Forschungsförderung über Projekte und die AIF generell als hilfreich empfunden, aber die aufwändigen Anträge und Berichtspflichten für die Unternehmen erscheinen den Interviewten auch als Hemmnis bei neuen technischen Ideen. Die Forschungsprogramme bzw. Forschungspolitik in Deutschland sollten weitergeführt werden, aber zugleich sollte man über Verwaltungsvereinfachungen nachdenken, um

den zeitlichen Aufwand der für die Beantragung und Organisation der Forschungsaktivitäten zu vermindern. Auch wenn aus Sicht öffentlicher Rechnungsprüfung ein transparentes Prüfverfahren notwendig und sinnvoll sei (um Missbrauch zu vermeiden), sollte über ***standardisierte und elektronisch gestützte Formulare*** nach Meinung der befragten Branchenexperten eine zeiteffizientere Form möglich sein.

Ein weiteres Manko wird auch in der begrenzten Auswahl an Branchenexperten gesehen, die zur Begutachtung von Förderanträgen herangezogen werden können. So bestehe aufgrund der auf wenige Unternehmen konzentrierten Branche die Gefahr, dass die herangezogenen Gutachter sich entweder einem Wettbewerber verpflichtet fühlen oder nicht tief genug in der Branche zuhause sind und daher nur über relativ geringes Fachwissen der Branche verfügen. Dieses Dilemma bei der Begutachtung von Forschungsanträgen könnte durch verstärktes ***Hinzuziehen von ausländischen Gutachtern und Branchenexperten abgeschwächt werden.***

Selbstverpflichtungen und insbesondere Vorgaben technischer Standards auf nationaler oder EU-Basis sind nach Meinung der Gesprächspartner für die Innovation sehr wichtig. Fehlen diese, würden Innovationen von den Kunden eher als unnötige Kosten angesehen, solange nicht unmittelbare finanzielle Vorteile erzielt werden könnten.

7.6.2.3 Investitionen und finanzielle Anreize

Generell könnte die Einführung von effizienten Technologien durch finanzielle Anreize für Effizienz-Investitionen beschleunigt werden (z. B. ***Steuervergünstigungen bei Investitionen für Abwärmenutzung von Dritten***, Bürgschaften oder die ***Einführung eines Versicherungsproduktes zur Risikobegrenzung*** von Contracting-Projekten).

Anlässlich der Gewährung derartiger finanzieller Anreize könnte die ***Darlegung der Rentabilität und Lebenszykluskosten des geplanten Projektes (nicht nur des Risikos) ein Förderanforderung*** sein.

7.6.2.4 EU-Emissionshandel

Aus Sicht der Zementindustrie besteht ein Problem darin, dass die Zertifikatszuteilung sich nicht an der Marktnachfrage nach Zement orientiert, dessen regionale Produktion wenig flexibel ist. Die örtlich ungebundene Nachfrage nach Zertifikaten führe zu hohen Einflüssen auf die Zementpreisbildung und verunsichere Produzenten und Kunden. Müssten die Kunden für die Verwendung von Zement einen ***festen CO_2-Zuschlag*** zahlen, würde dies für die Zementproduzenten im Gegensatz zu den aktuellen Regelun-

gen keine Wettbewerbsverzerrung darstellen, da es nicht von Relevanz wäre, wo der Zement hergestellt wird.

Schließlich äußerten die Gesprächspartner den Wunsch, dass ***zukünftige Klimapolitik möglichst bald auf globaler Ebene einheitlich (globaler Emissionshandel) stattfinden*** müsse, um einerseits keine Wettbewerbsverzerrungen herbeizuführen und andererseits die CO_2-Emissionen weltweit zu mindern. ***Klare und langfristige Rahmenbedingungen seien zentral wichtig für die Verbreitung klimafreundlicher, hocheffizienter Technologien.***

7.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Steine-und-Erden-Industrie zählt zu den energieintensiven Branchen in Deutschland und zeichnet sich in allen hier behandelten Subbranchen durch einen hohen thermischen Energiebedarf und im Vergleich dazu einen relativ geringen Strombedarf aus. Die Unternehmen achten nach eigenen Aussagen schon seit vielen Jahren allein aufgrund der hohen Energiekosten auf den Einsatz energieeffizienter Technologie. Bei allen Subbranchen bestehen zahlreiche unterschiedliche Effizienzoptionen, die zu einem unterschiedlichen Anteil zur Gesamtoptimierung der entsprechenden Produktionsanlagen beitragen können und meist zu einem Teil auch bereits realisiert sind (siehe Kapitel 7.3). Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen, die hier in allen Bereichen der Fall sind, stellt die bessere Abwärmenutzung generell eine wichtige Effizienzoption dar.

Große Anteile der CO_2-Emissionen sind rohstoffbedingt bei Zement und Kalk, sodass es großer Anstrengungen bedarf diese noch weiter zu reduzieren. Aufgrund des gesättigten bzw. schrumpfenden Zementmarktes in Deutschland benötigt z. B. die Zementindustrie keine Neuanlagen in Deutschland.

Bei Innovationen in der Steine-und-Erden-Industrie handelt es sich generell eher um inkrementelle Innovationen. Ein „break-through“ zeichnet sich nach übereinstimmenden Aussagen von Branchenexperten nicht ab: ***„Es gibt keine revolutionären Sprünge, radikale Prozess-Innovationen sind sehr schwierig“,*** resümiert ein Interviewpartner. Dennoch wird im Technischen Szenario durch die betrachteten Effizienzoptionen und deren Diffusionsraten eine Reduktion des Strombedarfs um 14 % im Jahr 2035 und eine Reduktion des Brennstoff-Energiebedarfes um 19 % gegenüber dem Frozen-Efficiency-Szenario erreicht (siehe Tabelle 7-11). Die CO_2-Emissionen werden für diesen Fall durch weitere Brennstoff-Substitutionen um 25 % verringert. Nachfolgend sind nur die wesentlichen Effizienzmaßnahmen bzw. Maßnahmenbündel der Subbranchen der

Steine-und-Erden-Industrie aufgeführt, die im Rahmen dieser Studie als besonders essentiell identifiziert worden sind:

Zementindustrie

Ziel der Forschungsbestrebungen innerhalb der Zementindustrie ist es nach Industrieaussagen, neue Wege der Zementherstellung zu beschreiten bzw. den eigentlichen ZementHerstellungsprozess noch besser zu verstehen. Die Produktforschung an ***Hochleistungs- und Spezialzementen*** (low-carbon cements, Mehrkomponentenzemente, usw.), die auf neuen (u. U. CO_2-ärmeren) Ausgangsstoffen basieren oder den Klinkeranteil im Zement durch einen größeren Anteil an Zumahlstoffen reduzieren, kann möglicherweise große Potenziale bezüglich der thermischen Energieeffizienz oder der Reduktion von CO_2-Emissionen erschließen. Es bleibt jedoch abzuwarten inwieweit und zu welchen Rahmenbedingungen diese Zementsorten tatsächlich im großindustriellen Maßstab hergestellt werden können. In 15 bis 25 Jahren werden diese Zementsorten sicherlich einen gewissen Anteil am Zementmarkt ausmachen. Daher wird durch den Marktgang dieser neuen Zementarten sowie einer noch effizienteren Abwärmenutzung der größte Effizienzsprung auf Seiten der thermischen Energie und der CO_2-Emissionsreduktion erzielt.

Allerdings bleibt die zukünftige Akzeptanz dieser neuen Zementsorten bei den Investoren noch völlig ungewiss. Insgesamt trägt der Prozessschritt Klinkerbrennen (Trockenverfahren + Halbtrocken-Verfahren) im Jahr 2035 mit 35 % zur Effizienzsteigerung auf thermischer Seite und mit 52 % bei der CO_2-Emissionsbilanz bei (siehe Tabelle 7-12).

Weitere Effizienzoptionen liegen auch im Bereich der ***noch besseren Abwärmenutzung***, da beim Klinkerbrennen und beim Kühlprozess große noch ungenutzte Wärmemengen anfallen. Auf den elektrischen Energiebedarf bezogen werden die größten Potenziale im Bereich der Mahltechnologie (Energie-Effizienzpotenzial: 25 %) und der effizienteren Querschnittstechnologien gesehen (siehe Tabelle 7-12). Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Mahltechnologie einen deutlichen Einfluss auf die Produktqualität besitzt und nicht in allen Bereichen und bei allen Zementarten konventionelle Technologie durch neue Konzepte ohne Qualitätsverlust ersetzt werden kann. Effizienzpotenziale liegen in der Kombination von konventioneller und innovativer Technik.

Kalkindustrie

Bei der Kalkherstellung handelt es sich um eine relativ unkomplizierte und altbewährte Technik. Auf thermischer Seite spielt in der Kalkindustrie die effiziente ***Abwärmenutzung*** ebenfalls eine wichtige Effizienzoption, da der Prozessschritt Kalkbrennen bei der

Kalkproduktion einen großen Energiebedarf aufweist (siehe Tabelle 7-12). Der Energiebedarf dieses Prozessschrittes kann auch durch die Optimierung der Verbrennungsführung (z. B. durch wärme- und strömungstechnische Simulationen, Zusammenspiel von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Ofenkonstruktion etc.) deutlich reduziert werden.

Ähnlich wie bei der Zementindustrie bestehen auf der elektrischen Energiebedarfsseite relativ große Effizienzoptionen im Bereich der Mahltechnologie (siehe Tabelle 7-12).

Ziegelindustrie

Die energieeffiziente Optimierung einer Ziegelei mit Hilfe des Verbundes von Tunnelofen-Trockner-Kühlzone weist große Effizienzpotenziale auf Seiten des thermischen Energiebedarfes auf (30 %), da unter anderem der zweite wesentliche Wärmeverbraucher, der Trockner, mit der Abwärme des Tunnelofens betrieben werden kann (siehe Tabelle 7-12). Die anfallende Abwärme des Ofens kann generell z. B. zur Trocknung der feuchten Rohlinge, der Verbrennungs- oder Gutvorwärmung genutzt werden. Eine Optimierung der Kühlzone mit Rückführung der anfallenden Abwärme kann im Vergleich zu einer konventionellen Anlage zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führen. Weitere deutliche Effizienzoptionen bestehen in der Erfassung und Anpassung der Betriebsparameter der Ziegelei an den tatsächlichen Betriebszustand.

Abschließend sei in diesem Zusammenhang allen Betrieben der Steine-und-Erden-Industrie – insbesondere den Unternehmen aus dem KMU-Bereich – die Einführung bzw. Nutzung eines Energiemanagementsystems ans Herz gelegt, was häufig erst das Erkennen und die Realisierung von noch ungenutzten Effizienzpotenzialen ermöglicht (siehe Tabelle 7-12).

7.8 Literatur

ABB Technik (2/2007): Energieoptimierung in der Zementherstellung. Sonderdruck aus der ABB Technik

Bender, W. (1997): Entwicklungen und Tendenzen beim Bau von Dachziegelwerken – Teil 2. In: Ziegelindustrie International Nr. 9., S. 562-571, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin

BDZ (2005): Zement-Jahresbericht 2004-2005, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.

BDZ (2009a): Berlin BDZ (2009a): Zahlen und Daten – Unternehmen, Werke, Umsatz, Beschäftigte. Online verfügbar unter: http://www.vdzement.de/1255.html. Stand: 04.12.2012.

BDZ (2009b): Presseinformation vom 4. Mai 2009, Berlin, Bundesverband der deutschen Zementindustrie, http://www.bdzement.de/811.html?&tx_ttnews[tt_news]=762&tx_ttnews[backPid]=1162&cHash=8e863e8196

BDZ (2010): Prozess- und Produktinnovationen. BDZ – Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V., online unter: http://www.bdzement.de/235.html

Bender, W. (1998): Moderner Schnellbrand – Ultima ratio der Brenntechnik. In: Ziegelindustrie International, Nr. 9, S. 553-569, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin

Bender, W.; Händle, F. (1982): Handbuch für die Ziegelindustrie. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin

Betonprisma (2008): Energieeffizienz ist ein Motor für Innovationen. Betonprisma 88 – Energie, online unter: http://www.betonprisma.de/ausgaben/betonprisma-88-energie.html

BV Kalk (2010a): Der Bundesverband der deutschen Kalkindustrie. Online verfügbar unter: http://www.kalk.de/10.html 4.12.2012

BV Kalk (2010b): Gewinnung – Wie Kalk abgebaut und verarbeitet wird. Online verfügbar unter: http://www.kalk.de/15.html 4.12.2012

BV Kalk (2010c): Verarbeitung – Der Weg ins Kalkwerk. Online verfügbar unter: http://www.kalk.de/168.html 4.12.2012

BV Kalk (2010d): Abbau – Das Bergen des Schatzes. Online verfügbar unter: http://www.kalk.de/39.html 4.12.2012

BV Kalk (2010e): Brennen – Aus Kalkstein wird Kalk. Online verfügbar unter: http://www.kalk.de/36.html 4.12.2012

Clauss, U. (1997): Möglichkeiten und Grenzen im Hinblick auf den Schnellbrand von Produkten der Baukeramik. In: Ziegelindustrie International, Nr. 5, S. 246-253, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin

CSI/ecra (2009): Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead. CSI/ECRA-Technology Papers, Juni 2009

Destatis (2010): Produzierendes Gewerbe – Konzentrationsstatistische Daten für das Verarbeitende Gewerbe, den Bergbau und die Gewinnung von Steinen und Erden sowie für das Baugewerbe 2007/2008. Fachserie 4 Reihe 4.2.3.

Gewerbe, den Bergbau und die Gewinnung von Steinen und Erden sowie für das Baugewerbe 2007/2008. Fachserie 4 Reihe 4.2.3.

Ellerbrock, H. G.; Mathiak, H. (1994): Zerkleinerungstechnik und Energiewirtschaft. Zement-Kalk-Gips 47/1994, S. 524-534

European Clay Brick and Roof Tile Industry (1998): Draft Reference Document on best available techniques in the Clay Brick and Roof Tile Industry. Brüssel

BREF (2009): Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufactoring Industries. European Commission, May 2009

BREF (2010): Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufactoring Industries. European Commission, May 2010

Ferber, C. (1996): Möglichkeiten und Grenzen beim Schnellbrand keramischer Massen. In: Ceramic Forum International, Nr. 9, S. 489-491, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin

Fischli, U., Bertozzi, L., Marthy, M. und Tuffli, A. (1992): Materialien zu RAVEL – Elektrizitätsbedarf der Zementindustrie. Bundesamt für Konjunkturfragen (BfE)

Flender (2005): Giganten in Bewegung – Fördern und befördern, mahlen und brechen. A. Friedr. Flender AG

Fraschini, G. (1992): Kraft-Wärme-Kopplung – eine rationelle Alternative für die Ziegelindustrie. ZI Nr. 11/1992

Gebr. Pfeifer AG (2010): Kompetenz in Kalk. Online verfügbar unter: http://www.gpse.de/fileadmin/PDF/Broschueren/deutsch/Kompetenz_in_Kalk.pdf, 4.12.2012

Gubler, C. und Wurche, J.-P. (2006): Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion. Zwischenbericht vom 31.8.2006, BFE-Projekt

Hanstein, T. (2001): Beitrag zur Erhöhung der Standzeit der Arbeitsorgane von Gutbett-Walzenmühlen. Dissertation, Freiberg

Heukschel, H.; Muche, K. (1974): ABC Keramik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

IEA/WBCSD (2009): Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emissions reductions up to 2050.

IG BCE (2009): Brancheninfo Keramikindustrie – Kalkindustrie. Informationen der IG BCE Industriegruppen, Abteilung Wirtschaftspolitik und Industriegruppen, 14/2009

Industrie-Kultur (2007): Moderne Zementindustrie: Energiebedarf seit 1950 mehr als halbiert, Magazin für Denkmalpflege, Landschaft, Sozial-, Umwelt- und Technikgeschichte, online unter: http://www.industrie-kultur.de/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=60

IV Salzburg (2009): LEUBE investiert 30 Mio. Euro in Reduktion von Energieverbrauch und Schadstoffemissionen. Online unter: http://www.iv-salzburg.at/b495

KIT (2009a): Grüner Zement – Neues Herstellungsverfahren verspricht Energieeffizienz und trägt zum Klimaschutz bei. Presseinformation Nr. 143, Karlsruher Insitut für Technologie

KIT (2009b): Neuer Zement schont Klima und Ressourcen – Partner unterzeichnen Gründungsvertrag für Celitement GmbH – Pilotanlage entsteht am KIT. Presseinformation Nr. 014/2009, Karlsruher Insitut für Technologie

Krause, E.; Berger, I.; Nehlert, F.; Wiegemann, J. (1985): Technologie der Keramik Band II – Mechanische Prozesse. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin

Löckener, R.; Timmer, B. (2002): Nachhaltigkeit und Zementindustrie – Dokumentation von Beiträgen und Handlungsoptionen. Herausgegeben von der Sozialpolitischen Arbeitsgemeinschaft der deutschen Zementindustrie, der Industriegewerkschaft Bauen-Agrar-Umwelt, sowie der Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie, Düsseldorf, Verlag Bau und Technik

McKinsey&Company (2008): Abschlussbericht – Änderungen der europäischen Richtlinie zum Emissionshandel: Auswirkungen auf die deutsche Zementindustrie. Düsseldorf

Münzer, T. und Leis. U. (1997): Rationelle Stromanwendungen in der Ziegelindustrie.

Rentz, O.; Schmittinger, A.; Jochum, R.; Schultmann, F. (2001): Exemplarische Untersuchung der praktischen Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Keramischen Industrie unter Beachtung der IVU-Richtlinie und der Erstellung von BVT-Merkblättern. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsprojekt 298 94 313/07, im Auftrag des Umweltbundesamts

RWI (2009): Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2008. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung

Statistisches Bundesamt (2009): Erhebung über die Energieverwendung. Energieverbrauch nach Energieträgern. Berichtszeitraum 2007 (und frühere Jahre) sowie Stromerzeugungsanlagen 2007 (und frühere Jahre) der Betriebe im Bergbau und Verarbeitenden Bergbau. Brennstoffeinsatz für die Strom- und/oder Wärmeerzeugung nach Energieträgern. Wiesbaden

Tönsing, E. (1996): Energiekostenreduzierung durch betriebliches Energiemanagement, Fachartikel im Rahmen der Initiative „Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Strom“. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg

Umweltbundesamt (2001): Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Industries. Integrates Pollution Prevention and Control (IPCC)

Umweltbundesamt (2008): Impacts oft the EU Emissions Trading Scheme on the industrial competitiveness in Germany. Climate Change 10/08

Umweltbundesamt Österreich (2007): Stand der Technik zur Kalk-, Gips- und Magnesiaherstellung – Beschreibung von Anlagen in Österreich. Report REP-0128

Verein Deutscher Ingenieure (1993): Emissionsminderung Keramische Industrie. VDI-Richtlinie 2585, VDI-Verlag, Düsseldorf

Vereinigung der österreichischen Zementindustrie (2009a): 1. Preis für Zement – Forschung zur CO_2-Reduktion. VÖZ-Pressemitteilung (15.12.2009)

Vereinigung der österreichischen Zementindustrie (2009b) Österreichische Zementindustrie – Jahresbilanz 2008 und Ausblick. VÖZ-Pressemitteilung

VDZ (2009a): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2008. Düsseldorf, Verein deutscher Zementwerke e.V.

VDZ (2009b): Verfahrenstechnik der Zementherstellung. VDZ-Tätigkeitsbericht 2007-2009, S. 1-29, Düsseldorf, Verein deutscher Zementwerke e.V.

VDZ (2008a): Zement-Taschenbuch. Düsseldorf, Verein deutscher Zementwerke e.V.

VDZ (2008b): Tätigkeitsbericht 2005-2007. Düsseldorf, Verein deutscher Zementwerke e.V.

VDZ (2008c): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2008. Verein deutscher Zementwerke e.V. Online verfügbar unter: http://www.vdz-online.de/umweltdaten.html, 4.12.2012

VDZ (1997): Beton – Hart im Nehmen – Stark in der Leistung – Fair zur Umwelt.

VÖZ (2010): Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie. Allplan Gmbh, VDZ

Wecobis (2009): Ökologisches Baustoffinformationssystem. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, online unter: http://www.wecobis.de/jahia/Jahia/cache/offonce/Home/Grundstoffe/Bindemittel_GS/Mineralische_Bindemittel_GS/Zement_GS;jsessionid=380082C199BACA8332730337175A14AF

WBSCD/IEA (2009): Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emission reduction up to 2050. World Business Council for Sustainable Development, International Energy Agency

Worrell, E.; Galitsky, C. (2004): Energy Efficiency Improvements for Cement Making – An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-54036

ZKG (2009): Trends bei Prozessfiltern in der Zementindustrie. Zement-Kalk-Gips International. Nr. 9, online unter: http://www.zkg-online.info/de/artikel/zkg_2009-09_Trends_bei_Prozessfiltern_in_der_Zementindustrie_307746.html

Ziegel (2010): Ziegelindustrie: Deutscher Markt weiter auf dramatischer Talfahrt. Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., online unter: http://ziegel.de/index.php?src=presse&ID=91373&Position=0 (21.11.2012)

Ziegelindustrie International (2002): Energiebedarf zur Ziegelherstellung. ZI 4/2002

Ziegelindustrie International (2009): 11.12.2009 News: VDMA – Auch bei Keramikmaschinen spielen Energie- und Kosteneffizienz eine immer größere Rolle. Online unter: http://www.zi-online.info/de (21.11.2012)

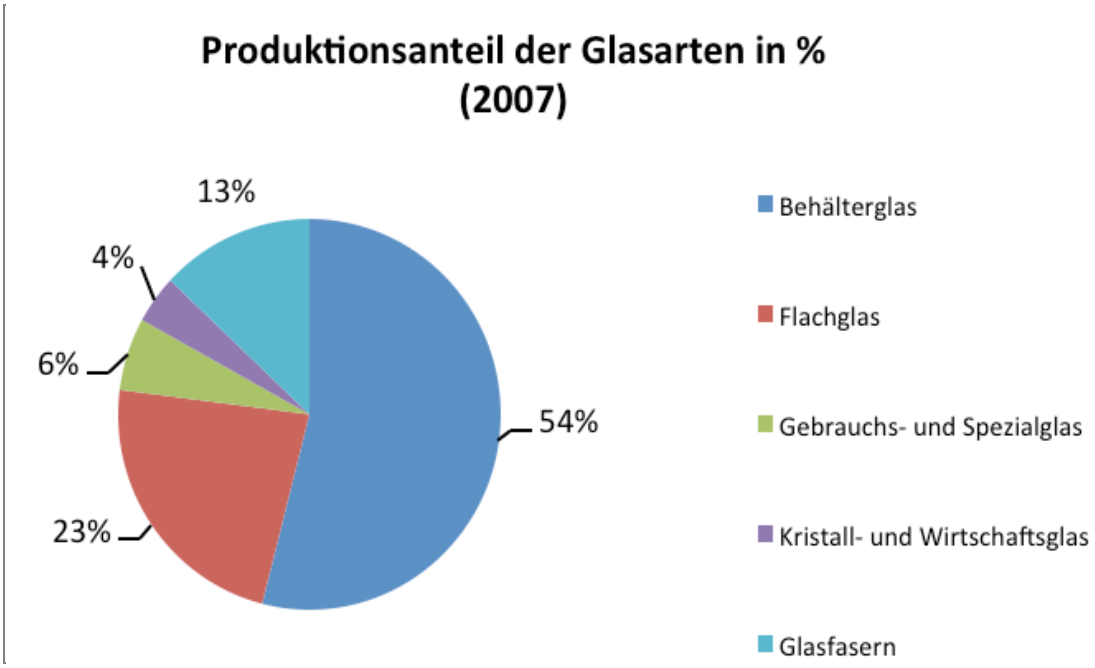
8 Glas und Keramik

F. Toro, E. Jochem (IREES)

8.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse

Die Glas- und Keramikindustrie ist wegen ihrer Produktvielfalt und den dabei eingesetzten unterschiedlichen Produktionsverfahren sehr heterogen. Innerhalb der Glasproduktion entfällt mit 59 % der größte Produktionsmengenanteil auf das Hohlglas (Behälterglas, Kristall- und Wirtschaftsglas), gefolgt vom Flachglas mit einem Anteil von 23 %. Sonstiges Glas, worunter Mineralfasern sowie Gebrauchs- und Spezialglas fallen, hat einen Anteil von 18 % an der Gesamtproduktion (vgl. Abbildung 8-1). Während das Behälterglas zwar mengenmäßig die Produktion dominiert, ist sein Anteil an der Wertschöpfung mit 19 % eher gering. Die höchste Wertschöpfung wird demgegenüber bei der Veredlung von Flachglas erzielt (vgl. Abbildung 8-2).

Abbildung 8-1: Produktionsanteile der unterschiedlichen Glasarten in Deutschland 2007, gemessen in Tonnen

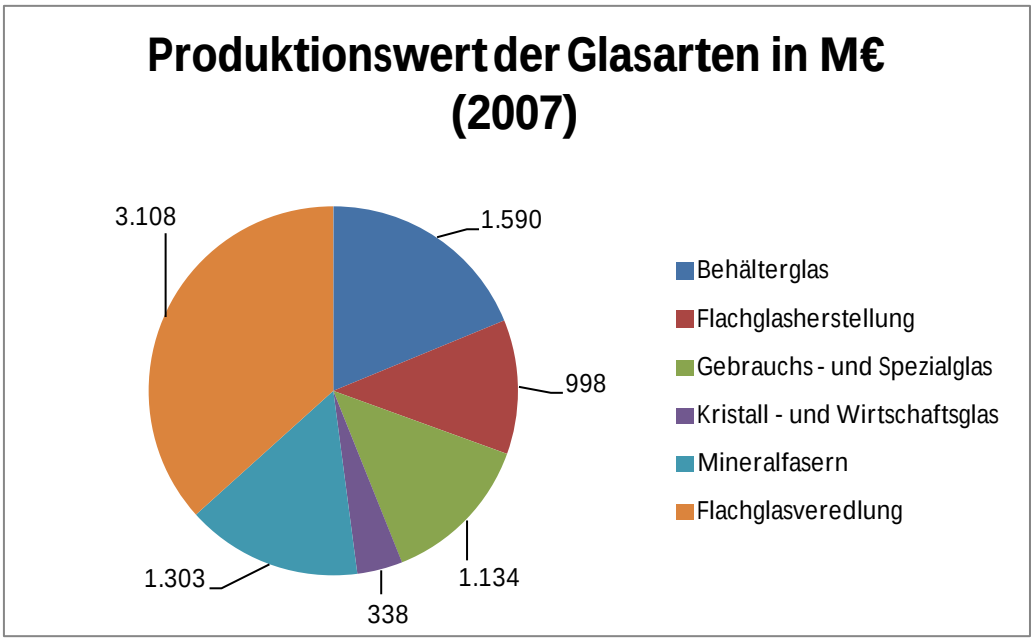


Quelle: BV Glas 2009

In der Glas- und Keramikindustrie waren im Jahr 2007 knapp 90.000 Personen in 512 Unternehmen beschäftigt. Mit 174 Beschäftigten pro Unternehmen liegt die Branche damit etwa im Durchschnitt der Industrie in Deutschland. Ihr Anteil am gesamten Endenergiebedarf der Industrie in Deutschland liegt bei knapp 4 % (Tabelle 8-1). Mit einer durchschnittlichen Energieintensität von 5,8 MJ/€ Bruttoproduktionswert liegt die Bran-

che, nach dem Ernährungsgewerbe, am unteren Rand der in dieser Studie untersuchten energieintensiven Industriezweige. Etwa 80 % des gesamten Endenergiebedarfs von 92,5 PJ im Jahr 2007 entfielen dabei auf die Brennstoffe (inkl. Fernwärme), rund 20 % auf den Strom (vgl. Tabelle 8-1).

Abbildung 8-2: Bruttoproduktionswert der Glasarten in Deutschland, 2007



Quelle: BV Glas 2009

Der Energiekostenanteil am Bruttoproduktionswert ist je nach Produkt unterschiedlich. Mit rund 12 % ist er beim Hohlglas mit am höchsten. Bei Flachglas und Keramik liegt der Anteil der Energiekosten demgegenüber nur bei rund 5 % (Statisches Bundesamt 2009a). Im Durchschnitt liegt der Energiekostenanteil im Bereich Glas bei 8,2 % bzw. 6,7 % im Bereich der Feinkeramik (Tabelle 8-1). ***Behälterglas*** findet hauptsächlich in der Getränkeindustrie (67 %), in der Nahrungsmittelindustrie (25 %) sowie in der kosmetischen und pharmazeutischen Industrie Verwendung. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Getränkeflaschen oder um Verpackungsgläser. Die Behälterglasindustrie ist somit in den Bereich der Verpackungsindustrie einzuordnen und steht in direkter Konkurrenz zu alternativen Verpackungsmaterialien, wie beispielsweise Aluminium, Weißblech, PET oder Verbundmaterialien.

Nahezu die gesamte ***Flachglasproduktion*** findet ihren Absatz in der Bau- und Automobilbranche, weshalb dieser Teilsektor auf konjunkturelle Schwankungen besonders sensibel reagiert. Im Gegensatz zu Behälterglas wird Flachglas in nur wenigen großen Anlagen hergestellt. Der Handel und die Produktion von Flachglas erstrecken sich

weltweit und werden von fünf global operierenden Konzernen dominiert. Im Behälterglas- und Glasfasersektor ist eine vergleichbare Firmenkonzentration und internationale Ausrichtung zu erkennen.

Der Subsektor ***Mineralfasern*** stellt Glas- und Steinwolle zur Wärmedämmung im Baubereich und textile Glasfasern u. a. für die Textilindustrie und die Kunststoffindustrie her. Die Produktion von Mineralfasern wird wie im Flachglassektor von einigen wenigen international agierenden Konzernen dominiert.

Im Bereich ***Gebrauchs- und Spezialglas*** wird eine Vielfalt an Produkten mit einem relativ hohen Produktionswert hergestellt. Die wichtigsten Produkte sind Lampen und Leuchtstoffröhren, Laborglas, Glas für Photovoltaik- und solarthermische Anlagen, keramisches Glas, hochtemperaturfeste Wirtschaftsglaswaren und Glas für LCD-Anzeigen. ***Wirtschaftsglas*** ist einer der kleineren Subsektoren der Glasindustrie und unterscheidet sich aufgrund seiner hohen Qualität von den Produkten aus der Behälterglasindustrie. Dieser Sektor umfasst Konsumgüter wie Tischgeschirr, Vasen, Trinkgläser und dekorative Glaswaren. Wirtschaftsglas wird von vielen kleineren Unternehmen produziert, die sich auf Marktnischen spezialisiert haben.

Herstellung von Keramik

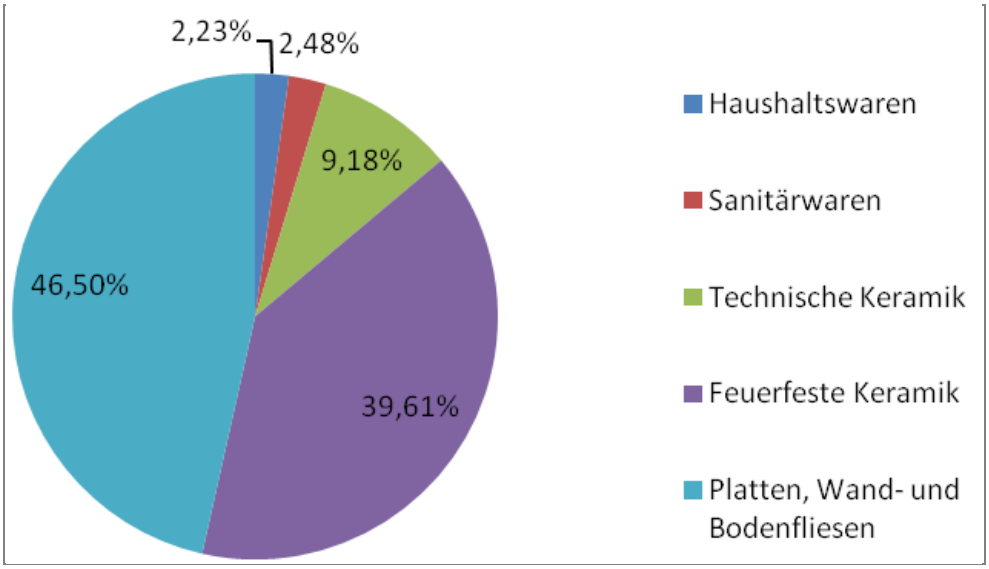
Innerhalb der Keramikproduktion in Deutschland 2007 entfällt mit 46,5 % der größte Anteil produzierter Güter auf ***Platten, Wand- und Bodenfliesen***, gefolgt von ***feuerfester Keramik*** mit einem Anteil von 39,6 % und ***technischer Keramik*** mit 9,2 %. Die verbleibenden Industriezweige Haushaltswaren und Sanitärwaren haben einen Anteil von jeweils ca. 2 %. (vgl. Abbildung 8-3).

Die Herstellung von Keramik zeichnet sich durch einen hohen spezifischen thermischen Energieaufwand aus, der mit 8,1 GJ/t nur wenig unter dem der Glasherstellung liegt (vgl. Tabelle 8-1). Auch die Keramikindustrie hat ihren Schwerpunkt des Energiebedarfs bei den Brennstoffen, insbesondere dem Erdgas.

Seit Mitte der 1990er Jahre hat sich der spezifische Endenergiebedarf der Glasindustrie nur wenig verändert. Er ist von 9,7 GJ/t im Jahr 1995 auf 9,3 GJ/t im Jahr 2007 kaum gesunken (vgl. Abbildung 8-4)[70]. Der Anstieg beim absoluten Energieverbrauch in der ***Flachglasindustrie*** ist überwiegend auf den Neubau von weiteren Flachglaswannen in den letzten Jahren zurückzuführen. Dies kann in der Anfangszeit des Betriebs zu einem höheren spezifischen Brennstoffbedarf führen („Anfahreffekte“). Auf der

70 Der Sprung zwischen 2002 und 2003 könnte auf die Umstellung der Energieverbrauchsstatistik zurückzuführen sein.

Abbildung 8-3: Produktionsanteile der Keramikarten in Deutschland, 2007 (in Tonnen)



Quelle: Statistisches Bundesamt, Fachserie 4, Reihe 3.1, Jahr 2009

Tabelle 8-1: Bruttoproduktionswert, Produktion, Endenergieverbrauch, spezifischer Energiebedarf in GJ/t und Energieintensität MJ/€ der Glas- und Keramikindustrie, 2007

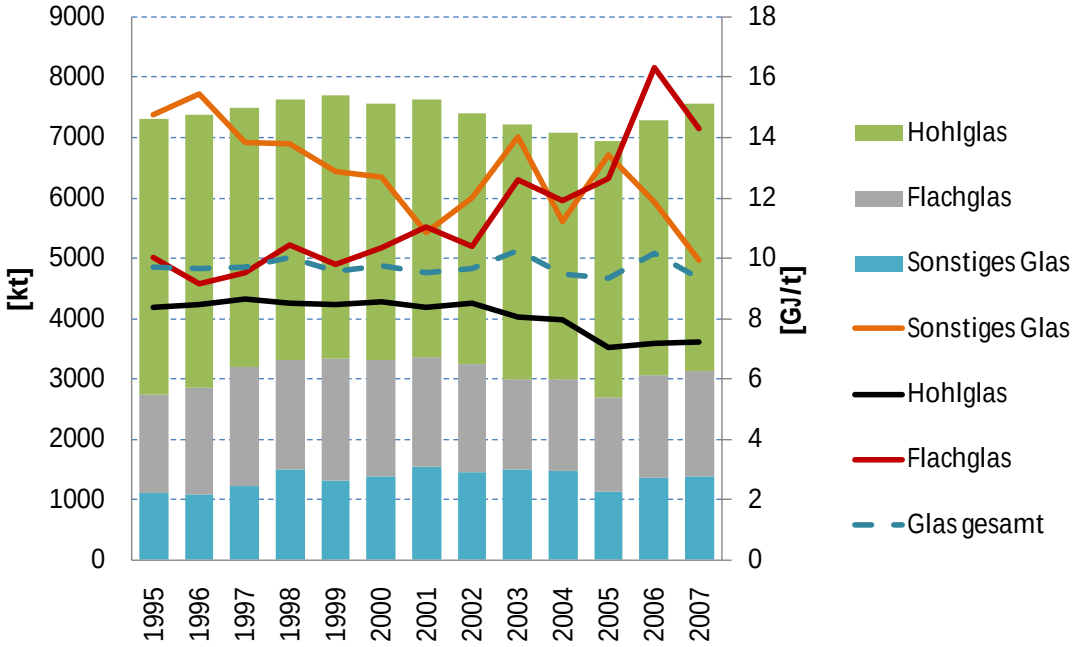
Jahr: 2007				Energieverbrauch			Energieintensität			Energieintensität II		
		Bruttowert-schöpfung (real)	*Pro-duktion*	*Brenn-stoffe (inkl. FW)*	*Strom*	*End-energie gesamt*	*Brenn-stoffe (inkl. FW)*	*Strom*	*End-energie gesamt*	*Brenn-stoffe (inkl. FW)*	*Strom*	*End-energie gesamt*
Branche/ Prozess	**Nr. WZ-2003**	**Mrd. €**	**t**	**TJ**	**TJ**	**TJ**	**GJ/t**	**GJ/t**	**GJ/t**	**MJ/€**	**MJ/€**	**MJ/€**
Glasindustrie	***26.1***	***3,73***	***7.559.000***	***54.389,6***	***15.983,4***	***70.372,9***	***7,2***	***2,1***	***9,3***	***14,6***	***4,3***	***18,9***
Flachglas	26.12	1,50	1.745.700	19.071,8	5.788,3	24.860,1	10,9	3,3	14,2	12,7	3,8	16,5
Hohlglas	26.13	1,01	4.421.800	25.541,4	6.226,9	31.768,2	5,8	1,4	7,2	25,2	6,1	31,3
Glasfasern	26.14	0,36	944.500	4.644,3	1.711,0	6.355,3	4,9	1,8	6,7	12,8	4,7	17,5
Sonstiges Glas	26.15	0,85	447.000	5.132,2	2.257,2	7.389,3	11,5	5,0	16,5	6,0	2,7	8,7
Keramikindustrie	***26.2, 26.3***	***2,93***	***2.720.037***	***18.691,7***	***3.434,9***	***22.126,6***	***6,9***	***1,3***	***8,1***	***6,4***	***1,2***	***7,6***
Haushaltswaren	26,21	0,62	56.368	1.761,0	343,2	2.104,2	31,2	6,1	37,3	2,8	0,6	3,4
Sanitärwaren	26,22	0,00	63.954	1.134,2	232,6	1.366,8	17,7	3,6	21,4	0,0	0,0	0,0
Technische Keramik & Sonstige	26.23, .24,.25	0,86	238.185	2.879,8	768,6	3.648,4	12,1	3,2	15,3	3,3	0,9	4,2
Feuerfeste Keramik	26,26	0,99	1.094.021	6.062,5	1.050,3	7.112,9	5,5	1,0	6,5	6,1	1,1	7,2
Platten, Wand- und Bodenfliesen	26,3	0,45	1.267.509	6.854,1	1.040,2	7.894,3	5,4	0,8	6,2	15,1	2,3	17,4

Quellen: Statistisches Bundesamt 2009a, 2009b;AGEB 2009; eigene Schätzungen

anderen Seite stellt die Flachglasindustrie zumehmend höherwertige, energiesparende Produkte wie Wärmeschutzverglasung, Sonnenschutzgläser und Multifunktionsgläser her, die ihrerseits zu einem höheren spezifischen Energiebedarf wegen der längeren Verweilzeiten in den Glaswannen führen. Darüber hinaus haben auch die so genannten ***Online-Beschichtungen*** zugenommen, wodurch der spezifische Energiebedarf zusätzlich ansteigt.

Während beim ***Hohlglas*** ein spezifischer Verbrauchsrückgang von rd. 8,5 GJ/t seit 2002 auf heute gut 7 GJ/t zu verzeichnen war, stieg der spezifische Energieverbrauch pro Tonne beim ***Flachglas*** aus den o. g. Gründen erheblich an. Innerhalb der Brennstoffe dominiert in der Glas- und Keramikindustrie der Erdgaseinsatz infolge der meist unmittelbaren Befeuerung von Wannen und Öfen mit fast 85 % des gesamten Brennstoffverbrauchs in 2007 (Statistisches Bundesamt 2009b).

Abbildung 8-4: Entwicklung der Produktion (Balkendiagramm in 1000 t) und des spezifischen Energiebedarfs (Linien) in der Glasindustrie, 1995-2007



Quellen: BV Glas 2009; Statistisches Bundesamt 2009b; Berechnungen Fraunhofer ISI

8.1.1 Auswahl der Prozesse

Aufgrund der statistischen Datenverfügbarkeit und der unterschiedlichen Energieintensität wird die Glasindustrie (WZ 26.1) in dieser Untersuchung in folgende Prozesse bzw. Glassorten unterteilt:

- Flachglas (WZ 26.11, WZ 26.12),
- Hohlglas (WZ 26.13),
- Glasfasern (WZ 26.14) und
- Sonstiges Glas (Gebrauchs- und Spezialglas) (26.15).

Wie im Bereich der Glasproduktion, so legen die statistische Datenverfügbarkeit in der Keramikindustrie (WZ 26.2, 26.3) und unterschiedliche Energieintensitäten in den Produktgruppen die Unterteilung in die folgenden Prozesse bzw. Produktgruppen nahe:

- Haushaltswaren (WZ 26.21),
- Sanitärwaren (WZ 26.22),
- Technische Keramik und Sonstige (WZ 26.23, WZ 26.24, WZ 26.25),
- Feuerfeste Keramik (WZ 26.26) und
- Platten, Wand- und Bodenfliesen (WZ 26.3)

In der Glasherstellung ist die Glasschmelze der energiebedeutendste Prozess mit 75 % bis 80 % des gesamten Energieeinsatzes. Die spezifischen Strom- und Brennstoffbedarfswerte variieren für die einzelnen Glassorten (vgl. Tabelle 8-2); die Werte spiegeln die Situation in einer typischen Anlage wider. Die typischen jährlichen Produktionen pro Anlage für Float/Flachglas sind ca. 200.000 t/a, für Behälterglas: 100.000 t/a und für Glasfasern zwischen 10.000 und 20.000 t/a.

Tabelle 8-2: Typischer spezifischer Energiebedarf (Strom und Brennstoffe) nach Produktart des Glases, 2009

Produkt	Teilprozess	Strom [GJ/t]	Brennstoffe [GJ/t]	Gesamt [GJ/t]
Behälterglas		1.4	5.8	7.2
	Schmelze	0.5	4.9	5.4
	Sonstige	0.9	0.9	1.8
Flachglas		3.3	10.9	14.2
	Schmelze	0.7	10.7	11.4
	Sonstige	2.6	0.2	2.8
Glasfasern		1.8	4.9	6.7
	Schmelze	0.6	4.8	5.4
	Sonstige	1.2	0.1	1.3
Sonstiges Glas		5.0	11.5	16.5
	Schmelze	2.0	11.2	13.2
	Sonstige	3.0	0.3	3.3

Quelle: Experten Interviews 2010

Unter „sonstige Teilprozesse“ zählen Prozesse wie Gemengebereitung, Mischen, Formgebung, Entspannen, Verpackung, d. h. meist strombetriebene Prozesse. Demnach haben die Flachglasherstellung und die sonstigen Spezialglasarten mit 14 bzw. 16 GJ/t einen doppelt so hohen spezifischen Energiebedarf wie Hohlglas und Glasfaser (gut 7 GJ/t).

Laut BVT-Merkblatt für die Glasindustrie (http://www.bvt.umweltbundesamt.de/sevilla/kurzue.htm) und Experteninterviews ist 4 GJ/t Glas für den reinen Schmelzprozess ein unterer Durchschnitt. Dieser Wert hängt allerdings von der Auslastung der Schmelzanlage ab, je nach der gerade zu produzierenden Produktart (insbesondere der Qualität, gemessen an der Anzahl und Größe der Luftbläschen), Gewicht und Taktzahl für die

Maschine. Es kommt hinzu: der verfügbare Anteil an Scherben und auch das Alter der Anlage. Bei pharmazeutischen Glasverpackungen kann der Wert bei 7 GJ/t Glas liegen. Weil die spezifische Belastung der Wanne wegen der Qualitätsanforderungen (höhere Temperaturen) deutlich gesenkt werden muss (Quelle: Interviews 2010).

Tabelle 8-3: Typischer spezifischer Energiebedarf nach Produktarten bei der Keramikherstellung, 2007

Produkt	**Teilprozess**	**Gesamt - [GJ/t]**
Wand- und Bodenfliesen		5.60
	Brenner	3.92
	Sonstige	1.68
Feuerfestes Keramik		5.57
	Brenner	3.90
	Sonstige	1.67
Sanitär		21.87
	Brenner	15.31
	Sonstige	6.56
Haushaltsware		45.18
	Brenner	31.63
	Sonstige	13.55
Technische Keramik		50.39
	Brenner	35.27
	Sonstige	15.12

Quellen: Ecofys 2009, BREF Ceramics, 2007, Experten Interviews 2010

In der ***Keramikherstellung*** ist der Brennprozess in den Öfen der energieintensivste Prozess mit rund 70 % des gesamten Energieeinsatzes. Die spezifischen Energieverbräuche unterscheiden sich für einzelne Keramikarten (vgl. Tabelle 8-3). Die angeführten Werte bilden die Grundlage für die Berechnung der Einsparpotenziale als Durchschnitt einer typischen Anlage. Unter „sonstige Teilprozesse“ sind Prozesse wie Gemengebereitung, Mischung von Komponenten, Formgebung, Trocknung und Produkt-Endfertigung gemeint. Die Unterschiede der spezifischen Energieverbräuche sind bei den Keramikprodukten noch deutlicher als bei der Glasherstellung:

- Wand- und Bodenfliesen haben mit knapp 6 GJ/t für den Brennprozess und die sonstigen Verfahren einen vergleichbaren spezifischen Energiebedarf wie die Feuerfest-Keramik.
- Mit knapp 22 GJ/t ist die Sanitär-Keramik fast viermal so energieintensiv, und

· die Haushaltskeramik sowie die technische Keramik sind mit 45 bzw. 50 GJ/t noch einmal doppelt so energieintensiv wie die Sanitär-Keramik.

8.2 Analyse der Prozesse

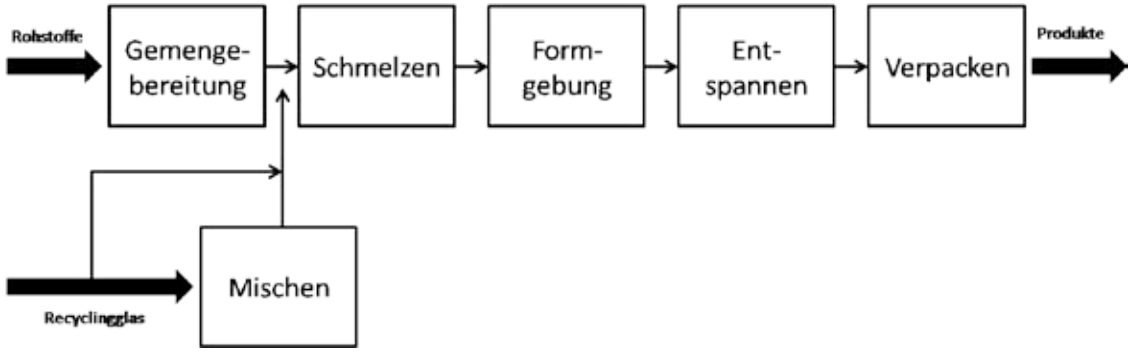
8.2.1 Überblick Glasherstellung

Im folgenden Abschnitt werden die ausgewählten Prozesse näher beleuchtet, wobei nur bei Bedarf auf die einzelnen Glassorten näher eingegangen wird. Denn trotz der Produktheterogenität innerhalb der Glasindustrie gibt es bei der Herstellung prinzipielle Prozesse, welche von jeder Glassorte durchlaufen werden.

Grundsätzlich handelt es sich bei Gläsern um eine unterkühlte Schmelze. Der Hauptbestandteil des herkömmlichen Glases ist Siliciumdioxid (SiO_2), auch Quarzsand genannt. Zusätzlich dazu werden je nach Anwendungsgebiet des späteren Glases basische Oxide hinzugefügt bzw. der Quarzsand von diesen Oxiden gereinigt. So wird für die Herstellung von Behälterglas eine typische Rohstoffzusammensetzung von 71 - 74 % Quarzsand, 8 – 12 % Kalk (für die Härte/ Beständigkeit des Glases) und 13 – 15 % Soda oder Natronlauge (zum Herabsetzen der Schmelztemperatur) verwendet. Hinzu kommen noch Zusatzstoffe zur Färbung, Entfärbung, Läuterung und Schmelzbeschleunigung (vgl. Abbildung 8-5).

Der energieintensivste Prozess bei der Glasherstellung ist – unabhängig von der Glassorte – der Schmelzprozess. Prozesse wie das Mischen, die Gemengebereitung sowie das Entspannen und das Verpacken spielen im Hinblick auf den spezifischen Energiebedarf eine eher untergeordnete Rolle (vgl. Tabelle 8-2).

Abbildung 8-5: Prinzipieller Prozessablauf bei der Glasherstellung



Quelle: Verband der industriellen Energie- und Kraftwirtschaft 1998

8.2.2 Phasen der Glasproduktion

Nachfolgend werden die einzelnen Phasen der Glasproduktion näher beschrieben.

Gemengebereitung und Mischen

Der erste Schritt in der Glasproduktion ist die Gemengeherstellung. Dabei wird den einzelnen Rohstoffen auch ein gewisser Anteil von Glasscherben beigemischt, um so auch den spezifischen Energiebedarf zu reduzieren. Dabei ist jedoch zu beachten, dass nur im Behälterglasbereich – aufgrund der geringeren Qualitätsansprüche – auch externe Scherben im größeren Umfang benutzt werden können. In allen übrigen Sektoren (hauptsächlich Flachglas, sonstige Gläser) werden überwiegend interne Scherben eingesetzt, d. h. Scherben, die unmittelbar beim Prozess als Abfall anfielen.

Schmelzprozess

Die Glasschmelze als energieintensivster Prozess bei der Glasherstellung benötigt etwa 75 bis 80 % des gesamten Energiebedarfs. Dabei stammt die benötigte Energie im Mittel zu 97 % direkt aus der Verbrennung von Erdgas (in seltenen Fällen auch Heizöl). Rein elektrische Schmelzöfen werden trotz einer Reihe positiver Eigenschaften (hohe Schmelzleistung, niedrige Wärmeverluste und gute Regelbarkeit) nur bei Kapazitäten unter 100 t/d verwendet. Der Grund hierfür ist, dass fossile Brennstoffe wesentlich kostengünstiger sind als Strom. Deshalb macht der Strom nur einen Anteil von 3 % am Energiebedarf der Branche für den Schmelzprozess aus (meist als Zusatzbeheizung s.u.).

Als Beheizungsvarianten werden bei der Glasherstellung die Regenerativfeuerung, Rekuperativfeuerung sowie eine Feuerung mit reinem Sauerstoff eingesetzt. Dabei bezeichnet regenerativ bzw. rekuperativ die Art der Wärmerückgewinnung der Feuerungsabgase innerhalb des Schmelzofens. Für Produktionskapazitäten über 500 t/d kommen nur regenerative Schmelzöfen zum Einsatz, die weitgehend mit fossilen Brennstoffen betrieben werden; Strom wird lediglich als Zusatzheizung („Boosting“) eingesetzt. Für Kapazitäten unter 500 t/d werden auch rekuperative Schmelzöfen verwendet, die gegenüber den regenerativen Schmelzöfen flexibler und günstiger sind. Allerdings ist auch die Schmelzleistung geringer, was teilweise durch eine elektrische Zusatzbefeuerung ausgeglichen wird.

Formen

Durch das Formen wird das geschmolzene Glas in das gewünschte Produkt verwandelt. Für die Produktion von Behälterglas wird die wohl dosierte Glasschmelze in eine

Vorform gegeben. Dort enthält das Glas seine vorläufige Gestalt entweder durch Blasen (Druckluft) oder durch ein Pressverfahren mit Plungern und entsprechenden Formen. In einem zweiten Prozessschritt wird das vorgeformte Glas ausgeblasen und erhält seine endgültige Form. Danach werden die Gläser noch spannungsfrei geglüht und können weiter veredelt werden.

Bei der Produktion von Flachglas kommen in Deutschland drei Verfahren zum Einsatz: das Float-, das (Fourcault-) Zieh- oder das Gussverfahren.

- Mit dem Floatverfahren fließt die ca. 1.100 °C heiße Glasmasse aus dem Schmelzofen in das Floatbad auf eine Zinnschmelze. Die Glasdicke wird durch die Geschwindigkeit bestimmt, mit der das Glas bis zum Ende des Bads gezogen wird. Am Ende des Floatbads ist das Glas auf 600 °C abgekühlt und wird durch den Kühlkanal transportiert. Durch die kontrollierte Abkühlung werden die Spannungen im Glas so modifiziert, dass es in der vorgegebenen Weise geschnitten werden kann. Die Glasreste des Schneideprozesses werden in den Floatprozess zurück geführt.
- Beim Ziehverfahren wird das Glas aus der Wanne nach oben direkt aus der Schmelze gezogen und
- beim Gussverfahren wird die Schmelze durch zwei Walzen seitlich abgeführt.

Die beiden zuletzt genannten Verfahren werden wesentlich seltener als das Floatverfahren angewandt und dienen zur Erzeugung spezieller Flachglasprodukte.

Entspannen

Ist das Formen vollendet, wird das Glasprodukt in einem Kühlofen kontrolliert abgekühlt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Abkühlvorgang gleichmäßig durchgeführt wird, damit keine Spannungen im Glas entstehen. Die Dauer dieses Vorgangs ist je nach Glasart und der Stärke/Dicke des Glases unterschiedlich.

8.2.3 Überblick Keramikherstellung

Grundsätzlich gibt es eine allgemeine Prozessfolge, welche von Keramikprodukten durchlaufen wird, unabhängig davon, welche Produktgruppen betrachtet werden (vgl. Abbildung 8-6). Die Rohstoffe der Keramikprodukte variieren in Abhängigkeit von ihrem späteren Verwendungszweck.

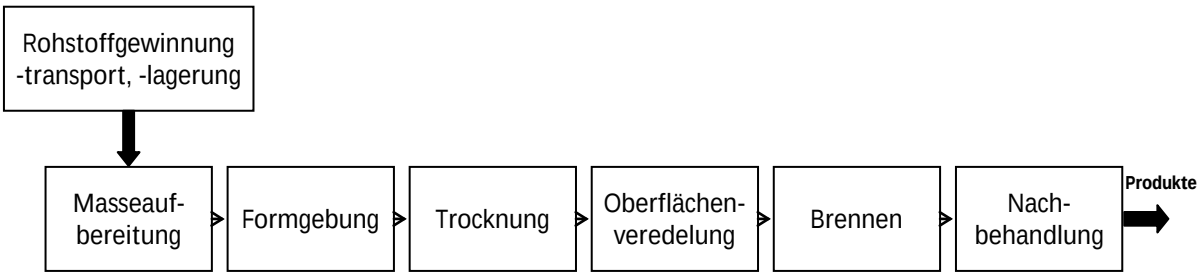
- Silicat-Rohstoffe, wie Tonminerale, Kaoline und nichtplastische Rohstoffe, haben eine grundliegende Kristallstruktur mit eingebauten [SiO4]-Tetraedern. Sie werden hauptsächlich für Kacheln und Fliesen, Porzellan und elektrotechnische Produkte verwendet.
- Weitere oxidische Rohstoffe werden häufig für besonders temperaturbeständige Keramiken verwendet. Beispielsweise wird Aluminiumoxid in Verbindung mit dem

Mineral Korund zur Herstellung von Schleif- und Poliermitteln, Träger für elektrotechnische Anwendungen oder feuerfeste Produkte verwendet. Aus gesintertem Berylliumoxid werden Tiegel und Produkte für die Chemie erzeugt, auch die elektrisch isolierende und hoch wärmeleitfähige Eigenschaft dieses Rohstoffs wird genutzt.

- Nichtoxidische Rohstoffe finden hauptsächlich Anwendung in der technischen Keramik. Hierzu gehört besonders das häufig verwendete Siliciumcarbid, SiC, welches temperaturstabil und hitzebeständig ist. Außerdem gibt es noch Bornitrid und Borcarbid als Rohstoffe für sehr harte Keramikprodukte.

Da die Rohstoffe – und auch deren Produkte – so unterschiedlich sind, gibt es auch Unterschiede in deren Verarbeitung. Dennoch lässt sich der Produktionsablauf in sieben Schritten grob zusammenfassen (vgl. Abbildung 8-6). Die energieintensivsten Prozessschritte sind hier die Trocknung und das Brennen der keramischen Produkte (BREF 2009). Die anderen Prozessschritte (Masseaufbereitung, Formgebung, Oberflächenveredlung, und Nachbehandlung) haben einen deutlich geringeren Energiebedarf.

Abbildung 8-6: Prinzipieller Prozessablauf bei der Keramikherstellung



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BAT ceramics

8.2.4 Prozessschritte der Keramikproduktion

Nachfolgend werden die einzelnen Phasen der Keramikproduktion näher beschrieben.

Masseaufbereitung

Der erste Schritt nach Rohstoffgewinnung, -lagerung und -transport ist die Masseaufbereitung. Zur Masseaufbereitung gehört die Zerkleinerung bzw. Bearbeitung der Rohstoffe und die Verarbeitung dieser zu Massen bestimmter Eigenschaften. Die Rohstoffe können in verschiedenen Formen vorliegen, entweder trocken, feucht, plastisch oder in wässriger Suspension. Je nach Verwendungszweck oder Weiterverarbeitung wird anschließend grob- oder feinzerkleinert oder beides. Hierbei wird teilweise in Trockenmahlanlagen bereits Abwärme des Brennofens verwendet. Um die Rohstoffe für den nächsten Verarbeitungsschritt vorzubereiten, werden Gieß-, Dreh-, Spritz- oder Knetmassen hergestellt. Hierbei kommt es auf das jeweils richtige Verhältnis von aufberei-

tetem Rohstoff und Dispergiermittel, Wasser, Gleit-, Binde- oder Plastifizierungsmittel an. Hier gibt es Firmen, die sich auf die Rohstoffzubereitung spezialisiert haben, da der Anteil der zugefügten Hilfsmittel für die Qualität der Produkte entscheidend sein kann (DFIU, 2001; VDI 2585).

Formgebung

Je nach Ausgangsmasse, Verwendungszweck und Weiterverarbeitung gibt es verschiedene Arbeitsschritte, die aus den Rohmassen sogenannte Formlinge bilden. Gießmassen werden, dem Namen nach, in die gewünschte Form gegossen und nach einer gewissen Scherbenbildungszeit der Form entnommen. Dreh-, Spritz- und Knetmassen werden in offenen oder geschlossenen Vorrichtungen unter Druck und Wärme verformt. Hartplastisch vorgetrocknete Massen werden mechanisch geformt, beispielsweise durch eine Abdrehmaschine mit Profilwerkzeugen. Pressmassen werden ebenfalls dem Namen nach in die gewünschte Form gepresst (DFIU, 2001; VDI 2585).

Trocknung

Auch wenn die Rohstoffmasse bereits eine spezielle Stoffzusammensetzung hat, müssen die Formlinge oft nach der Formgebung durch Trocknung noch auf eine möglichst geringe Restfeuchte gebracht werden. Dies geschieht im Prozessschritt Trocknen, welcher nach dem Brennen der energieintensivste Schritt ist. Hierbei gibt es verschiedene Trocknungsanlagen, wie Kammer-, Durchlauf-, Trommel- oder Sprühtrockner (wobei die Sprühtrockung eine Sonderform darstellt, da das Produkt hier gleichzeitig geformt und getrocknet wird). Oft arbeitet die Trocknungsanlage in einem Wärmeverbund mit dem Ofen, sodass die Trocknung mit der Abluft des Brennprozesses ermöglicht wird. Ansonsten verwenden die Trocknungsanlagen eigene Brennersysteme. Das Trockengut durchläuft, eventuell periodisch, den Trockner mit Warmluft im Gegenstrom- oder Gleichstromprinzip. In Klimatrocknern hat die Warmluft eine kontrollierte Feuchte. Dieser Prozessschritt kann zu Verbundemissionen durch die Bindemittel usw. führen (DFIU, 2001; VDI 2585).

Oberflächenveredelung

Die Oberfläche der Trockengüter wird hauptsächlich mittels Glasuren, Engoben oder Dekorierung veredelt. Eine Glasur entsteht durch einen Glühbrand des Formlings zur Vorfestigung mit anschließendem Überzug einer glasig einschmelzenden Schicht. Eine Engobe aus einer feinkörnigen keramischen Masse wird durch Tauchen oder Beigießen aufgetragen. Der Auftrag einbrennender, einschmelzender Farben ermöglicht die Dekorierung des Gutes. Weitere Verfahren führen u. a. zu einer Pulverbeschichtung, schmutzabweisenden oder leitfähigen Schichten (DFIU, 2001; VDI 2585).

Brennen

Der Prozessschritt Brennen als energieintensivster Vorgang der Keramikherstellung erfolgt durch das Sintern der Formlinge in ein oder mehreren Bränden. Es wird hier zwischen kontinuierlich und periodisch arbeitenden Öfen unterschieden, welche hauptsächlich eine Gas- oder (seltener) Ölfeuerung verwenden (DFIU, 2001; VDI 2585):

- Die kontinuierlichen Öfen sind in Bau- und Betriebsart den jeweiligen Produkten angepasst, für keramische Erzeugnisse werden hauptsächlich Tunnelöfen verwendet. Die zu brennenden Güter durchlaufen den Ofen kontinuierlich oder diskontinuierlich zumeist im Gegenstromprinzip. Das bedeutet, die kalte Umgebungsluft wird am Ofenende eingezogen, betritt die Kühlzone, wo sie durch die Abwärme der gebrannten Güter erwärmt wird. Die angewärmte Luft strömt in die Brennzone, wo sie erhitzt und für den Verbrennungsvorgang verwendet wird. Danach strömen die heißen Abgase aus der Brennzone in die Vorwärmzone, wo die kalten Formlinge durch die noch heiße Luft angewärmt werden. Zur Erreichung einer optimalen Abwärmenutzung ist besonders die Ofenabdichtung von Bedeutung.
- Bei periodischen Öfen bleibt das Gut ortsfest im Ofen während des Brandes. Es kommt zur Anpassung der Brennparameter von Brand zu Brand entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen des Brenngutes.

Besonders zu beachten sind in diesem Prozessschritt die Staub- und Gasemissionen sowie die teilweise vorhandenen Lärmemissionen.

Nachbehandlung

Die Nachbehandlung ist meist eine mechanische Nachbearbeitung mit anschließender Qualitätskontrolle und Verpackung. Hierbei entstehen ebenfalls Staub- und Lärmemissionen (DFIU, 2001; VDI 2585).

8.2.5 Zusammenfassung: THG-Emissionen und Energiebedarf

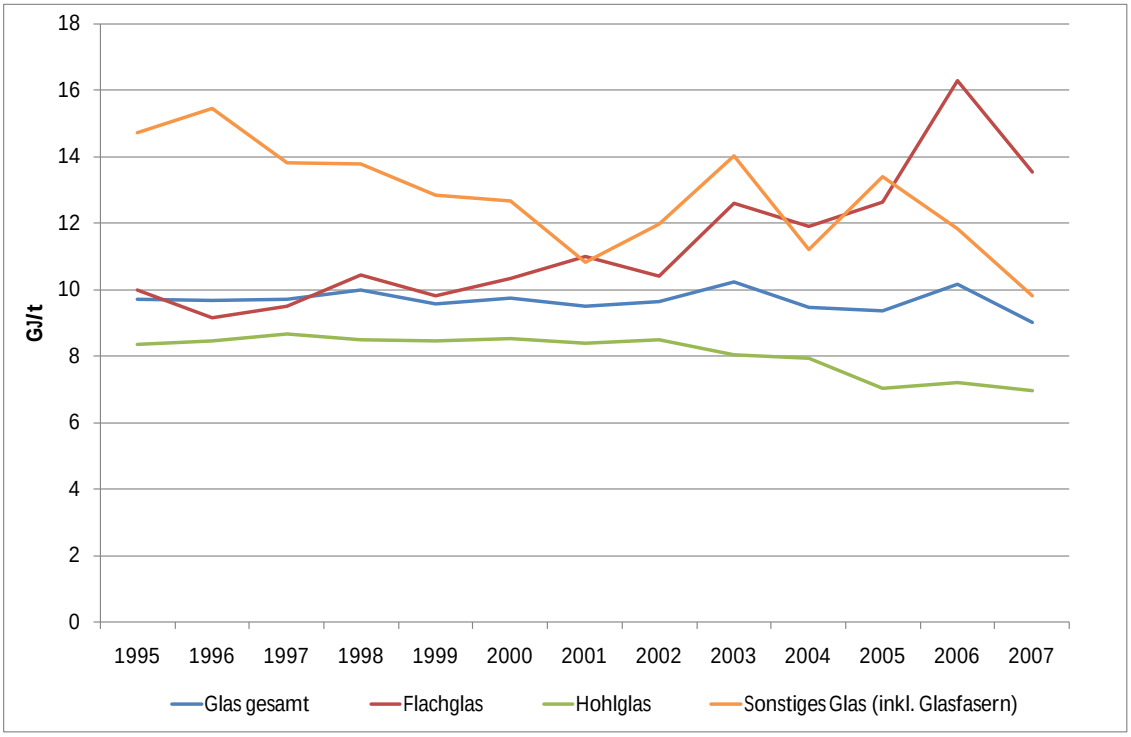
Die Herstellung von Glas zeichnet sich mit 53 PJ Brennstoffbedarf durch einen hohen thermischen Energieaufwand (Zahlen für 2007) aus, während der Strombedarf mit 16 PJ rd. 23 % des Endenergiebedarfs ausmacht. Der bedeutendste Energieverbraucher der Glasherstellung ist die Hohlglasindustrie (31 PJ), gefolgt von der Produktion von Flachglas (24 PJ) und der sonstigen Glasproduktion (7,8 PJ).

Die Werte für den spezifischen Energiebedarf der Glasindustrie, für die hier ausgewählten Glasproduktklassen, variieren stromseitig um den Faktor von 3,5 und brennstoffseitig um den Faktor 2,3 (vgl. Tabelle 8-1). Für die Berechnung des Energiebedarfs der betrachteten Prozesse wird die Eigenproduktion von Strom nicht berücksichtigt (d. h., der Brennstoffeinsatz einer möglichen Eigenerzeugung von Strom wird nicht

betrachtet). Entsprechend wird auch der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung nicht betrachtet.

Seit Mitte der 1990er Jahre hat sich der spezifische Energiebedarf der Glasindustrie insgesamt nur wenig verändert. Er ist von 9,7 GJ/t im Jahr 1995 auf 9,2 GJ/t im Jahr 2007 gesunken (vgl. Abbildung 8-7)[71]. Während beim Hohlglas ein spezifischer Verbrauchsrückgang zu verzeichnen war, stieg der spezifische Energiebedarf auf etwa 14 GJ/ t beim Flachglas wegen der zunehmenden Qualitätsansprüche der Abnehmerbranchen. Innerhalb der Brennstoffe dominiert in der Glasindustrie der Erdgaseinsatz, auf dem im Jahr 2007 fast 85 % des gesamten Brennstoffverbrauchs entfiel (Statistisches Bundesamt 2009b).

Abbildung 8-7: Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs in der Glasindustrie 1995-2007



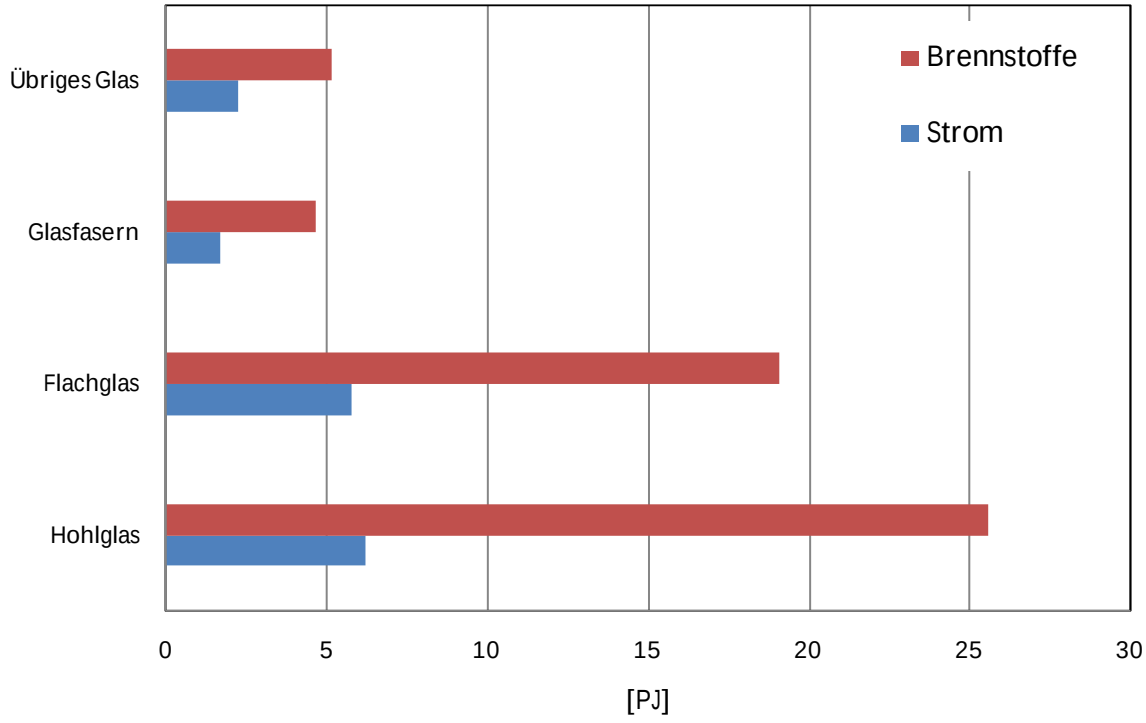
Quellen: BV Glas 2009; Statistisches Bundesamt 2009b; Berechnungen Fraunhofer ISI

71 Der deutliche Anstieg im Jahr 2006 für die Glasindustrie insgesamt und insbesondere Flachglas ergibt sich aus den Energieverbrauchsangaben des Statistischen Bundesamtes (2009b), die für 2006 einen deutlichen Verbrauchsanstieg ausweisen. Der Sprung zwischen 2002 und 2003 dürfte auf die Umstellung der Energieverbrauchsstatistik zurückzuführen sein.

Auch die Keramikproduktion zeichnet sich durch einen hohen Brennstoffbedarf (fast 19 PJ) für den thermischen Energieaufwand aus. Der Strombedarf beträgt mit insgesamt 3,5 PJ in vier der fünf Wirtschaftszweige weniger als 20 % des thermischen Energieaufwandes (Ausnahme: technische Keramik mit 27 %; vgl. Tabelle 8-1). Der bedeutendste Energieverbraucher ist die Herstellung von Platten, Wand- und Bodenfliesen-Keramik (7,9 PJ), gefolgt von der Produktion von Feuerfester Keramik (7 PJ) und Technischer Keramik (3,7 PJ).

In der Keramikindustrie wird hauptsächlich der Energieträger Erdgas verwendet, ca. 90 % in allen Produktgruppen; Leicht- und Schweröl werden in geringem Ausmaß eingesetzt (EU Commission 2007). Eine bedeutende Option zur Energieeinsparung ist die Nutzung der produzierten Abwärme in mehreren Teilprozessen, ohne für jeden Prozessschritt ein eigenes Heizsystem zu verwenden (DFIU 2001).

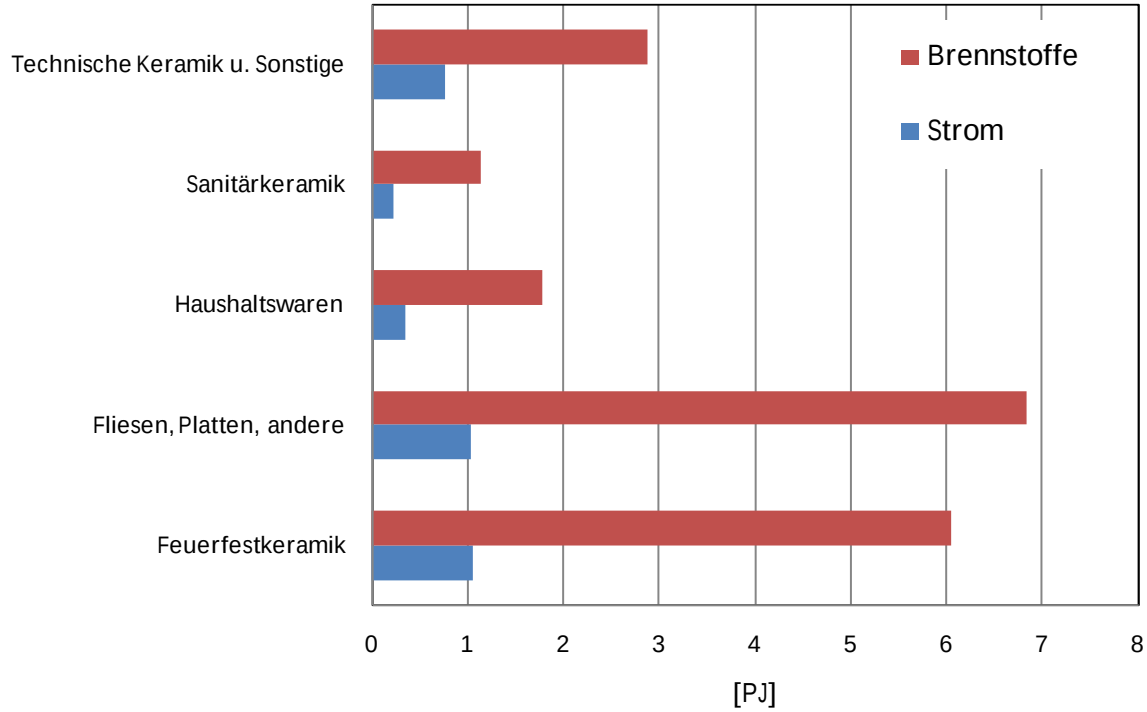
Abbildung 8-8: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Teilbranchen der Glasindustrie (2007)



Quellen: BV Glas 2009, Statistisches Bundesamt 2009b; siehe auch Tabelle 8-11

Auf den (zum Teil geschätzten) Angaben für die einzelnen Glas- und Keramikproduktgruppen zu den Brennstoff- und Stromverbräuchen für das Jahr 2007 werden die weiteren Berechnungen zu den Energieeffizienzpotenzialen basiert (siehe Abbildung 8-9).

Abbildung 8-9: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Teilbranchen in der Keramikindustrie (2007)



Quellen: Statistisches Bundesamt 2009b; Berechnungen Fraunhofer ISI/IREES; siehe auch Tabelle 8-12

Tabelle 8-4: Strom- und Brennstoffverbrauch sowie Treibhausgasemissionen der ausgewählten Teilbranchen der Glas- und Keramikindustrie, 2007

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Behälterglas	6,23	25,56	0,19	1,12	1,51
Flachglas	5,80	19,06	0,31	1,04	1,12
Glasfasern	1,71	4,65	0,03	0,31	0,27
Übriges Glas	2,26	5,13	0,06	0,40	0,30

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO_2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Feuerfestkeramik	1,05	6,05	0,55	0,19	0,36
Fliesen, Platten, andere	1,04	6,84	0,38	0,19	0,40
Haushaltswaren	0,34	1,77	0,19	0,06	0,10
Sanitärkeramik	0,23	1,15	0,10	0,04	0,07
Technische Keramik u. Sonstige	0,77	2,88	0,89	0,14	0,17

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.2.5 genannten Datenquellen und Annahmen

Direkte energiebedingte Emissionen der ausgewählten Branchen werden durch den Brennstoffverbrauch verursacht; sie betrugen im Jahr 2007 für die Glasindustrie 3,2 Mio. t CO_2-eq. und für die Keramikindustrie 1,1 Mio. t CO_2-eq.

Indirekte Emissionen sind durch den Strombedarf bestimmt; sie lagen bei etwa 2,9 Mio. t CO_2-eq. für die Glasindustrie und bei etwa 0,6 Mio. t CO_2-eq. für die Keramikindustrie. Für die prozessbedingten Emissionen der ausgewählten Branchen sind Flachglas und Hohlglas bei der Glasindustrie mit 200.000 bis 300.000 t CO_2-eq. von Bedeutung, während bei der Keramikindustrie die technische Keramik (gut 900.000 t CO_2-eq.), die Feuerfest-Keramik (gut 500.000 t CO_2-eq.) und die Wand- und Bodenfliesen (ca. 350.000 t CO_2-eq.) die bedeutendsten Emittenten-Gruppen sind.

8.3 Analyse der Einsparoptionen

Die Energieeffizienz-Potenziale der Prozesstechniken werden für beide Branchen getrennt erläutert.

8.3.1 Glasindustrie

Neue Technologien für die Glasindustrie sind konzentriert auf der Entwicklung von effizienteren Lösungen im Bereich der Glasschmelze (z. B. Batch- und Glasscherbenvorwärmer, neue Ofen-Designs, innovative Brennersysteme; vgl. Tabelle 8-5).

Laut Experteninterviews sind die bestehenden Prozesse in der Glas- und Keramikindustrie bereits relativ weit optimiert. Bei revolutionären Schmelzkonzepten (z. B. Submerged Combustion oder Centauro Ofen) ist kurzfristig für die kommenden Jahre kein schneller Durchbruch zu erwarten. Dennoch ist ein weiterer 5 %-Effizienz-Schritt im konventionellen Bereich nach Einschätzung der befragten Fachleute ein machbarer und lohnenswerter Fortschritt (Expertenbefragung 2010).

Die Effizienzoptionen beziehen sich auf den konventionellen Prozess und umfassen fast ausnahmslos Optimierungen des konventionellen Herdprozesses. Verbesserte Technologien zur Verbrennung zählen zu den wichtigsten Optionen mit dem Ziel der Reduzierung des Energieverbrauchs sowie die Minimierung der NO_x-Emissionen. Sowohl Verbrennungsregelungssysteme als auch unterschiedliche Arten von Brennern und neuen Ofendesigns werden derzeit erforscht und dürften ein erhebliches Innovations- und Entwicklungspotenzial aufweisen. Weitere Entwicklungen laufen derzeit im Bereich fortgeschrittener Batch- und Scherbenvorwärmer, insbesondere für Oxy-Fuel Öfen. Weiterhin ist die Frage nach erhöhtem Scherbeneinsatz besonders wichtig. Die

Einschätzung der Verbesserungspotenziale ist allerdings auch unter Fachleuten nicht einheitlich.

Tabelle 8-5: Mögliche Energie-Effizienzoptionen nach Produktionsprozess und Produktart in der Glasindustrie für Strom und Brennstoffe

Produkt	Einsparoption	Spezifisches Einsparpotential		
		Strom [GJ/t]	Erdgas [GJ/t]	Schweres Öl [GJ/t]
Behälterglas	Gemenge Vorwärmung		0.60	
	Erhöhung Scherbeneinsatz		1.3	
	Low (Nox) Brenner	0.04	0.5	
	Brennstoffsubtitution			0.5
	Optimierte Verbrennung		.52	
	Schnelle reaktion	0.07	.45	
Flachglas	Abwärmenutzung	0.26		
	Low (Nox) Brenner	0.07	0.95	
	Brennstoffsubtitution			0.75
	Optimierte Verbrennung		0.95	
	Schnelle reaktion	0.09	0.86	
Sonstiges Glas	Low (Nox) Brenner	0.17	0.95	
	Brennstoffsubtitution			0.45
	Optimierte Verbrennung		0.98	
	Schnelle reaktion	0.09	0.90	
Glasfasern	Optimierte Verbrennung		0.45	
	Schnelle reaktion	0.06	0.40	

Quellen: Schmid 2009, Interviews 2010

8.3.1.1 Low-NO_x-Brenner

Low-NO_x-Brenner in Kombination mit Verbrennungsregelungssystemen werden ständig weiter entwickelt, um die Leistung in Bezug auf die Energieeffizienz und Minderung der Schadstoffbelastung zu optimieren (IPPC 2009; GWI 2008).

8.3.1.2 Optimierung der Verbrennungsparameter

Ein Forschungsprojekt in Deutschland konzentrierte sich in 2009 auf die Verbesserung des direkten Wärmeeintrages in die Glasschmelze durch ***Optimierung der Verbrennungsparameter*** bei unterschiedlichen Befeuerungsarten. Die Brennstoffstufung mittels Sekundärgas hat sich als die vielversprechendste Methode hierfür erwiesen (Energieersparnis von bis zu 2 %; Fleischmann et al. 2009).

8.3.1.3 Innovative Brennertechniken

Weiterhin wichtiges Thema war auch die Energieeffizienz in der Glasindustrie durch ***innovative Brennertechniken***, wie z. B. die ***Glas-FLOX-Hochtemperatur-Verbrennungstechnologie***, die eine fortgeschrittene Technik der Glasschmelze darstellt. Der „flammenlose Brenner" – ursprünglich für die Metallindustrie entwickelt – wurde an die speziellen Erfordernisse der Glasindustrie angepasst (IPPC 2009; GWI 2008). Im Vergleich zu Standardbrennern arbeiten Glas-FLOX-Brenner mit höherer Brenngeschwindigkeit und führen zu einer verbesserten Abdeckung des Glasbades aufgrund einer stärkeren internen Rezirkulation und Reaktion der Abgase. Durch die verzögerte Vermischung von Luft und Brenngas wird ein verlängerter Ausbrand erzeugt. Diese Eigenschaften führen zu einem besseren Energietransfer in der Glaswanne. Der Glas-FLOX-Brenner arbeitet mit reduzierten Temperaturen in der Nähe des Brenners, was zu einer reduzierten Bildung von thermischem NO_x führt (IPPC 2009). Laut Experteninterviews ist der Wirkungsgrad von Glas-FLOX als rekuperativer Prozess gegenüber regenerativer Beheizung niedriger und damit die Technologieoption eher unwirtschaftlich (Expertenbefragung 2010).

Der ***Porenbrenner bei der Glasherstellung*** stellt ebenfalls eine interessante Effizienzoption dar (Fleischmann et al. 2009; Reuße et al. 2009). Ein entsprechendes Forschungsprojekt hat das Ziel, gemeinsam mit Industriepartnern spezielle Brenner zu entwickeln, die eine schadstoffärmere Verbrennung, Energieeffizienz sowie Qualitätsverbesserungen bei verbesserter Regelbarkeit ermöglichen. Bisher ist der Einsatz von Porenbrennern bei niedriger und mittlerer Prozesstemperatur möglich, für Hochtemperaturbedingungen wird der Brenner noch im genannten Forschungsprojekt entwickelt. Allgemein haben Porenbrenner eine gute Verbrennungsstabilität bei leichten Schwankungen der Brennstoffqualität, sie führen zu geringen Schadstoffemissionen und sind in vielfältigen Bauformen herstellbar (Reusse et al. 2010).

Die Umstellung ***traditioneller Öfen auf Oxy-Fuel Brenner*** führt bei bestimmten Prozessen zu höherer Produktivität und Qualität sowie – wegen Abwesenheit und Nichterwärmung des Luftstickstoffs – zu geringeren NO_x-Emissionen und Energieverbräuchen. Doch die zusätzlichen Energiekosten für Sauerstoff sind immer noch eine bedeutende wirtschaftliche Barriere. Nach Expertenmeinungen hat ***Oxyfuel*** bei Behälterglaswannen gegenüber der konventionellen U-Flammenwanne keine merkbaren energetischen Vorteile. Die Vorteile sind: Steigerung der Schmelzleistung bei gleichem Footprint, geringere Investition in die Anlagen (Einsparung der teuren Regeneratoren).

Außerdem könnte durch die Entwicklung der sog. Oxy-Wanne mit einer einzigen Strahlungswand bei der Anwendung ca. 8 bis 10 % Energieeinsparung bewirken (Interviews

2010, Workshop Glasindustrie Frankfurt 2010, Radgen, et. al. 1998). Strahlungswände sind technisch schwer zu beherrschen, allerdings ist ihr Einsatz bei Sauerstoffwannen heute schon möglich.

8.3.1.4 Brennstoffwechsel

Als eine zusätzliche und auch bei örtlich verfügbarem Erdgas vergleichsweise leicht zu realisierende Maßnahme kann der ***Brennstoffwechsel*** angesehen werden, d. h. der Wechsel von der Befeuerung mit Heiz-Ölen hin zu Erdgas. Absehbare Effekte sind eine sauberere Verbrennung sowie eine geringe Reduzierung des Energiebedarfs (z. B. keine Beheizung des HS-Speichers) (IPPC 2009).

8.3.1.5 Gutvorwärmung

Laut Experteninterviews bringt eine ***Gutvorwärmung*** nach bisherigen Erfahrungen Energieeinsparungen von bis zu 16 %. Andere Stimmen halten diese Maximalwerte für zu hoch, zumal bei zu hohen Vorwärmtemperaturen ein Verkleben der Scherben droht. In den hohen Werten sind auch indirekte Einsparungen enthalten, die durch die Gutvorwärmung möglich scheinen (andere „hidden losses“). Eine nüchterne direkte Bilanzierung kommt auf 5 % bis 10 % Effizienzverbesserung. Fachleute weisen auch auf die Tatsache hin, dass in dem Glasrohstoff alle Komponenten, die mit Wasser zusammen kommen, eine Betonphase bilden können und somit den Wärmetausch blockieren können. Aus diesem Grund gebe es derzeit nur ca. 14 Gutvorwärmer weltweit (Expertenbefragung 2010).

8.3.1.6 Recycling von Rohstoffen

Recycling bzw. die Wiederverwendung von Rohstoffen und Materialien stellt(e) eine bedeutende Option zur Energieeffizienz in einigen Bereichen der Industrie dar, so auch in der Glasindustrie (Jochem et al. 2003). Insbesondere lässt sich hier mit Altglas als Zugabe in der Glasschmelze Quarzsand, Soda und Kalk und substituieren, was bereits in der Vergangenheit genutzt wurde. Für die Erhöung heutiger Recycling-Anteilen ist zunehmend der Konflikt zwischen Verunreinigungen und Qualitätsstandards bei manchen Glassorten eine Herausforderung.

8.3.1.7 Die Verwendung von Abwärme zur Stromerzeugung

Die Verwendung von Abwärme zur Stromerzeugung – ähnlich wie bei der Zementherstellung durch ORC-Anlagen – oder durch Abgabe an Dritte verbessert zwar nicht den spezifischen Brennstoffbedarf der Glasherstellung, würde aber die Gesamteffizienz deutlich verbessern können.

8.3.1.8 Zusammenfassung

Die Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienzinvestitionen schwankt, abhängig davon, wie umfangreich die Eingriffe in bestehende Anlagen sind oder wie innovativ oder etabliert die eingesetzten Techniken sind (vgl. Tabelle 8-6). Gerade bei stark in den Produktionsprozess integrierten Maßnahmen (z. B. Batch, Scherben) ist die Wirtschaftlichkeit deutlich besser.

Tabelle 8-6: Wirtschaftlichkeit bedeutender Effizienzoptionen bei der Glasherstellung, 2009

Maßnahme	**Wirtschaftlichkeit**
Gemenge Vorwärmung	Hoch – Mittel
Erhöhung Scherbeneinsatz	Hoch
Low (NO_x) Verbrenner	Mittel – Niedrig
Brennstoffsubstitution	Hoch
Abwärmenutzung	Mittel – Niedrig
Optimierte Verbrennung	Mittel – Niedrig (Demonstration)
Schnelle Reaktion	Mittel – Niedrig (noch sehr innovativ)

Quelle: eigene Erhebungen und Auswertungen, IREES

8.3.2 Keramikindustrie

In den Prozessschritten Brennen und Trocknen liegt laut Prozessbeschreibung der Schwerpunkt des Energiebedarfs. Hier ist der vorrangige Ansatz für Energieeffizienzoptionen, wenngleich die anderen Prozessschritte nicht bei Verbesserungsmaßnahmen vergessen werden sollten. Die Effizienzoptionen reichen von der Verwendung von Rechnertechnik zur effizienten Zusammenarbeit der eingesetzten Maschinen, über neuartige Ofentechniken und Verarbeitung, bis hin zu veränderten Materialzusammensetzungen der Formlinge. Hierbei ist das Ziel vorrangig die direkte Einsparung von Energieträgern, aber auch deren indirekte Einsparung durch verkürzte ***Brenn- und Trockenzeiten*** oder erhöhtem Durchsatz sowie Verwendung neuer Technologien, die prozessoptimierend wirken. Neben der Einsparung von Energie sollen aber auch Emissionen von Gasen und besonders Schadstoffen verringert werden. Es wurden einige Einsparoptionen herausgegriffen, die hier kurz dargestellt werden sollen (vgl. Tabelle 8-7). Die letzten drei genannten Technologien sind relativ neu und erst auf-

kommend in der Keramikproduktion. Auch besteht hier nicht der Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 8-7: Mögliche Energie-Effizienzoptionen nach Prozessen und Produktart in der Keramikherstellung, 2009

Produkt	Effizienzoption	Spz. Effizienzpotenzial	
		Strom- [GJ/t]	Erdgas- [GJ/t]
Platten, Wand- und Bodenfliesen	Energie-Management System	0,03	0,6
	Interne Prozessführung	0,03	0,65
	Interne Wärmenutzung	0	0,9
Feuerfeste Keramik	Energie-Management System	0,025	0,4
	Interne Prozessführung	0,025	0,4
	Interne Wärmenutzung	0	0,6
	Stahlfolie, Karbonfases Trocknungssysten	0	0,25
Sanitärkeramik	Energie-Management System	0,15	1,9
	Interne Prozessführung	0.15	2,05
	Interne Wärmenutzung	0	3,05
Haushaltswaren	Energie-Management System	0,25	3,45
	Interne Prozessführung	0,25	3,45
	Interne Wärmenutzung	0	5,2
Technische Keramik	Energie-Management System	0,12	1,3
	Interne Prozessführung	0,12	1,35
	Interne Wärmenutzung	0	2,1

Quelle: eigene Erhebungen und Auswertungen, IREES

8.3.2.1 Energiemanagement System

Eine Effizienzoption bietet die computergestützte Produktion durch ein Energie-Management-System (E.M.S.) (HWE 2009) Dazu gehört beispielsweise das Chargenofenmodell (BINE 15/09). Computerunterstützung im E.M.S. führt zur Optimierung der Verbrennungstechnik, Nutzung vorgewärmter Verbrennungsluft sowie Nachnutzung von Abwärmeströmen.

8.3.2.2 Rekuperator-Brenner

Nicht nur die Unterstützung mittels Rechnertechnik, sondern das gesamte System von Ofen und Trocknungsanlage steht hier im Vordergrund. Hierbei ist von Vorteil ***Rekuperator-Brenner*** zu verwenden, die warme Abgase zur Verbrennung nutzen.

8.3.2.3 Wärmenutzung im Energieverbund

Außerdem ist die ***Wärmenutzung im Energieverbund*** wichtig, wenn es darum geht, in der Trocknungsanlage kein eigenes Heizsystem zu haben, sondern die Abwärme der Ofenanlage mit zu verwenden. Das angesprochene Chargenofenmodell beinhaltet Simulationsrechnungen zur Entwicklung optimaler Heizkurven. Hieraus folgt die Optimierung von Ofenreisen nach Liegezeiten und Energieeinsatz, verbesserte betriebliche Planung, Durchsatzerhöhung und Prozessbeobachtung. Die interne Wärmenutzung zielt hauptsächlich auf die Verbrennungsluftvorwärmung durch Heißluft und Heißluftrückführung ab, egal ob bei kontinuierlichen oder periodischen Hochtemperaturöfen >1.400°C oder sonstigen Öfen. Hierzu gehören ebenfalls die Auslegung der Ofenkühlzone als Gegenstrom-Wärmetauscher, die Integration des Trockners in den Ofen sowie die optimale Isolation der Ofenanlage.

Insgesamt wird das Energieeffizienzpotenzial eines E.M.S. bei 25 % und das CO_2-Effizienzpotenzial bei bis zu 30 % gesehen.

8.3.2.4 Integrierte Prozessführung

Weiterhin kann zur energiesparenden Systemarchitektur der Keramikproduktion die ***integrierte Prozessführung*** gehören (Weber et al. 2010). Hierbei kommen Brenner und Beheizungssysteme sowie die Ofenführung mit Modellen zum Einsatz (BINE 15/09). Allgemein gelten hier ebenfalls die Nachnutzung der Abwärmeströme sowie die Rezirkulierung von Abgasen zur Ofenvorwärmung und Atmosphärenkontrolle. Die ***modellgestützte Ofenführung*** zielt auf eine automatisierte Anpassung der Prozessführung an Schwankungen im Brennvorgang ab. Dabei steht ein minimierter Energieaufwand, gleichmäßige Durchwärmung, Verringerung von Zunder- und Spannungseffekten sowie Kosteneinsparungen durch Qualitätsverbesserungen im Vordergrund (BINE 15/09). Die Integrierte Prozessführung hat ein Energieeffizienzpotenzial von 12 % sowie das Potenzial zur Prozesszeitverkürzung von bis zu 50 % (Weber et al. 2010).

8.3.2.5 Innovative Brennersysteme

Zudem wird der Einsatz von ***Hochgeschwindigkeits-Impuls-Brennern*** angestrebt (Weber et al. 2010). Diese gehören zu Brennern und Beheizungssystemen mit multivalentem Einsatz. Das sind neuartige Flammenbrenner, bei denen die Brennluft tangential einströmt und die nach dem Permanent-Impuls-Verfahren (PI) mit eingedüsten Verbrennungsgasen laufen. Dies führt zu höchster Brennluftvorwärmung, erhöhter konvektiver Wärmeübertragung und somit verkürzter Erwärmungsdauer des Brenngutes.

Eine spezifische Technologie ist die Anwendung eines ***Drehgenerator-Brenner-Systems DREBS zur Wärmerückgewinnung mit thermischen Regeneratoren***. Hierbei handelt es sich um eine drehende Speichermasse, die auf einer Seite von heißem Abgas und auf der anderen Seite von kalter Brennluft durchströmt wird, was als Verbesserung des ursprünglichen Rekuperators gilt. Es geht hier um die kontinuierliche Brennluftvorwärmung, die Energieeinsparung sowie die Verbesserung der Temperaturgleichmäßigkeit (BINE 15/09; BINE ¾). Die interne Wärmenutzung birgt ein Energieeffizienzpotenzial von bis zu 30 % (Weber et al. 2010).

Eine relativ neue Technologie sind die ***Radiant Tube Burners***, welche beispielsweise in Rollenherdöfen oder Herdwagenöfen angewendet werden können. Hierbei handelt es sich um Brenner aus Siliciumkarbid mit hoher thermischer Leitfähigkeit und Hitzebeständigkeit. Die Brennerflamme befindet sich in einem hitzebeständigen Rohr. Dieses gasbefeuerte Stahlrohr erhitzt den Ofen indirekt und führt so zur Vermeidung von Wasserdampfproduktion in der Ofenluft. Außerdem gibt es somit geringere Emissionen unerwünschter Fluoride, HFs und SO_x (EU Commission 2007).

8.3.2.6 Mikrowellenunterstütztes Brennen und Trocknen

Auch das mikrowellenunterstützte Brennen und Trocknen ist noch ein relativ neues Konzept. Dies ist die Kombination von ***Mikrowellen-Energie und herkömmlicher Energie wie Strom und Gas***. Das typische Temperaturprofil des Formlings bei herkömmlichen Energien ist heiß außen und kühl innen. Das Temperaturprofil durch Mikrowellenenergie ist entgegengesetzt. Wenn beides kombiniert wird, führt es zur gleichförmigen Produkterwärmung und einem verbesserten Wärmetransfer ins Innere der Produkteinheit. Dies führt zur Verringerung thermischer Spannungen, Qualitätsverbesserungen und einem beachtlichen Zuwachs der mechanischen Eigenschaften. Außerdem kommt es zu einem erhöhten Durchsatz, kürzeren Brennzeiten sowie reduzierten Emissionen (EU Commission, 2007).

8.3.2.7 Trocknungssystem mit Stahlfolie und Karbonfasern

Die dritte aufkommende Technologie findet besonders Einsatz in der Produktion feuerfester Keramiken, besonders solche mit großen Ausmaßen. Es ist ein ***Trocknungssystem mit Stahlfolie und Karbonfasern.*** Zum flüssigen Material der feuerfesten Keramiken werden vor dem Brennen und Trocknen Stahlfolien oder Karbonfasern hinzugegeben. Dies fördert den Wasserentzug von Innen nach Außen und ebenfalls eine solche Erhitzung. Dies führt zu einer stabileren Trocknung ohne Trockenrisse, erhöhter struktureller Stabilität, reduzierten Trockenzeiten und somit zu Qualitätsverbesserungen und Energieeinsparungen (EU Commission 2007).

8.3.2.8 Zusammenfassung

Die Wirtschaftlichkeit der genannten Energieeffizienzoptionen wird unterschiedlich eingeschätzt. Sie ist u. a. abhängig davon, wie umfangreich die Eingriffe in bestehende Anlagen sind oder wie innovativ oder etabliert die eingesetzten Techniken sind. Gerade bei stark in den Produktionsprozess integrierten Maßnahmen (z. B. Wärmenutzung) ist die Wirtschaftlichkeit besser. In der folgenden Tabelle wird ein erster Überblick der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Optionen der Keramikindustrie gegeben (vgl. Tabelle 8-8).

Tabelle 8-8: Wirtschaftlichkeit bedeutender Effizienzoptionen bei der Keramikherstellung

Maßnahme	**Wirtschaftlichkeit**
Einführung Energie Management Systeme	Mittel-Niedrig
Integrierte Prozessführung	Mittel-Niedrig
Interne Wärmenutzung	Mittel-Niedrig
Trocknungssysteme	Mittel-Niedrig

Quelle: eigene Erhebungen und Auswertungen, IREES

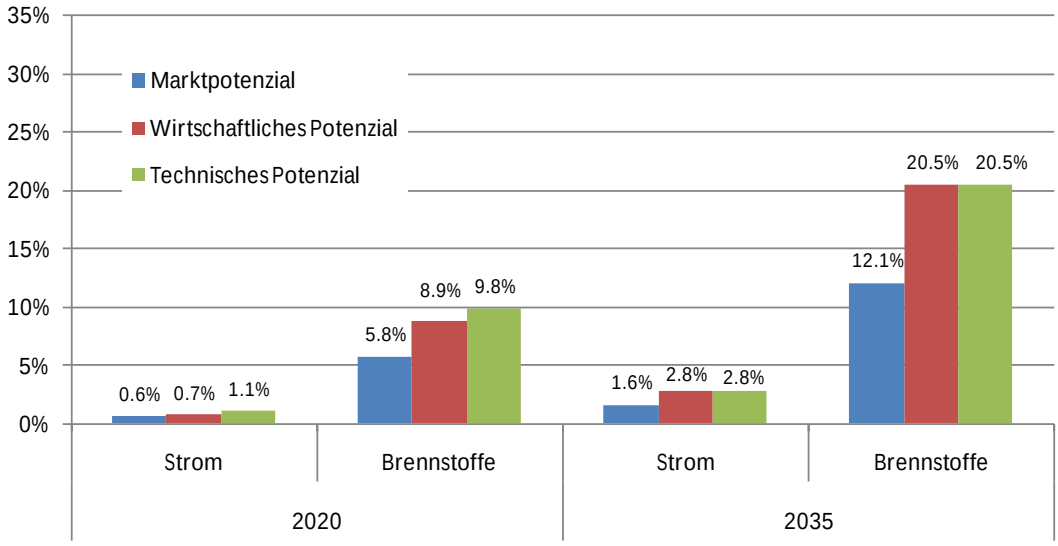
8.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

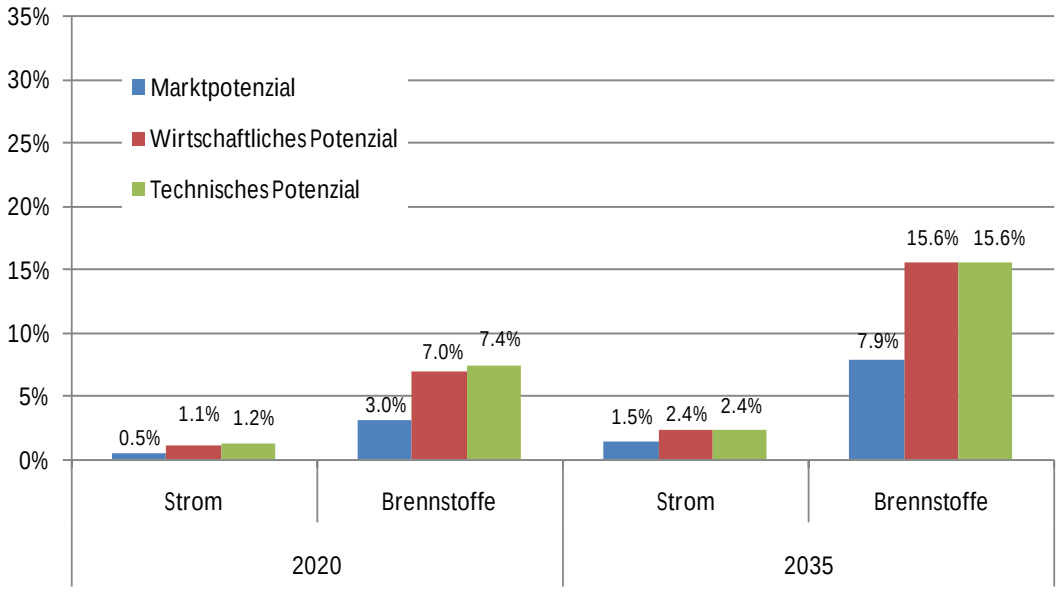
Die Effizienzpotenziale werden auf Basis der im vorigen Kapitel erläuterten Effizienztechnologien für die Glas- und Keramikindustrie berechnet. Für die Glasindustrie sind die einzelnen Effizienzoptionen ähnlich bezeichnet, während die Maßnahmen für Keramikindustrie auf drei Maßnahmenbündel zusammengefasst wurden.

Das zukünftige Effizienzpotenzial bezieht sich auf den gesamten Endenergieverbrauch der Glas- und Keramikindustrie im Jahr 2007. Die Ergebnisse für die modellierten Prozesse beider Branchen sind nach vier Szenarien „Frozen Efficiency“, „Marktpotenzial“ und „Wirtschaftliches- und Technisches Potenzial“ differenziert zu sehen. Entsprechend der Produktion wächst im Frozen-Efficiency-Szenario auch der Brennstoff- und Strombedarf weiter an. Beim Hohlglas ist der Scherbeneinsatz in diesem Frozen-Efficiency-Szenario enthalten; maximal wird eine 70 % Einsatzquote in 2035 erreicht. Die Analyse von Effizienzmaßnahmen wurde für die Glas- und Keramikindustrie auf die Schmelz und- Brennerprozesse fokussiert, sodass die resultierenden Potenziale stärker für Brennstoffe gelten und weniger für den Stromeinsatz (siehe Abbildung 8-10).

Es bestehen zwar auch erhebliche Effizienzpotenziale für Strom, aber diese werden hauptsächlich im Bereich der Querschnittstechnologien gesehen und daher nicht hier in dieser Analyse betrachtet. Das ausgewiesene Stromeffizienzpotenzial ergibt sich lediglich als Effekt der hier beschriebenen verbesserten Prozesstechnologien.

Abbildung 8-10: Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen der Branchen Glas (obere Abbildung) und Keramik (untere Abbildung) bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario





Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Beim Brennstoffeinsatz wurden mehrere sehr innovative Technologien mit berücksichtigt; einige sind noch relativ weit von der Markteinführung entfernt, werden aber bis zum Jahr 2035 für ein zusätzliches technisch-wirtschaftliches Potenzial mit einbezogen.

Für das Jahr 2035 ergibt sich ein maximales Effizienzpotenzial beim Strombedarf von 3 % und beim Brennstoffbedarf von 20 % für die Glasindustrie, während für Keramik das Effizienzpotenzial beim Strom 2 % erreicht und 16 % bei den Brennstoffen (jeweils bezogen auf den Energiebedarf des Frozen-Efficiency-Szenarios im Jahr 2035). Die jeweiligen Effizienzpotenziale der Diffusionsszenarien sind für den Strombereich erwartungsgemäß recht gering, weil der Schwerpunkt der Prozesstechnologien bei der Glasherstellung fast ausschließlich die Prozesswärme mittels Brennstoffen in dieser Branche betrifft (vgl. Tabelle 8-9). Ein Unterschied zwischen dem technischen und wirtschaftlichen Potenzial für den Strombereich wurde daher auch nicht ausgewiesen.

Tabelle 8-9: Strom- und Brennstoffbedarf der Diffusions-Szenarien in den Branchen Glas und Keramik in den untersuchten Prozessen, 2007 bis 2035 in PJ

Glas

Strom [PJ]	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	16,0	16,9	17,3	17,7	18,1	18,3
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0

Brennstoffe [PJ]	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	54,4	57,0	58,4	59,8	61,2	61,8
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	2,2	3,4	4,8	6,3	7,5
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	1,1	1,8	2,8	4,2	5,2
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,3	0,6	0,3	0,0	0,0

Keramik

Strom [PJ]	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	3,4	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brennstoffe [PJ]	**2007**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	18,7	18,7	19,0	19,3	19,5	19,5
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,4	0,6	0,9	1,3	1,5
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	0,2	0,8	1,1	1,3	1,5
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Im Gegensatz dazu sind die Effizienzfortschritte bis 2035 im Wirtschaftlichen Diffusions-Szenario (Beseitigung der derzeitigen Hemmnisse unterstellt) bei den Brennstoffen mit mehr als 10 % erheblich, insbesondere für Behälter- und Flachglas (vgl. Tabelle 8-9).

Die dargestellten Effizienzpotenziale der Keramikindustrie sind in den absoluten Daten zum Energiebedarf und zu den THG-Emissionen für die vier Diffusions-Szenarien zusammen mit den gleichen Produktionsveränderungen für die fünf Branchen erfasst (vgl. Tabelle 8-10). Im Vergleich zum Frozen-Efficiency-Szenario wird für das Marktpotenzial-Szenario eine Brennstoff-Effizienzsteigerung von 7,9 % in 2035 ausgewiesen (Bestand der heute bestehenden Hemmnisse). Diese Steigerung bedeutet eine Vermeidung von ca. 0,4 Mio. t CO_2-eq. Aufgrund von den angenommenen zusätzlichen Investitionen im Wirtschaftlichen Szenario könnte im Jahr 2035 eine etwa 16%ige Brennstoff-Effizienzsteigerung erzielt und etwa 0,5 Mio. t CO_2-eq. im Vergleich zum Szenario Frozen Efficiency vermieden werden.

Tabelle 8-10: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse und Teilbranchen (für alle Szenarien gleiche Mengen) 1000 t, 2007 – 2035

		Produktion [kt]					
Sektor	Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Glas	Behälterglas	4.422	4.493	4.601	4.706	4.818	4.870
	Flachglas	1.746	1.861	1.906	1.949	1.996	2.017
	Glasfasern	447	492	504	515	527	533
	Übriges Glas	945	1.039	1.064	1.088	1.114	1.126

		Produktion [kt]					
Sektor	Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Keramik	Feuerfestkeramik	1.094	1.116	1.121	1.163	1.163	1.160
	Fliesen, Platten, andere	1.268	1.242	1.289	1.291	1.332	1.329
	Haushaltswaren	56	57	57	57	58	58
	Sanitärkeramik	64	64	65	65	65	65
	Technische Keramik u. Sonstige	238	241	242	242	242	242

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs (Tabelle 8-13, Tabelle 8-14) für die Glas- und Keramikindustrien reflektiert die Effizienz-Potenziale für die strom- oder brennstoffrelevanten Produktgruppen. So fallen die brennstoffrelevanten Effizienzmaßnahmen in der Glasindustrie bei Hohlglas und Flachglas relativ hoch aus, während dies in der Keramikindustrie bei der Feuerfestkeramik, den Fliesen/Platten und bei technischer Keramik nicht der Fall ist.

Die Zahlen in den Tabellen (Tabelle 8-11 bis Tabelle 8-14) reflektieren **nicht** die insgesamt möglichen und wirtschaftlichen Effizienz-Maßnahmen der jeweiligen Branchen.

Denn die Wirkungen der Effizienz-Optionen der Querschnittstechnologien (z. B. Druckluft, Vakuum, Beleuchtung, Heizung, Ventilation) sind hier nicht berücksichtigt.

Tabelle 8-11: Resultierender absoluter Energiebedarf und THG-Emissionen je Produktgruppe nach Diffusions-Szenario – Teil I Glas, 2007 bis 2035

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Behälterglas	6,23	6,49	6,87	6,43	6,71	6,43	6,61	6,39	6,61
Flachglas	5,80	6,33	6,70	6,29	6,61	6,29	6,55	6,27	6,55
Glasfasern	1,71	1,93	2,04	1,92	2,02	1,92	2,00	1,91	2,00
Übriges Glas	2,26	2,54	2,69	2,53	2,66	2,52	2,63	2,52	2,63
Summe	16,00	17,28	18,29	17,17	18,00	17,16	17,79	17,09	17,79

	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Behälterglas	25,56	26,59	28,15	24,07	23,39	23,02	20,20	22,69	20,20
Flachglas	19,06	20,81	22,02	20,20	20,12	19,67	18,70	19,51	18,70
Glasfasern	4,65	5,24	5,54	5,14	5,20	5,05	4,96	5,01	4,96
Übriges Glas	5,13	5,78	6,12	5,63	5,64	5,51	5,30	5,46	5,30
Summe	54,40	58,42	61,83	55,04	54,36	53,24	49,16	52,67	49,16

	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Behälterglas	2.812	2.854	2.614	2.686	2.299	2.624	2.100	2.593	2.092
Flachglas	2.472	2.629	2.386	2.581	2.253	2.549	2.163	2.533	2.158
Glasfasern	608	664	582	657	560	652	544	648	544
Übriges Glas	767	836	725	823	692	815	669	811	668
Summe	6.659	6.982	6.308	6.748	5.804	6.640	5.475	6.585	5.462

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Abschließend sind die technischen Potenziale einzelner Prozesse und Produktgruppen für das Szenario Technische Diffusion in die Glas- und Keramikindustrie angegeben, die durch berücksichtigte Effizienzoptionen erzielt werden könnten (vgl. Tabelle 8-15 für Glas und Tabelle 8-16 für Keramik). Die hier dargestellten Potenziale sind als Differenz der Szenarien Frozen Efficiency und Technische Diffusion berechnet. Dabei bestehen wesentliche Potenziale für Brennstoffeinsparungen bei dem Szenario Technische Diffusion für Behälter- und Flachglasherstellung und für technische Keramik und Fliesen- und Plattenherstellung[72]. Hier sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass in diesem Szenario die mögliche Effizienzsteigerung aus rein technischer Sicht dargestellt wird, wenn wirtschaftliche Überlegungen völlig außer acht gelassen werden.

72 Die Prozentwerte sind als technisches Potenzial bezogen auf den Energieverbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario des Jahres 2035 berechnet.

Für die Glasindustrie insgesamt besteht nach heutiger Kenntnis für den Prozessenergiebedarf noch maximal ein technisches Effizienzpotenzial von 3 % bei Strom- und 20 % bei Brennstoffbedarf. Das Strompotenzial reflektiert **nicht** die insgesamt möglichen und wirtschaftlichen Effizienz-Maßnahmen. Darüber hinaus konnten aufgrund der Datenverfügbarkeit und der komplexer Produktionsprozesse nicht alle in Kapitel 8.3 aufgeführten Effizienzoptionen mit quantitativen Kennwerten einfließen.

Tabelle 8-12: Resultierender absoluter Energiebedarf und THG-Emissionen je Produktgruppe nach Diffusions-Szenario – Teil II Keramik, 2007 bis 2035

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Feuerfestkeramik	1,05	1,08	1,11	1,07	1,10	1,07	1,09	1,07	1,09
Fliesen, Platten, andere	1,04	1,06	1,09	1,05	1,07	1,05	1,06	1,04	1,06
Haushaltswaren	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34
Sanitärkeramik	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Technische Keramik u. Sonstige	0,77	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,77	0,76
Summe	3,44	3,50	3,58	3,48	3,52	3,46	3,49	3,46	3,49
	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Feuerfestkeramik	6,05	6,20	6,41	6,05	6,00	5,82	5,60	5,82	5,60
Fliesen, Platten, andere	6,84	6,96	7,18	6,73	6,56	6,48	5,96	6,40	5,96
Haushaltswaren	1,77	1,79	1,81	1,73	1,66	1,64	1,51	1,64	1,51
Sanitärkeramik	1,15	1,16	1,16	1,12	1,06	1,07	0,96	1,07	0,96
Technische Keramik u. Sonstige	2,88	2,93	2,93	2,83	2,68	2,69	2,43	2,69	2,43
Summe	18,69	19,04	19,49	18,46	17,95	17,70	16,45	17,63	16,45
	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Feuerfestkeramik	1.091	1.106	1.079	1.097	1.053	1.082	1.028	1.082	1.028
Fliesen, Platten, andere	969	975	940	960	901	944	865	939	865
Haushaltswaren	358	357	341	353	331	348	322	348	322
Sanitärkeramik	212	212	198	209	191	206	185	206	185
Technische Keramik u. Sonstige	1.201	1.212	1.165	1.205	1.149	1.196	1.133	1.196	1.133
Summe	3.831	3.861	3.722	3.824	3.626	3.776	3.534	3.771	3.534

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die größten relativen Effizienzpotenziale der Prozesse sind Folgende (vgl. Tabelle 8-15):

- Im Brennstoffbereich für die Herstellung von Hohlglas (28 %): Aufgrund einer Erhöhung des Scherbeneinsatzes (von 70 % auf das maximal technische Potenzial von 80 %), einer optimierten Verbrennung und Brennstoffsubstitution. Die schnelle Reaktion und Gemenge-Vorwärmung tragen dazu auch bei.
- Bei Flachglas (15 %) liefert die optimierte Verbrennung den größten Beitrag, gefolgt von schneller Reaktion und Low-NO_X-Brenner, allerdings sind nicht alle Maßnahmen in einem Betrieb zu realisieren, was im Modell auch differenziert wurde.
- Bei Glasfasern wirkt die optimierte Verbrennung zur Effizienzsteigerung stark mit.

Tabelle 8-13: Resultierender spezifischer Energiebedarf je Produktgruppe nach Szenarien – Teil I Glas, 2007 bis 2035

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Behälterglas	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Flachglas	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,2	3,3	3,2
Glasfasern	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Übriges Glas	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,4	2,3

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Behälterglas	5,8	5,8	5,8	5,2	4,8	5,0	4,1	4,9	4,1
Flachglas	10,9	10,9	10,9	10,6	10,0	10,3	9,3	10,2	9,3
Glasfasern	10,4	10,4	10,4	10,2	9,8	10,0	9,3	9,9	9,3
Übriges Glas	5,4	5,4	5,4	5,3	5,0	5,2	4,7	5,1	4,7

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 8-14: Resultierender spezifischer Energiebedarf je Produktgruppe nach Szenarien – Teil II – Keramikindustrie, 2007 bis 2035

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Feuerfestkeramik	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9
Fliesen, Platten, andere	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Haushaltswaren	6,1	6,1	6,1	6,1	6,0	6,0	5,9	6,0	5,9
Sanitärkeramik	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Technische Keramik u. Sonstige	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,2	3,1

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche		Technische	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Feuerfestkeramik	5,5	5,5	5,5	5,4	5,2	5,2	4,8	5,2	4,8
Fliesen, Platten, andere	5,4	5,4	5,4	5,2	4,9	5,0	4,5	5,0	4,5
Haushaltswaren	31,4	31,4	31,4	30,4	28,7	28,9	26,1	28,9	26,1
Sanitärkeramik	17,9	17,9	17,9	17,3	16,4	16,5	14,9	16,5	14,9
Technische Keramik u. Sonstige	12,1	12,1	12,1	11,7	11,1	11,1	10,0	11,1	10,0

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Tabelle 8-15: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (Technisches Potenzial) – Teil I Glas, 2020 und 2035

	Energie-Einsparpotenzial						THG Vermeidung		
	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brenn-stoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Glas	0,19	0,50	5,75	12,67	**3%**	**20%**	397	846	**11%**
Behälterglas	0,10	0,26	3,90	7,94	**4%**	**28%**	261	522	**17%**
Brennstoffsubstitution	-	-	-	-			15	27	
Erhöhung Scherbeneinsatz	-	-	1,67	2,40			99	141	
Gemenge Vorwärmung	-	-	0,69	1,61			41	95	
Low NOx Verbrenner	0,03	0,08	0,41	1,06			29	71	
Optimierte Verbrennung	-	-	0,72	1,77			42	104	
Schnelle Reaktion	0,07	0,18	0,41	1,10			36	84	
Flachglas	0,06	0,15	1,30	3,33	**2%**	**15%**	96	229	**8%**
Abwärmenutzung	-	-	0,12	0,31			7	18	
Brennstoffsubstitution	-	-	-	-			9	17	
Low NOx Verbrenner	0,02	0,06	0,31	0,80			22	54	
Optimierte Verbrennung	-	-	0,54	1,34			32	79	
Schnelle Reaktion	0,03	0,09	0,33	0,87			25	60	
Glasfasern	0,01	0,03	0,23	0,58	**2%**	**10%**	16	38	**5%**
Optimierte Verbrennung	-	-	0,14	0,35			8	21	
Schnelle Reaktion	0,01	0,03	0,09	0,23			7	17	
Übriges Glas	0,02	0,06	0,32	0,82	**2%**	**13%**	24	58	**6%**
Brennstoffsubstitution	-	-	-	-			1	3	
Low NOx Verbrenner	0,01	0,04	0,08	0,21			7	17	
Optimierte Verbrennung	-	-	0,15	0,37			9	22	
Schnelle Reaktion	0,01	0,02	0,09	0,24			7	17	

Die Potenziale sind als Differenz der Szenarien Frozen Efficiency und Technische Diffusion berechnet

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Für die Keramikindustrie insgesamt besteht nach heutiger Kenntnis für den Prozessenergiebedarf noch maximal ein technisches Effizienzpotenzial von 2 % beim Strom- und 16 % beim Brennstoffbedarf (vgl. Tabelle 8-16).

Das Stromeffizienz-Potenzial reflektiert **nicht** die insgesamt möglichen und wirtschaftlichen Effizienz-Maßnahmen (z. B. der Querschnittstechnologien). Darüber hinaus konnten aufgrund der Datenverfügbarkeit und der komplexen Produktionsprozesse innerhalb der Keramikindustrie nicht alle in Kapitel 8.3 aufgeführten Effizienzoptionen mit quantitativen Kennwerten in die Untersuchung einfließen.

Die größten relativen Effizienzpotenziale der Prozesse in den fünf Produktgruppen der Keramikindustrie weisen folgende auf:

- im Strombereich bei Sanitärkeramik und Haushaltswaren mit 3 %, technische Keramik und die Herstellung von Fliesen, Platten usw. jeweils mit 2,6 %
- und im Brennstoffbereich die H. v. technischer Keramik (17,2 %), die H. v. Sanitärkeramik, Haushaltswaren und Fliesen, Platten, usw jeweils mit ca. 17 %. Hier sind in allen Branchen Effizienz-Potenziale in den Prozessen zu realisieren.

Tabelle 8-16: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (Technisches Potenzial) – Teil II Keramik, 2020 und 2035

	Energie-Einsparpotenzial						THG Vermeidung		
	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brenn-stoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Keramik	0,04	0,09	1,41	3,04	**2%**	**16%**	90	188	**5%**
Feuerfestkeramik	0,01	0,02	0,38	0,82	**2%**	**13%**	24	50	**4%**
Energiemanagement System	0,01	0,01	0,09	0,19			6	12	
Integrierte Prozessführung	0,00	0,01	0,07	0,14			5	9	
Interne Wärmenutzung	-	-	0,17	0,38			10	23	
Trocknungssystem	-	-	0,05	0,11			3	6	
Fliesen, Platten, andere	0,01	0,03	0,56	1,22	**3%**	**17%**	35	75	**7%**
Energiemanagement System	0,01	0,02	0,15	0,32			10	21	
Integrierte Prozessführung	0,01	0,01	0,12	0,24			8	15	
Interne Wärmenutzung	-	-	0,29	0,66			17	39	
Haushaltswaren	0,00	0,01	0,14	0,30	**3%**	**17%**	9	19	**5%**
Energiemanagement System	0,00	0,01	0,04	0,08			3	5	
Integrierte Prozessführung	0,00	0,00	0,03	0,06			2	4	
Interne Wärmenutzung	-	-	0,07	0,16			4	10	
Sanitärkeramik	0,00	0,01	0,09	0,20	**3%**	**17%**	6	12	**6%**
Energiemanagement System	0,00	0,00	0,02	0,05			2	3	
Integrierte Prozessführung	0,00	0,00	0,02	0,04			1	3	
Interne Wärmenutzung	-	-	0,05	0,11			3	6	
Technische Keramik u. Sonstige	0,01	0,02	0,24	0,50	**3%**	**17%**	16	32	**3%**
Energiemanagement System	0,01	0,01	0,06	0,13			5	9	
Integrierte Prozessführung	0,00	0,01	0,05	0,10			4	7	
Interne Wärmenutzung	-	-	0,13	0,28			7	16	

Die Prozentwerte sind als technisches Potenzial bezogen auf den Energieverbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario des Jahres 2035 berechnet

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

8.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren

Neben einer Literaturauswertung wurden anhand von Fragebögen, die Fachleuten aus den beiden Branchen zugesandt wurden, die nach ihrer Ansicht bestehenden Hemmnisse zusammengestellt. Bei den Fragenbögen wurden Vertreter aus den jeweiligen Anwender-Unternehmen der Glas- und Keramikindustrie befragt, ebenso angewandte Forscher und Vertreter von Herstellern von Anlagen und Maschinen für die Glas- und Keramikindustrie.

Aus Sicht der Verbände, Forschungeinrichtungen und Unternehmen werden Energieeffizienzmaßnahmen nicht selten durch ***geforderte Produkt- und Prozesseigenschaften***[73] negativ beeinflusst, insofern stellen diese Produktanforderungen ein wichtiges Hemmnis für Energieeffizienz dar. Beispielsweise werden die Qualitätsanforderungen

73 Aus Sicht von der folgenden Aussage „Never touch a running system“ und „Änderungen bedeuten Aufwand und Widerstand“.

von Fensterglas oder Autoglas durch die maximal erlaubte Anzahl an Lufteinschlüssen hochgeschraubt, die zu einem hohen Energieaufwand im Schmelzprozess führen. Darüber hinaus führt auch der vermehrte Energieeinsatz für Umweltschutztechnologien in der Produktion selbst zu einer Verschlechterung der Energieeffizienz.

Weiterhin wurde ***Zeit-, Kompetenzen- oder Personalmangel von Mitarbeitern,*** insbesondere für KMU, als eher wichtiges oder sehr wichtiges Hemmnis gesehen. Außerdem sind Unternehmen und Technologieanbieter der Meinung, dass die ***falsche Messung, mangelhafte Auswertung von Messwerten oder einfach fehlende Messwerte*** zum Energiebedarf ein sehr wichtiges Hemmnis für Energieeffizienz sind.

Auch ***fehlende bauliche Möglichkeiten (fehlender Raum)*** wurde mehrfach als Hemmnis von den Technologieanbietern genannt.

Die kontinuierliche Vermessung des Energiebedarfs einer Schmelzanlage bzw. eines Ofens in der Keramik- oder Glasindustrie ist heute durch ausreichende Messtechnik gegeben; mehr als 90 % der Produzenten würden den Energiebedarf auch permanent beobachten lassen. Allerdings werden die laufend anfallenden Messergebnisse häufig nicht weiter geprüft und Abweichungen nicht hinterfragt. Diese ***nicht weiter erfolgende Verarbeitung der Messdaten*** sei ein großes Hemmnis, da fehlerhafte Regelung oder verminderte Wirkungsgrade nicht rechtzeitig, sondern erst sehr spät (manchmal nach Jahren) erst wahrgenommen würden und eine Effizienzverbesserung erreicht werde.

Aus Sicht von Technologieanbieter und Unternehmen ist die ***nicht verursachungsgerechte Energiekostenumlegung*** auf einzelne Produktionsmaschinen und -linien ein sehr wichtiges Hemmnis für die Durchdringung von Energieeffizienz in der Glas- und Keramikindustrie. In einigen Unternehmen werden diese Kosten schon umgelegt, aber es könnte verbessert werden.

Aus Sicht von Unternehmen, Technologieanbieter, Forschung und Verbände werde meistens ***zu sehr auf die Höhe der Investionssumme und zu wenig auf die Energiekosten während des Betriebes der Anlagen*** geachtet (fehlende Lebenskostenanalyse).

Zudem werden die Entscheidungen für Energieeffizienz-Maßnahmen in den meisten Unternehmen auf Basis der ***Amortisationszei***t getroffen. Diese Routine ist als sehr wichtiges (wenn nicht das wichtigste) Hemmnis zu betrachten, da die meisten Investitionen 10 bis 15 Jahre Lebenszeit in der Glas- und Keramikindustrie haben. In größeren Unternehmen und Familien-Unternehmen werden die ***Lebenszykluskosten*** teilweise

betrachtet. Aus Sicht der Technologieanbieter sind die Kunden, insbesondere die Kapital-Gesellschaften, häufig nicht gewillt, zukunftsorientiert zu investieren.

Durch die Kundenanforderungen haben sich die ***Hersteller an diese Entscheidungsroutine angepasst.*** Allenfalls wird die dynamische Amortisationszeit auch von Technologieherstellern berechnet, aber viele der Kunden rechnen nur mit einer statischen Amortisationszeit von zwei bis drei Jahren, sodass sie viele rentable Entwicklungen nicht akzeptieren würden.

Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen werden mit ***nachrangiger Priorität*** ausgeführt. Diese Praxis halten Unternehmen, Technologieanbieter und teilweise die Verbände und die Forschung halten für ein sehr wichtiges bis eher wichtiges Hemmnis.

Als eher wichtig bis sehr wichtiges Hemmnis ist die ***mangelnde Motivation der Mitarbeiter und Belegschaft bei der Umsetzung von organisatorischen Maßnahmen*** aus Sicht von Unternehmen, Forschung und Verbänden.

Die Nutzung von Abwärme wurde in beiden Branchen als Energieeffizienz-Maßnahme identifiziert. Bei der Identifizierung von Abwärmenutzungsoptionen ist die ***große Entfernung zu Wärmeabnehmern*** (hohe Investitionen) ein hemmender Faktor zur Durchsetzung dieser Maßnahme.

Weiterhin spielt die Materialeffizienz eine große Rolle, insbesondere für die Behälterglasindustrie. Allerdings sind ***Scherben teilweise verunreinigt durch Fremdkörper und teilweise nicht zu erhalten*** und von daher ein limitierender Faktor für diese Effizienzmaßnahme. Überdenken des Recyclingprozesses bzw. der Farbanforderungen bei Behälterglas in weiß (Lebensmittel) wird als fördernder Faktor empfohlen.

Fördernde Faktoren aus Sicht der Unternehmen, Technologieanbieter und Verbände sind Imagevorteile des Unternehmens bei Herausstellung der Energieeffizienzbemühungen sowie die Identifizierung der Geschäftsleitung mit dem Thema der Energieeffizienz.

8.6 Branchenspezifische politische Instrumente

8.6.1 Bestehende Instrumente

Zu den existierenden politischen und branchenspezifischen Instrumenten der Energieeffizienz in der Glas- und Keramikindustrie zählen die Selbstverpflichtungen zur Klimavorsorge dreier Industrieverbände, deren Netto-Wirkungen allerdings konträr diskutiert werden.

8.6.1.1 Selbstverpflichtungen zur Klimavorsorge der Industrie

Glasindustrie

In April 2008 erklärte sich die Glasindustrie in Deutschland wiederum bereit, die spezifischen CO_2-Emissionen bis 2012 um bis zu 20 % (Basisjahr 1990) vor dem Hintergrund der Fortführung der Klimaschutzvereinbarung zu senken (aktualisierte Selbstverpflichtungserklärung). Außer CO_2 werden keine anderen Treibhausgase (CH_4, N_2O, PFC, HFC, SF_6) in der Glasindustrie freigesetzt. SF_6 wird auf Grund freiwilliger Vereinbarungen von den Fensterglas-Herstellern nicht mehr verwendet.

Die Glasindustrie hatte sich auf freiwilliger Basis verpflichtet, bis zum Jahre 2005 bezogen auf das Basisjahr 1990 ihre spezifischen CO_2-Emissionen um 10 % zu senken. Dieses Ziel hat die Glasindustrie nach Aussagen der Monitoring-Berichte des RWI erreicht und sogar übertroffen[74]: Rückgang der gesamten CO_2-Emissionen der Glasindustrie um 9.8 % und der spezifischen CO_2-Emissionen im gleichen Zeitraum um 21,5 % (RWI 2010). Allerdings ist beim Monitoring kritisch zu hinterfragen, dass hier nicht nur zusätzliche Energieeinsparungen bzw. CO_2-Minderungen aufgrund der Selbstverpflichtungen gemessen werden, sondern in Kombination mit dem autonomen Fortschritt.

Keramikindustrie

Die Keramikindustrie verfügt über zwei Selbstverpflichtungen für die Feuerfeste Keramik und für die Fliesen- und Plattenindustrien.

- Die Feuerfestindustrie hat sich in ihrer aktualisierten Selbstverpflichtungserklärung von 2000 ein Reduktionsziel bis 2012 von 35 % ihrer spezifischen CO_2-Emissionen gegeben.
- Der Verband der Fliesen- und Plattenindustrie hat in seiner bestehenden Selbstverpflichtung einige Erweiterungen eingebracht und die Verminderung der spezifischen CO_2-Emissionen je Tonne in zwei Stufen festgelegt. Das erste Ziel bis 2005 war eine Absenkung der spezifischen CO_2-Emissionen um 22 – 26 % gegenüber 1990. Bis 2012 sollen nunmehr die spezifischen Emissionswerte bis zu 30 % gegenüber 1990 reduziert werden. Allerdings hat der Verband einen maximalen Zielwert von 254 CO_2/t für die Feuerfestindustrie und von 397 CO_2/t für Fliesen und Platten festgesetzt. Für die anderen Treibhausgasemissionen ist diese Verpflichtung nicht von Bedeutung.

---

74 Grundlage für die Berechnung der CO_2-Reduktionen sind die Daten des Statistischen Bundesamtes. Das Monitoring wurde von RWI durchgeführt.

Seit 1990 bis 2009 (RWI, 2010) sind die gesamten jährlichen CO_2-Emissionen der Keramikindustrie (Fliesen, Platten) um 38,6 % und für die Feuerfestindustrie um 63 % zurückgegangen. Die spezifischen CO_2-Emissionen der Keramikindustrie wurden im gleichen Zeitraum um 20,5 % verringert. Auch im Jahr 2009 wurde damit das Ziel für 2005 der Keramikindustrie nicht erreicht.

8.6.2 Weitere Empfehlungen zu Instrumenten

Angesichts der erheblichen Energieeffizienz-Potenziale der Branche und der großen Hemmnisse ihrer Realisierung sind weitere Maßnahmen der Branchenverbände in Kooperation mit der Bundesregierung unbedingt erforderlich. Diese sollten sowohl Informations- und Fortbildungskampagen umfassen als auch die Bildung von Energieeffizienz-Netzwerken, intensivere Beratung und Entwicklungsarbeiten.

8.6.2.1 Informations- und Fortbildungskampagnen

Nach den Gesprächen mit Experten und Verbänden der Glas- und Keramikindustrien empfehlen die Autoren

- Kampagnen als Information und Fortbildung zur Investitions-Bewertung bei Herstellern und Anwendern in Kooperation seitens der Branchen-Verbände mit Schwerpunkt auf Wirtschaftlichkeitsberechnungen (Barwert, Lebenszykluskosten, interne Verzinsung).
- Eine Informations- und Fortbildungskampagne der Verbände der Glas- und Keramik-Iindustrie und des ZVEI zu energietechnischen Messverfahren und kostengünstigen
- Energiemanagement-Systemen insbesondere für KMU (kontinuierliche Auswertung der Messergebnisse der energieverbrauchenden Anlagen).
- Eine Informations- und Fortbildungskampagne über die Thematik der Wärmeintegration für die Keramikindustrie mit Beispielen von ***Best Practices***.
- Eine Informationskampagne für die Geschäftsführungen der Unternehmen, insbesondere der KMU, zu Themen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen, des energietechnisch unterstützen Einkaufs, des Energie-Controlling und der Öffentlichkeitsarbeit unter Energie- und Klimaschutzgesichtspunkten.

8.6.2.2 Netzwerke, Beratung und Entwicklung

Ein Energieeffizienzprogramm der Bundesregierung könnte folgende Punkte umfassen:

- Zusammen mit großen Unternehmen der Glas- und Keramikindustrie sowie des VDMA ein F&E-Programm zur Weiterentwicklung von aussichtsreichen Brenner-, Schmelz- und Ofenkonzepten realisieren.
- Die Etablierung mehrerer lernender Energieeffizienz-Netzwerke für mittlere Unternehmen der jeweiligen Branchen würde den Erfahrungsaustausch zu neuen Technologien wesentlich beschleunigen und die Transaktionskosten der Energieverantwortlichen reduzieren. Wettbewerbsvorbehalte bei der Teilnahme sollten dadurch vermieden werden, dass Teilnehmer eines Netzwerkes nicht die gleichen Kunden haben.

8.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bei der Betrachtung der historischen Entwicklung des Endenergiebedarfs der Glas- und Keramikindustrie beobachtet man einen geringen Rückgang von lediglich 1 % von 1995 (71 PJ) bis 2007 (70 PJ) für die Glasindustrie. Eine starke Entkopplung zwischen Produktion und Endenergieverbrauch ist in der Feuerfestkeramikindustrie mit einem Rückgang des Endenergiebedarfs von 23 % von 1995 bis 2007 zu beobachten. Die Produktion von Feuerfestkeramik blieb im gleichen Zeitraum praktisch konstant. Die Herstellung von Fliesen, Platten, usw. zeigt – neben deutlichen Produktionsfluktuationen – einen abnehmenden Trend zwischen 1995 und 2007 und damit einen sinkenden Energieverbrauch (-16 % bis 2007).

Die Analyse der Technologien und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Glas- und Keramikindustrie hat gezeigt, dass mit den ausgewählten 11 Effizienzoptionen eine Reduktion des Strombedarfs um 3 % und des Brennstoffbedarfs um 16 bis 20 % bis 2035 technisch möglich ist (jeweils im Vergleich zu einem Frozen-Efficiency-Szenario). Die Querschnittstechnologien wie Motoren, Pumpen, Beleuchtung und Kälteerzeugung und damit verbundene erhebliche Effizienzpotenziale sind explizit vom Untersuchungsgegenstand ausgeschlossen.

Angesichts der erheblichen Energieeffizienz-Potenziale der Branche und der großen Hemmnisse ihrer Realisierung sind weitere Maßnahmen der Branchenverbände in Kooperation mit der Bundesregierung unbedingt erforderlich. Diese sollten sowohl Informations- und Fortbildungskampagen umfassen als auch die Bildung von Energieeffizienz-Netzwerken, intensivere Beratung und Entwicklungsarbeiten.

Fast alle betrachteten Effizienz-Technologien sind am Anfang der Implementierungsphase. Die Realisierung von Energieeffizienzpotenzialen selbst hängt einerseits von Re-lnvestitionszyklen und räumlichen Möglichkeiten ab, andererseits in erheblichem Umfang von der Verminderung von Hemmnissen insbesondere in den mittelständischen Unternehmen der Glas- und Keramikindustrie. Wichtig wäre, die weiteren vorge-

schlagenen Maßnahmen der Selbstorganisationen der Branche, des BVGlas, HVG-DGG und VDMA und weiterer Akteure möglichst bald zu realisieren.

Trotz der hier beschriebenen und erreichbaren Energieeffizienzsteigerungen liegen noch weitere wesentliche Effizienzpotenziale bei innovativen Technologien in den jeweiligen Prozessen vor, wie z. B.

- der Einsatz von Hochgeschwindigkeits-Impuls-Brenner in der Keramikindustrie. Diese gehören zu Brennern und Beheizungssystemen mit multivalentem Einsatz;
- der Einsatz von Rekuperator- und Regeneratorbrennern und die weitere Entwicklung von des Porenbrenners bei der Glasherstellung;
- die Nutzung von verbesserter Messtechnik (Produktqualität und Energieeffizienz) und die Wärmenutzung im Verbund von Brennofen und Trockner in der Keramikindustrie,
- der Einsatz von Glas-FLOX-Hochtemperatur Verbrennungstechnologie bei der Glasindustrie.

Die Umsetzung der analysierten Effizienztechnologien in der Glas- und Keramikindustrie (insb. bei Schmelz- und Sinterprozessen) werden – neben den verminderten Energiekosten – weitere Vorteile mit sich bringen, darunter z. B. die Verbesserung der Produktqualität, die Steigerung der Effizienz bestehender Industrieofenanlagen und eine Reduktion der CO_2-Emissionen um gut 2 Mio. t CO_2 bis 2035.

Die Branchen der Glas- und Keramikindustrie sind einem enormen Kostendruck durch steigende Energiepreise und einem starken nationalen und internationalen Wettbewerb ausgesetzt. Aus diesem Grund erkennen viele Unternehmen den Vorteil, der mit einer Realisierung der vorhandenen kurz- und langfristigen Energieeffizienzpotenziale verbunden ist, soweit sie sich wirtschaftlich – meist im Re-Investitionszyklus wirtschaftlich realisieren lassen.

8.8 Literatur

AGEB (2009): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1990-2007 und Auswertungstabellen 1990-2008. Stand 28. Oktober 2009. DIW Berlin, EEFA, Köln http://www.ag-energiebilanzen.de

BV Glas (2009): Bundesverband Glasindustrie e.V. Jahresbericht 2008 (und frühere Jahre). www.bvglas.de

Conradt, R.; Overath, J.; Roger, U.; Schaefer-Rolffs, W.; de Hesselle, M.(2005): Zur Darstellung des Energieverbrauches von Glassschmelzwannen. DGG Journal, 4 (2005), nr. 6 Offenbach

EU Commission (2007): Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry August 2007

Fleischmann, B.; Giese, A.(2008): Verbesserung des direkten Wärmeeintrages in die Glasschmelze durch Optimierung der Verbrennunsparameter bei unterschiedlichen Befeurungsarten. Abschlussbericht, 2008

Fleischmann, B.; Giese, A. (2009): Spektral 2 – Verbesserung des direkten Wärmeeintrages in die Glasschmelze durch Optimierung der Verbrennungsparameter bei unterschiedlichen Befeuerungsarten. AiF-Forschungsvorhaben 15015 N, Abschlussbericht

Fleischmann, B.; Wiltzsch, S. (2009): Einsatzmöglichkeiten für Porenbrenner bei der Glasherstellung. Forschungsprogramm INNONET. Proceedings 83. Glastechnische Tagung 18. – 20. Mai 2009 in Hameln, Deutsche Glastechnische Gesellschaft Verlag

Fraunhofer ISI; ECOFYS (2009): Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012 – Sectors reports for glas and ceramics industries. Karlsruhe

GWI (2008): Glas herstellen – energieeffizient und schadstoffarm. Gaswärme Institut e.V. Essen

Gaswärme Institut; Osram GmbH; Hotwork International GmbH, Partenstein (Hrsg.) (2007): Energieeinsparung und Schadstoffminderung an Glasschmelzwannen mit rekuperativer Luftvorwärmung durch Einsatz der Flammenlose Oxydation (Glas-FLOX). Abschlussbericht BMWi-Verbundprojekt 0327341

Interviews (2010): Fragenbogen und technische Gespräche mit BVGlas, RWTH Aachen, Deutsche Hüttentechnische Verein, Gas Wärme Institut Essen, Saint Gobain AG, Villeroy & Boch AG, Firma Riedhammer GmbH, Firma Sorg GmbH im Mai 2010

IPPC, EU Commission (2009): Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry. July 2009

Jochem, E.; Angerer, G.; Ball, M.; Bradke, H.; Celik, B.; Eichhammer, W.; Mannsbart, W.; Marschneider-Weidemann, F.; Walz, R.; Wietschel, M.; Nathani, C.; Schön, M. (2003): Werkstoffeffizienz – Systemanalyse zu den Kreislaufpotenzialen energieintensiver Werkstoffe und ihrem Beitrag zur rationellen Energienutzung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag

Pfaender, H. G. (1997): Schott Glaslexikon, 5. überarbeitete Auflage. Landsberg am Lech: mvg-verlag

Radgen, P.; Jochem, E.; Tönsing, E. et.al.(1998): Zwischenbilanz zur rationellen Energienutzung bei Thermoprozeßanlangen, insbesondere Industrieöfen. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 0326984, Karlsruhe: Fraunhofer ISI

Reuße, E.; Uhig, V.; Trimis, D. (2009): Energieeinsparung und Qualitätsverbesserung in der Glasindustrie durch innovative Heiztechniken. Proceedings 6. Aachener Ölwärme-Kolloquium 16.-17. September 2009 in Hamburg, Deutschland, Shaker Verlag

RWI (2009): Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2008. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung

Schmid, J. (2009). Mehr Energieeffizienz bei der Glasherstellung. Frankfurt am Main: Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

Statistisches Bundesamt (2009a): Fachserie 4, Reihe 4.3, Kostenstrukturstatistik 2007. Wiesbaden. Stand: 18.5.2009

Statistisches Bundesamt (2009b): Erhebung über die Energieverwendung. Energieverbrauch nach Energieträgern. Berichtszeitraum 2007 (und frühere Jahre) sowie Stromerzeugungsanlagen 2007 (und frühere Jahre) der Betriebe im Bergbau und Verarbeitenden Bergbau. Brennstoffeinsatz für die Strom- und/oder Wärmeerzeugung nach Energieträgern. Wiesbaden

Verband der industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (1998): Praxisleitfaden zur Förderung der rationellen Endergieverwendung in der Industrie. Essen: Verlag Energieberatung GmbH

VDI DIN (2010): Vorträge zu Expertenforum „Energieeffizienz in Industrieanlagen- und Ofenbau“. April 2010, BMU, Bonn

VDI Richtilinien (1999): Emissionsminderung – Glashütten. 13.040.40, VDI 2578

VDI Richtilinien (2006): Emissionsminderung – Keramische Industrie, 13.040.40, 81.020, VDI 2585

Weber, H. (2009): Energieeffizienz in der Keramischen Industrie – Technische Entwicklungen im Ofenbau. Gaswärme International (58), Nr. 7-8/2009

9 Ernährungsgewerbe

F. Idrissova, E. Jochem (IREES)

Im Vergleich zu vielen anderen Industriesektoren ist die Produktionsstruktur der Ernährungsindustrie äußerst divers, was nicht nur die Breite der Produktpalette und damit verbunden die Breite der Produktionsverfahren sowie die Größe und Art der Unternehmen betrifft, sondern auch die Anwendung von unterschiedlichen energieintensiven Verfahren und Technologien. Die Ernährungsindustrie zeichnet sich auch dadurch aus, dass sie relativ unabhängig ist von Konjunkturschwankungen. So erreichte die Branche selbst im Krisenjahr 2009 eine kleine Umsatzsteigerung (real + 0,3 %; BVE 2010).

9.1 Branchenbeschreibung und Auswahl der Prozesse

9.1.1 Branchenbeschreibung

Die Ernährungsindustrie ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Dieser Industriesektor ist erheblich von klein- und mittelständischen Unternehmen geprägt, er hat aber auch international operierende Großunternehmen.
- Außerdem beobachtet man eine stetige Konzentration der Unternehmen, insbesondere als Folge strategische Kooperationen, Fusionen und Firmenübernahmen.

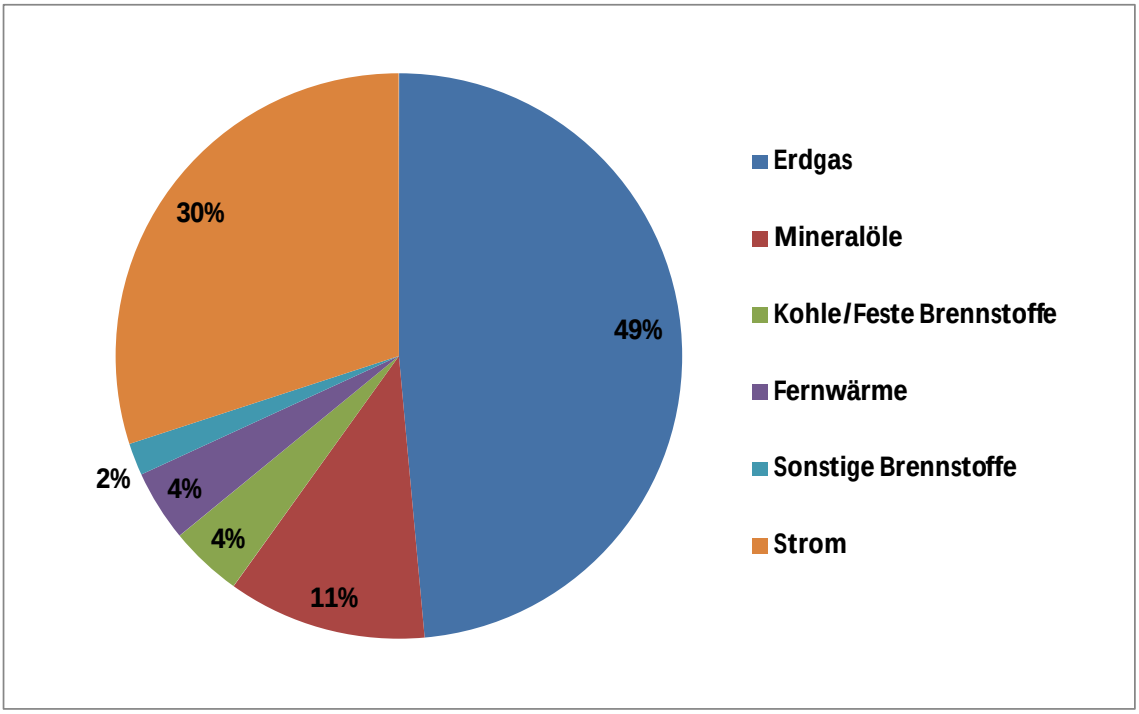
Beide Merkmale und steigende Energiepreise führen zu einem wachsenden Kostendruck auf deutsche Unternehmen im Ernährungsgewerbe. In dieser Hinsicht gewinnt die Energieeffizienz mehr an Bedeutung als eine Möglichkeit, die Produktionskosten längerfristig zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu stärken.

Mit einem Endenergiebedarf von ca. 209 PJ/a (in 2010) gehört die Ernährungsindustrie zu den sechs energieintensivsten Sektoren der deutschen Industrie. Sie nimmt etwa 8 % des Endenergieeinsatzes des gesamten verarbeitenden Gewerbes in Anspruch (AGEB 2010). Der Schwerpunkt des Energieeinsatzes in der Ernährungsindustrie liegt bei der thermischen Energie zur Bereitstellung der Prozesswärme (vgl. Abbildung 9-1).

Die Hauptverbraucher des Energieeinsatzes im Ernährungsgewerbe sind Prozesswärme, Prozesskälte, Kühlung, Kraftbedarf für Elektromotoren und weitere verschiedene Prozesse wie z. B. Transport, Abfüllung und Verpackung. Hierbei werden

- Brennstoffe hauptsächlich für die Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt (Warm- und Heißwasser, Brühen, Hygienisieren, Trocknen, Räuchern), während
- elektrische Energie zur Deckung des Kraftbedarfs (z. B. zur Kühlung, Drucklufterzeugung, Vakuumerzeugung, Transport) und die Beleuchtung eingesetzt wird; ihr Anteil beträgt 30 % des Endenergiebedarfs der Branche.

Abbildung 9-1: Anteile der Energieträger in der deutschen Ernährungsindustrie, 2007



Quelle: AGEB 2009

9.1.2 Auswahl der Branchen

Um angesichts der Vielfalt der Prozesse und Industriezweige der Ernährungsindustrie die wichtigsten Energieeffizienzpotenziale und -optionen ermitteln zu können, wurden in der Analyse die sechs energieintensivsten Branchen dieses Industriezweiges ausgewählt und die dazugehörige Prozesse klassifiziert, die den größten Teil des Energiebedarfs verursachen. Zu den ausgewählten Branchen mit erheblichem thermischem Energiebedarf zählen:

- die Zuckerindustrie,
- die milchverarbeitende Industrie,
- Herstellung von Backwaren,
- Fleischverarbeitung,
- Herstellung von Bier und
- Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen[75].

Zusammen weisen die sechs ausgewählten Branchen einen Endenergiebedarf von ungefähr 105 PJ pro Jahr auf. Dieser Endenergiebedarf entspricht etwa 52 % des gesamten Endenergieeinsatzes der Ernährungsindustrie in Deutschland. Dabei ist der

75 Die WZ Klassifizierung nach Jahren 2003 und 2008 findet man in der Tabelle 9-1.

Energiekostenanteil am Bruttoproduktionswert bei der Stärkeindustrie mit fast 7 % und Zuckerindustrie mit ca. 6 % im Vergleich zur durchschnittlichen 2,5 % im gesamten Sektor am größten (vgl. Tabelle 9-1).

Tabelle 9-1: Energiekosten in Mrd. € und deren Anteil am Bruttoproduktionswert für ausgewählten Branchen nach WZ 2003 und WZ 2008 Klassifizierung

Branche	**Klassifikation der Wirtschaftszweige**		**Energiekosten**	
	WZ 2003	WZ 2008	Mrd. €	Anteil am Bruttoproduktionswert %
Herstellung von Zucker	15.83	10.81	0,17	5,8
Milchverarbeitung	15.51	10.51	0,44	1,7
Herstellung von Bier	15.96	11.05	0,24	3,0
Fleischverarbeitung	15.13	10.13	0,36	2,0
Herstellung von Backwaren	15.81	10.71	0,45	3,6
Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen	15.62	10.62 10.89	0,11	6,7

Quelle: Statistisches Bundesamt 2009a

Im Folgenden wird die aktuelle wirtschaftliche Lage dieser ausgewählten Teilsektoren kurz beschrieben.

Herstellung von Zucker

Nach Angaben des Vereins der Zuckerindustrie wurden in der Bundesrepublik Deutschland im Wirtschaftsjahr 2008/09 in 34.436 landwirtschaftlichen Betrieben Zuckerrüben angebaut. Die Zuckerrübenanbaufläche nahm 2008 mit 364.000 ha etwa 3 % der gesamten Ackerfläche ein. Die auf dieser Fläche angebauten und geernteten Zuckerrüben wurden in 20 Zuckerfabriken zu Zucker verarbeitet, die rund 5.100 Mitarbeiter beschäftigen. Die Anzahl der Beschäftigten in der Zuckerindustrie ging zwischen 1995 und 2008 bei konstanter Gesamtverarbeitungskapazität um 43 % zurück (WVZ 2009a).

Ungewöhnlich für eine Branche in einer Marktwirtschaft, aber charakteristisch für die Zuckerindustrie ist die so genannte Zuckermarktordnung, anhand derer Produktionsniveau und -entwicklung bestimmt werden, und den Zuckerherstellern mittels Quoten feste Preise garantiert werden (EU-Zuckermarktordnung 2001). Die Anfang 2006 in Kraft getretene Reform der Zuckermarktordnung führte u. a. zu erheblichen Preissenkungen gegenüber dem Preisniveau bis 2006 sowie einer Reduzierung der Produktionsquote (RWI 2009). Die Auswirkungen der Reform des europäischen Zuckermarktes

waren 2008 deutlich zu spüren, nachdem die deutsche Zuckerindustrie Ende 2007 und Anfang 2008 insgesamt rund 13,5 % ihrer Produktionsquote für Zucker aufgegeben hatte. Dementsprechend kam es im Jahr 2008 gegenüber 2007 zu einem Rückgang der Rübenverarbeitung um rund 2,1 Mio. t bzw. 8,5 % auf 23 Mio. t. Dabei betrug der Umsatz der Zuckerindustrie 2008 etwa 2,7 Mrd. € (RWI 2009).

Milchverarbeitung

Nach der Bilanz des Milchindustrieverbandes wurde von den deutschen Molkereien in 2008 ca. 27,7 Mio. t Milch erfasst. Dies stellte die höchste Milchanlieferung seit 1990 dar. Aufgrund von etwas höheren Kuhbeständen und weiter steigenden Milchleistungen ist die Milcherzeugung gestiegen. Gleichzeitig ist die Milchindustrie in ihrer Preisentwicklung in den letzten Jahren aufgrund verschiedener Einflüsse in Europa und auf den Weltmärkten für Milchprodukte erheblichen Schwankungen ausgesetzt gewesen. Die Branche hatte im Jahre 2008 in Deutschland 138 Unternehmen.

Der Milchmarkt ist sehr vom Verbraucherverhalten abhängig, das im Bereich Milchprodukte sehr preissensibel ist. Konsumzurückhaltung der Verbraucher wegen höherer Preise und bei verhältnismäßig kühlen Sommern (z. B. 2008) sowie die stagnierende Bevölkerung sind die Hauptfaktoren der Stagnation auf dem Markt für Konsummilch und Milchfrischprodukte, aber auch bei Butter und Käseprodukten (MIV 2009).

Herstellung von Backwaren

Der Backwarenherstellung in Deutschland zeichnet sich nach wie vor durch eine Vielzahl kleiner und mittlerer Unternehmen aus. Laut Angaben des Verbands Deutscher Großbäckereien (2009) nimmt allerdings die Gesamtzahl der Unternehmen seit Jahren ab. So hatte die Branche im Jahre 2007 16.179 Unternehmen (ein Rückgang von etwa 20 % gegenüber dem Jahr 2000). Davon hatten 2.372 Unternehmen im Jahre 2008 mehr als 20 Beschäftigte (Statistisches Bundesamt 2009a).

Der Konzentrationstrend setzt sich in der Backwarenbranche ähnlich wie in der gesamten Ernährungsindustrie verstärkt fort. Bezogen auf den Gesamtumsatz der Backwarenbranche von rund 16,2 Mrd. € (2007) entfallen mehr als 12,2 Mrd. € (fast 76 %), auf die 2.076 Betriebe mit einem Umsatz von mehr als 1 Mio. €. Die 27 größten Unternehmen (mit dem Umsatz von mehr als 50 Mio. bis über 250 Mio. €) haben mit 26,8 % einen höheren Marktanteil als die 14.076 Unternehmen (mit dem Umsatz weniger als 1 Mio. €) mit insgesamt 24,1 % (VDG 2009).

Fleischverarbeitung

Im Jahre 2009 konnte die Fleischwirtschaft eine Umsatzsteigerung von 10,4 % auf 31,1 Mrd. € erzielen. Mit einem Anteil von 22,3 % am Gesamtumsatz der Ernährungswirtschaft ist die Fleischwirtschaft damit weiterhin die führende Branche des Ernährungssektors. 16,6 Mrd. € entfielen auf die Fleischwarenindustrie, 10,7 Mrd. € auf die Schlacht- und Zerlegebetriebe (ohne Geflügel) und 3,8 Mrd. € auf die Geflügelschlachtbetriebe. Die Zahl der Schlachtbetriebe mit 50 Beschäftigten und mehr blieb in den vergangenen Jahren ungefähr konstant, ebenso die Zahl der Beschäftigten (VDF 2009).

Herstellung von Bier

Der Umsatz der Brauindustrie stagniert seit einigen Jahren bei rd. 7,5 Mrd. €. Der Umsatzanteil am gesamten Ernährungsgewerbe lag bei knapp 6 %. Laut Mitteilung des Statistischen Bundesamts (2009c) haben deutsche Brauereien und Bierlager im ersten Halbjahr 2009 49,3 Mio. Hektoliter Bier oder 4,5 % weniger als im Vorjahr abgesetzt. Wesentliche Faktoren für diese Entwicklung waren neben den Witterungseinflüssen auch Bierpreiserhöhungen und andere Konsummuster. Stärker als der Bierabsatz sank der Absatz von Biermischungen (Statistisches Bundesamt 2009c). Der Bierabsatz und damit die Bierproduktion schrumpfen seit einigen Jahren nicht nur in Deutschland, sondern in ganz Westeuropa.

Der Strukturwandel der Brauwirtschaft ist weiterhin geprägt von Kooperationen und Übernahmen von Brauunternehmen, insbesondere aus dem mittleren Marktsegment, sowie auch Übernahmen von Unternehmen aus dem Getränkehandel. Trotz vielfältiger Produktneueinführungen, die teilweise nur kurze Produktlebenszyklen hatten, konnte die Branche den weiter anhaltenden sinkenden Bierverbrauch nicht stoppen. Die Rohstoff- und Energiepreissteigerungen in 2008 wirkten noch verstärkend auf den Strukturwandel (DBB 2009a).

Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen

In den meisten Sektoren der Ernährungsindustrie finden Stärke-Produkte (native und modifizierte Stärken, Stärkeverzuckerungsprodukte) sowie Nebenerzeugnisse der Stärkeproduktion (z. B. Weizen- oder Maisgluten) eine breite und vielseitige Verwendung. Darüber hinaus werden die Stärkeprodukte umfangreich in der chemisch-technischen und pharmazeutischen Industrie sowie in der Futtermittelindustrie eingesetzt. In Deutschland wird Stärke vor allem aus Kartoffeln (45 %), Mais (25 %) und Weizen (33 %) hergestellt (FSI 2009).

Die Stärkeproduktion befindet sich an der Schnittstelle zwischen Landwirtschaft und Industrie. Einerseits ist die Branche mit ihren Rohstoffen den Regelungen der EU-Agrarpolitik und andererseits mit ihren Verarbeitungsprodukten dem freien internationalen Wettbewerb ausgesetzt. Alle deutschen Hersteller von Mais-, Weizen- und Kartoffelstärke sind relativ große Unternehmen. In 2010 sind dies acht Unternehmen, die über 14 Produktionsstandorte in Deutschland verfügen und im Jahr 2008 einen Umsatz von 1,72 Mrd. € erzielten (FSI 2009).

9.1.3 Auswahl der Prozesse für die energietechnische Analyse

In jeder der ausgewählten Branchen kommt eine Reihe von elektrischen und thermischen Prozessen zum Einsatz, die den Energiebedarf der hier ausgewählten Produkte der Ernährungsindustrie im Wesentlichen bestimmen. Hinzu kommen einige Querschnittstechnologien (z. B. Druckluft, Kälteerzeugung, Heizung, Beleuchtung), die an dieser Stelle nicht detailliert behandelt werden.

Um die prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen zu identifizieren, wurde die genauere Analyse der Prozesstechnologien, die Erfassung und Analyse der energierelevanten Statistiken und Unternehmensstrukturen durchgeführt. Im Folgenden werden die wesentlichen Prozesse für die ausgewählten Branchen beschrieben.

Herstellung von Zucker

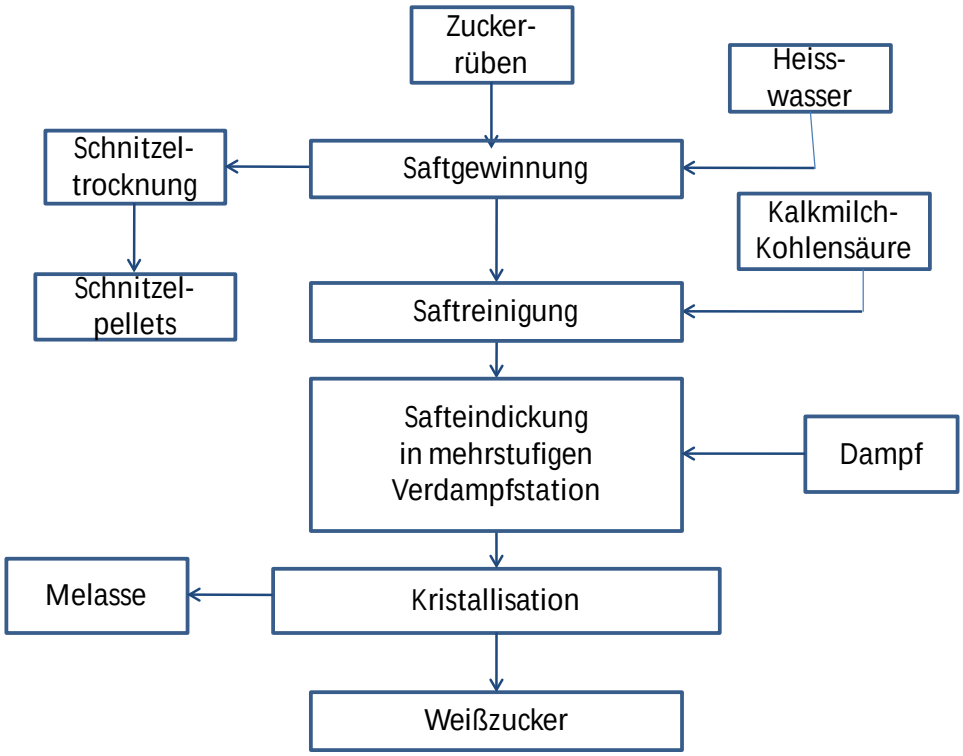
Bei der Gewinnung von Zucker handelt es sich um zwei wesentliche Schritte:

- Verarbeitung von Zuckerrüben und
- Raffinieren vom Rohsaftextrakt.

Um den in den Rübenzellen gespeicherten Zucker zu gewinnen, werden die Zuckerrüben gewaschen, in Schnitzel geschnitten und anschließend mit Heißwasser (70 °C) überbrüht. Dabei löst sich der Zucker aus den Rübenzellen; es entsteht ein Rohsaftextrakt, der anschließend mit einer Kalkmilch-Kohlensäure gereinigt wird. Die bearbeiteten Zuckerrübenschnitzel werden ausgepresst, thermisch getrocknet und als Viehfutter an Landwirte abgegeben. Weiterhin wird der gereinigte Extrakt in einer mehrstufigen Verdampferanlage auf etwa 70 % Trockensubstanz eingedickt. Dem eingedickten Saft werden feine Zuckerkristalle zugegeben. In Kristallisatoren wird ihm unter Vakuum weiter Wasser entzogen. Die Kristalle wachsen durch den erneuten Wasserentzug bis zur gewünschten Größe. Danach werden die Zuckerkristalle durch Zentrifugieren und Spülen mit Wasser vom Sirup getrennt. Am Ende des Kristallisationsprozesses steht der weiße Zucker (vgl. Abbildung 9-2).

Die meiste eingesetzte thermische Energie verbrauchen die Prozessschritte Safteindickung (Verdampfen), Kristallisation und Schnitzeltrocknung (BREF 2006). Etwa 90 % der bei der Zuckerproduktion eingesetzten Energie ist Wärmeenergie.

Abbildung 9-2: Vereinfachte schematische Darstellung der Prozesse in der Zuckerherstellung



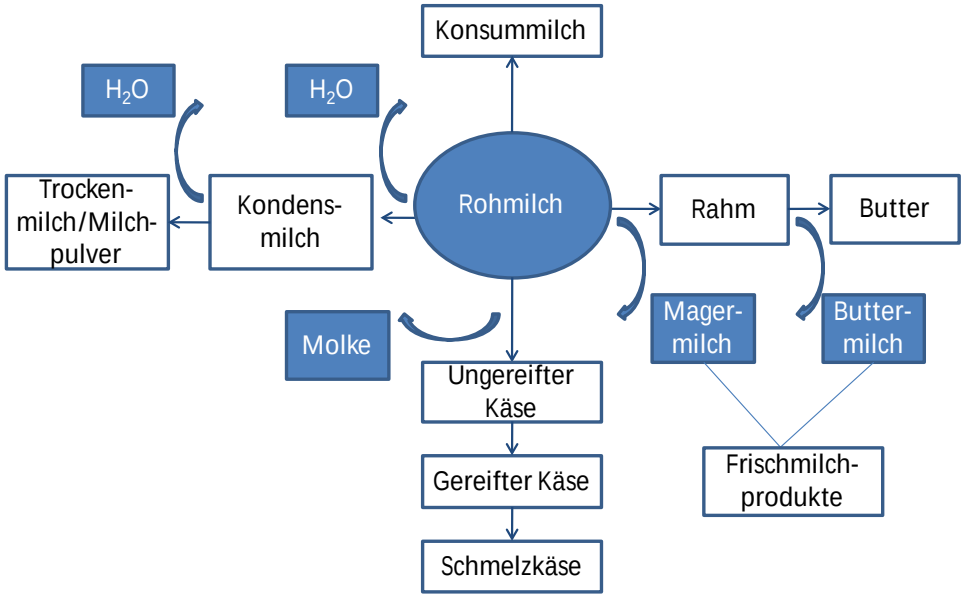
Quelle: Südzucker AG 2009

Milchverarbeitung

Aufgrund der Komplexität der milchverarbeitenden Prozesse werden diese unter dem Begriff „Molkerei“ zusammengefasst. Dabei werden folgende Produktarten erfasst: Konsummilch, Frischmilchprodukte (Joghurt, Buttermilch, usw.), Butter, Käse und Milchpulver (vgl. Abbildung 9-3).

Die angelieferte Rohmilch mit einem Fettgehalt von 3,2 bis 4,5 % wird zuerst zentrifugiert. Dabei wird die Milch gereinigt, indem Feststoffanteile entfernt werden. Gleichzeitig wird durch die Abtrennung von Sahne bzw. Rahm die gewünschte Fettstufe eingestellt. Nach dem Zentrifugieren hat Milch unterschiedlichen Fettanteile: Mindestens 3,5 % Fett (Vollmilch), mindestens 1,5 bis 1,8 % Fett (teilentrahmte bzw. fettarme Milch) oder höchstens 0,3 % Fett (entrahmte Milch bzw. Magermilch).

Abbildung 9-3: Standard- und Nebenprodukte der milchverarbeitenden Industrie (vereinfacht)



Quelle: Foissy 2005

Nach dem Zentrifugieren erfolgt eine Wärmebehandlung, um die Milch zu konservieren. Dabei wird die Milch entweder ultrahocherhitzt (H-Milch, sechs Wochen haltbar), pasteurisiert oder sterilisiert (für einige Tage bzw. für mehrere Monate haltbar). Zum Schluss wird die Milch noch homogenisiert. Durch Homogenisierung wird der Effekt des Aufrahmens unterbunden oder verlangsamt. Dabei wird die Milch unter hohem Druck durch feinste Düsen gepresst. In diesem Schritt werden die Fetttröpfchen zerkleinert (in kleinere Tröpfchen von weniger als 1 µm Durchmesser) und fein in der Milch verteilt. Die Anzahl der Fettkügelchen steigt dabei um den Faktor 400 bis 1.000 an (Meyer et al. 2000).

Fleischverarbeitung

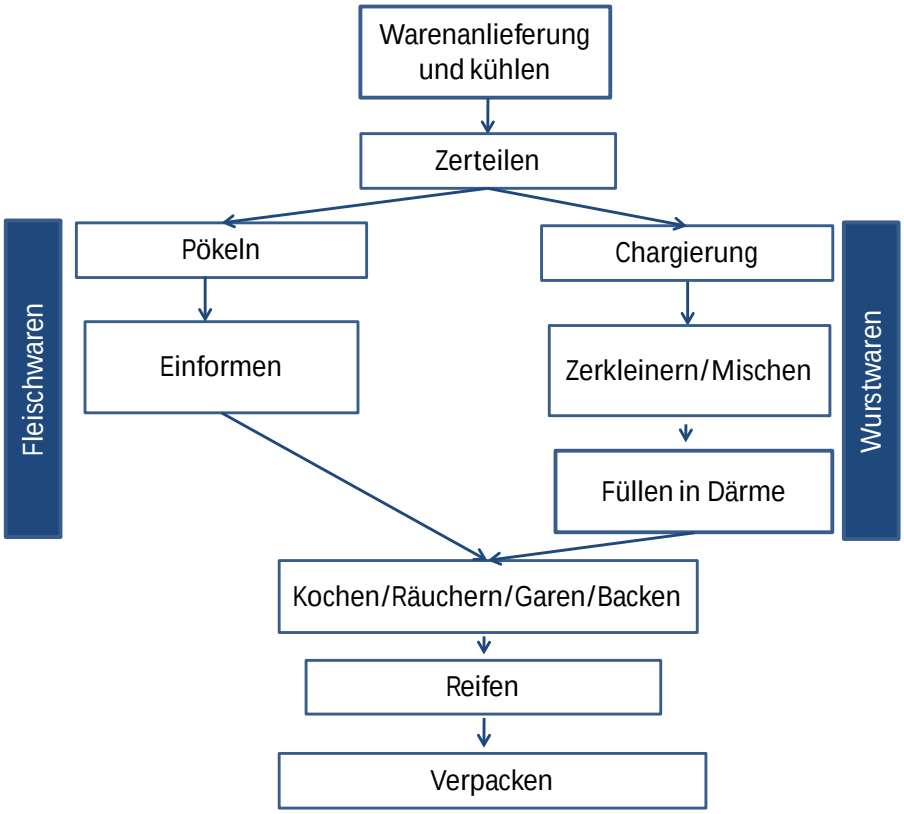
Nachdem das zu verarbeitende Fleisch schon vorzerlegt beim Unternehmen angeliefert und in Kühlräumen zwischengelagert wurde, wird es je nach Verwendung zerlegt und weiterverarbeitet, wobei sich der Materialfluss nach der Zerlegung in zwei Teilwege (Wurst, Fleisch) aufteilt (vgl. Abbildung 9-4). Bei der Fleischwarenproduktion wird das Fleisch mit Hilfe des Injektors und dem Tumbler gepökelt und anschließend in Formen gepackt. Die anschließende thermische Behandlung wird in der Räucherei durchgeführt.

Vor der eigentlichen Wurstproduktion im Kutter werden in der Chargierung die benötigten Fleischmengen auf die unterschiedlichen Produkte aufgeteilt und in wannenförmi-

gen Wagen bereitgestellt. Diese Chargen werden ggf. mit Gewürzen und weiteren Zutaten zu Wurstbrät verarbeitet und in der Füllerei in Formen oder Därme gefüllt. Der Weitertransport in die Räucherei geschieht auf Gestellwagen, auf denen die Würste entweder aufgehängt oder auf Zwischenböden aufgelegt sind.

Die thermische Behandlung innerhalb der Räucherei wird für Wurstwaren und Fleischprodukte gleichermaßen durchgeführt. Dabei wird ein oder mehrere Arbeitsgänge aus dem Arbeitsumfeld Backen, Garen, Kochen und Räuchern durchgeführt. Falls erforderlich, folgt im Anschluss ein Ausformen der Waren. Nach dem Abkühlen schließt für viele Produkte noch eine Reifephase in konditionierten Reiferäumen an. Die meisten Produkte werden schließlich in der Packerei in verschiedene Verpackungsformen verpackt. Zusätzlich gilt zu beachten, dass es im Verlauf des Materialflussweges immer wieder Kühlräume zur Zwischenlagerung der Ware gibt (LFU 2000a).

Abbildung 9-4: Beispielhafte Prozessdarstellung bei der Fleisch- und Wurstwaren-Herstellung (vereinfacht)



Quelle: LFU 2000a

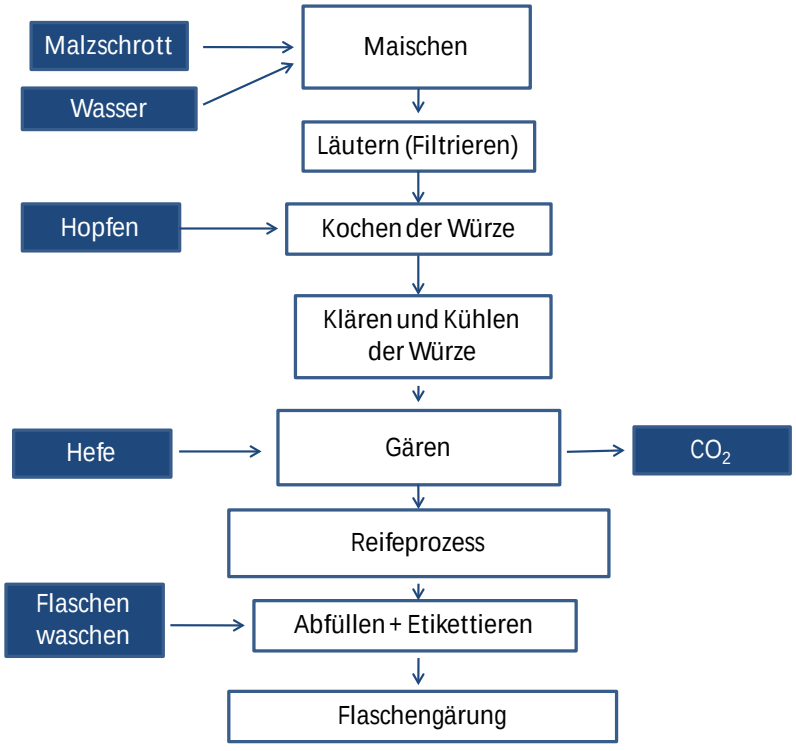
Der in Abbildung 9-4 dargestellte Prozessverlauf ist als Beispiel eines konkreten Betriebes zu verstehen. Das Schema kann deshalb nicht als typisch für alle Betriebe dieser Branche angesehen werden; es zeigt aber dennoch die typischen Prozessschritte

der Fleisch- und Wurstwaren-Herstellung, insbesondere die häufige Nutzung von Kühlräumen.

Herstellung von Bier

Der Brauprozess eines Bieres verläuft in insgesamt acht Schritten (vgl. Abbildung 9-5). Der Prozess beginnt mit dem Schroten, bei dem das Malz gemahlen wird. Beim zweiten Schritt des Brauprozesses wird dem Malz beim Maischen Wasser zugeführt, und dann wird das Malz erwärmt. Beim im Brauprozess folgenden Läutern werden die festen Bestandteile von den gelösten filtriert. Im weiteren Verlauf des Brauprozesses wird das Malz mit der Zugabe von Hopfen gekocht, bis schließlich Eiweiß ausfällt. Im nächsten Schritt wird das ausgefallene Eiweiß abgefiltert und die Bierwürze gewonnen. Der Brauprozess wird dann mit dem Kühlen der heißen Würze fortgesetzt. Danach wird der Würze Hefe zugegeben, und im weiteren Verlauf des Brauprozesses wandelt sich der Zucker der Würze in Alkohol um. Nach dem Gären wird der Brauprozess mit dem Reifen abgeschlossen. Der Reifeprozess dauert je nach Biersorte zwei bis zwölf Wochen (einschließend die Flaschengärung) bei sehr niedrigen Temperaturen (4 bis 8 °C). Zum Ende des Brauprozesses wird das Bier noch einmal filtriert, in Flaschen abgefüllt und etikettiert (BREF 2006).

Abbildung 9-5: Schematische Darstellung des Brauprozesses (vereinfacht)

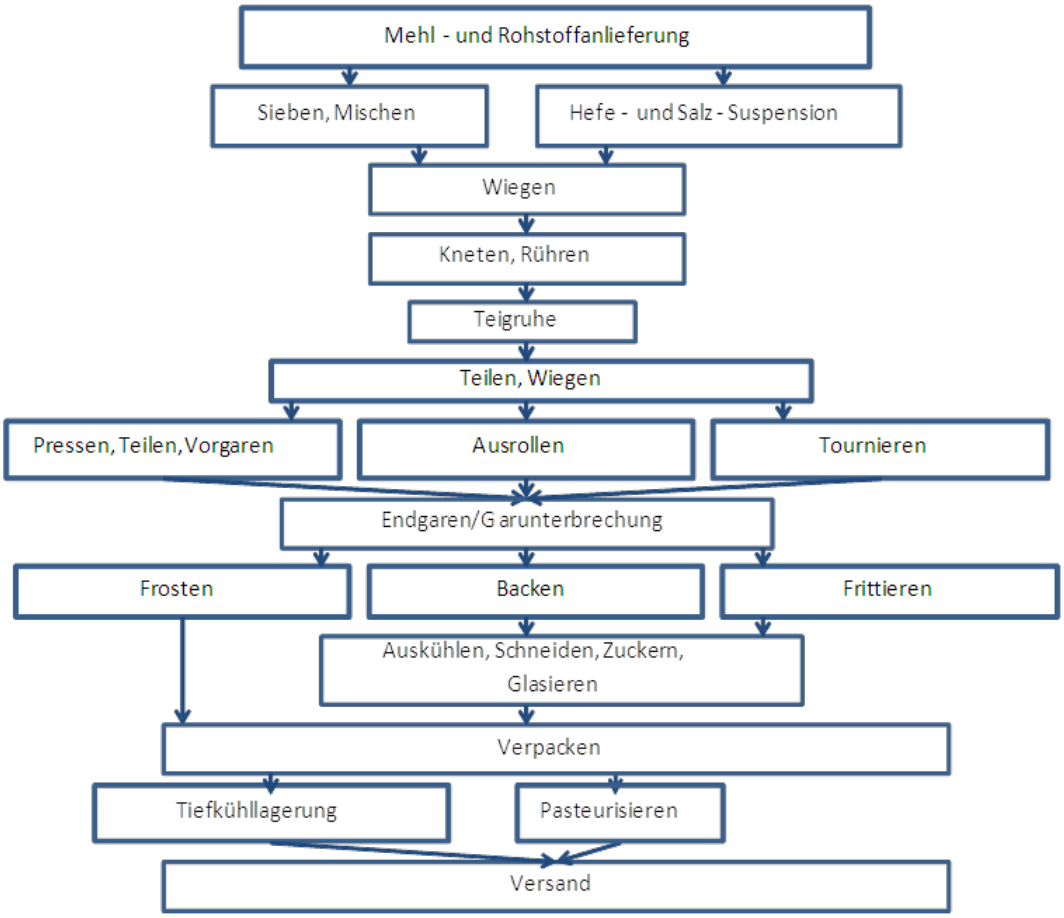


Quelle: DBBb, BREF 2006

Herstellung von Backwaren

Für die Herstellung von Backwaren ist eine Vielzahl verschiedener Prozesse notwendig (siehe Abbildung 9-6), von denen aber nur einzelne im Hinblick auf den spezifischen Energieverbrauch von Bedeutung sind.

Abbildung 9-6: Beispielhafte Prozessdarstellung einer Großbäckerei (vereinfacht)



Quelle: LFU 2000b

Der Herstellungsprozess beginnt mit der Aufbereitung der angelieferten Mehlsorten (sieben und mischen). Im Anschluss wird das Mehl mit den verschiedenen Zutaten (Zucker, Salz, Hefe, Gewürze) zusammengewogen und mit Hilfe der Knetmaschinen zu einem Teig verarbeitet. Diese werden nun portioniert und in die gewünschte Form gebracht.

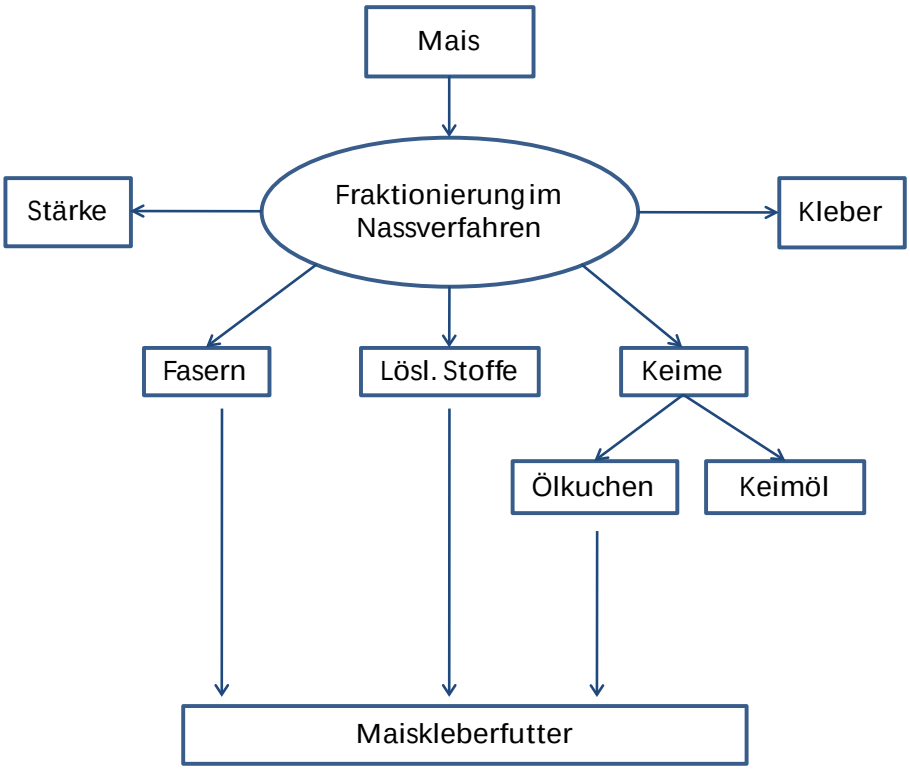
Die entstandenen Teige müssen nun für eine gewisse Zeit – je nach Produktionslinie unterschiedlich – ruhen und durchlaufen im Anschluss entweder einen Garschrank oder werden in einen Garraum geschoben. Die weitere Verarbeitung der Teiglinge erfolgt je nach Produkt entweder in Öfen, im Froster oder in der Backpfanne (frittieren).

Die fertigen bzw. tiefgefroren Produkte werden schließlich verpackt (gegebenfalls auch pasteurisiert) und für den Versand vorbereitet, wobei Tiefkühlwaren bis zum Versand in einem Kühlraum zwischen gelagert werden (LFU 2000b).

Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen

Obwohl sich die Herstellung der Stärkeproduktion aufgrund der verschiedenen Rohstoffe unterscheidet, ist allen Verfahren das Prinzip der Nassmüllerei gemein. Dabei wird die Stärke aus dem Zellgewebe des zuvor zerkleinerten Rohstoffes ausgewaschen. Am Ende der Stärkeproduktion steht ein Stärkepulver, meist mit einem Restfeuchtegehalt von 20 % (vgl. Abbildung 9-7; FSI 2009).

Abbildung 9-7: Schematische Darstellung Stärkegewinnung (Maisstärke)



Quelle: IfUL 2003

So verläuft zum Beispiel die Herstellung von Maisstärke folgendermaßen: Der gewonnene Mais wird zum Aufquellen in ein Wasserbad gebracht. Durch das Quellen werden nun die Maiskeime vom Maisbrei getrennt. Als nächstes folgt eine Siebung, umso die Mais-Schalen aus der Suspension zu entfernen, wobei vom Maisbrei ein Stärke/Kleber-Gemisch übrig bleibt. Durch weiteres Filtrieren bzw. Trennen der Bestandteile bleibt Maisgluten und native Stärke übrig (IfUL 2003).

9.2 Analyse der Prozesse

Als hier zu behandelnde Prozesse, wurde der Fokus auf die energieintensiven Verfahren gelegt, die in der Regel auch den höchsten Anteil des Endenergiebedarfs in ihrer Branche benötigen.

9.2.1 Herstellung von Zucker

Die Prozessschritte Safteindickung (Verdampfen), Kristallisation und Schnitzeltrocknung verbrauchen die meisten Energie in einer Zuckerfabrik, vgl. Kapitel 9.1.3. Hier werden diese Prozessschritte der Zuckerherstellung genauer analysiert.

Verdampfung und Kristallisation

In der Verdampfstation wird dem Dünnsaft in mehreren hintereinander geschalteten Verdampfern solange Wasser entzogen, bis er als dickflüssiger Sirup einen Zuckergehalt von 65 – 70 % hat. Die Verdampfungsapparate sind so miteinander als Kaskade verbunden, dass der dabei entstehende Dampf stets die nächste Stufe heizt. So ist eine optimale Energieausnutzung gewährleistet. Der gewonnene goldbraune Dicksaft wird in der Kochstation weiter eingedampft. Dies geschieht unter vermindertem Druck, da das Wasser dann bereits zwischen 65 und 80 °C verdampft und der Zucker bei diesen Temperaturen nicht karamellisiert.

Bei einem bestimmten Verhältnis von Wasser zu Zucker wird die Kristallbildung häufig durch Zugabe von Impfkristallen in Form feinsten Zuckers angeregt. Dabei entsteht ein dickflüssiger Brei (die Füllmasse), der zum Abkühlen in Maischen abgelassen wird. Rührwerke halten den Brei dabei ständig in Bewegung, die Zuckerkristalle wachsen in dieser Zeit weiter (WVZ 2009b).

Schnitzeltrocknung

Nachdem der Zucker aus den frischen Rübenschnitzeln extrahiert wurde, werden die Schnitzel gepresst. Bei einem Feststoffgehalt von 12 – 17 % werden sie Nassschnitzel genannt und nach dem Pressen (Feststoffgehalt von 18 – 34 %) Pressschnitzel.

Sowohl Nass- als auch Pressschnitzel können als Tierfutter verkauft werden. Dies erfolgt normalerweise nach dem thermischen Trocknen der Schnitzel. Trockenschnitzel erhält man durch Trocknen der Schnitzel auf einen Feststoffgehalt von 86 – 92 %, was in der Regel durch Konvektion, z. B. durch Trocknung mit Hilfe von Luft, Rauchgas oder Dampf erfolgt. Im ersten Trocknungsabschnitt bleibt die Trocknungsrate praktisch konstant. Während dieser Zeit verdampft die ungebundene Flüssigkeit von der Oberfläche der Feststoffe und wird vom Trocknungsmedium abtransportiert. Fällt der Feuch-

tigkeitsgehalt unter einen kritischen Wert, trocknet die Oberfläche der Feststoffe aus, und innerhalb der porösen Feststoffe findet eine weitere Verdampfung statt. Die Trocknungsgeschwindigkeit verringert sich mit fallendem Feuchtigkeitsgehalt (zweiter Trocknungsabschnitt). Die Restfeuchte in den Feststoffen ist durch Sorption an diese gebunden.

Bei der Trocknung mit Dampf sind die Anforderungen an das Trocknungsgas ähnlich. Hohe Feststoffgehalte in dem zu trocknenden Material erfordern einen stark überhitzten Dampf, entsprechend der niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit. Die Entscheidung, ob die Zuckerrübenschnitzel getrocknet werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab, z. B. von der Frage, ob es in der Nähe eine Verwertung der Nassschnitzel beispielsweise als Tierfutter gibt (BREF 2006). In Deutschland wird in der Regel die Schnitzeltrocknung in den Zuckerfarbiken durchgeführt.

9.2.2 Milchverarbeitung

Die zentralen energieintensivsten Prozesse bei der Milchverarbeitung sind Pasteurisieren, Homogenisieren und die Ultrahochtemperatur-Erhitzung.

Pasteurisieren

Zur Pasteurisierung von Milch, wird diese für eine Dauer von 15 bis 30 Sekunden auf 72 bis 75 °C erhitzt und danach sofort wieder abgekühlt.. Krankmachende (pathogene) Keime in der Milch werden dabei abgetötet. Eine gewisse natürliche Flora bleibt jedoch vorhanden. Sie ist also nicht keimfrei. Pasteurisierte Milch bleibt ungeöffnet bei 6 bis 7 °C gelagert etwa sechs bis zehn Tage genießbar.

Homogenisieren

Der Rahm wird zusammen mit einer kleinen Menge Magermilch homogenisiert. Der optimale Fettgehalt der Mischung beträgt 12 %. Die restliche Magermilch fließt direkt aus dem Zentrifugalseparator in die Pasteurisiereinheit des Pasteurisators. Der homogenisierte Rahm wird dem Magermilchstrom vor Eintritt in den Aufheizbereich wieder zugemischt. Mithilfe dieser Technik kann die Größe des Homogenisators erheblich verringert werden, was zu Energieeinsparungen führt.

Ultrahochtemperaturerhitzung (UHT-Erhitzung)

Dabei wird vorgewärmte Milch für zwei bis drei Sekunden auf 135 bis 150 °C erhitzt (die Abkürzung UHT folgt aus Ultra High Temperature) und sofort wieder auf 4 bis 5 °C herunter gekühlt. Alle Keime bzw. Mikroorganismen einschließlich pathogener Keime

(Krankheitserreger) werden durch die Ultrahocherhitzung abgetötet. Dadurch ist die Milch mindestens sechs Wochen haltbar (Meyer et al. 2000).

9.2.3 Fleischverarbeitung

Zu den energieintensivsten Prozessen innerhalb der Fleischverarbeitung zählen vor allem das Kühlen und das Vakuumverpacken der fertigen Fleisch- bzw. Wurstwaren. Zusätzlich dazu sind auch die Prozesse innerhalb der Räucherei (Kochen, Brühen, Räuchern) von Interesse, da sie den Großteil der bereitgestellten Wärmeenergie benötigen.

Kühlen

Für die Kühlung des Fleisches werden – je nach gefordertem Temperaturniveau – verschiedene Kältemedien eingesetzt. So wird für die Kühlung zwischen +18 und +7 °C Kaltwasser verwendet und ansonsten Ammoniak, der eine Temperatur von -10 bzw. -40 °C besitzt.

Die Kälteverteilung geschieht durch separate Kreislaufsysteme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, nämlich zwei Ammoniak- und einem Eiswasserkreislauf, wobei in den beiden Ammoniaksystemen NH_3 zum Verdampfen gebracht wird und somit die abzuführende Wärme aufnimmt.

Im Gegensatz dazu wird im Eiswasserkreislauf das Eiswasser mit Hilfe einer Zirkulationspumpe zu den Kühlregistern befördert wo es die umgewälzte Raumlauft abkühlt. Das Eiswasser selbst wird wiederum durch Ammoniak auf die gewünschte Temperatur herunter gekühlt. Hierfür werden Ammoniak führende Rohre durch ein Speicherbecken geführt. An den Rohren bilden sich mehrere Zentimeter dicke Eisschichten, die durch die Wasserentnahme wieder abschmelzen.

Da die Fleisch- und Wurstwaren vor, während und nach der Verarbeitung ständig gekühlt werden müssen, ist die komplette Kälteanlage ein wesentlicher Energieverbraucher. Für die Energiebereitstellung wird fast ausschließlich Strom verwendet, weshalb die Anlage im Schnitt rund 37 % des Gesamt-Strombedarfs eines Betriebs ausmacht.

Kochen, Brühen, Räuchern

Der Wärmebedarf eines Betriebes wird neben der Heizung und der Trinkwassererwärmung hauptsächlich durch die Produktionseinrichtungen bestimmt, unter die auch die Rauch- und Kochkammern (Kombikammern) zählen.

Die benötigte Prozesswärme wird durch einen Dampferzeuger bereitgestellt. Dabei werden die Verbraucher aus drei verschiedenen Dampfnetzen gespeist, welche entweder mit 0,5 bar, 6 bar oder 8 bar betrieben werden. Der Dampfkessel selbst wird meist mit Erdgas betrieben.

Verpacken

Nachdem die verschiedenen Produkte alle verarbeitenden Prozesse durchlaufen haben, werden sie in die entsprechenden Verpackungsformen eingebracht (Beutel bzw. Schalen aus Kunststoff), vakuumiert und verschlossen. Da heute grundsätzlich alle Produkte die Verpackungsanlage durchlaufen und es sich meist um Vakuumverpackungen handelt, ist auch der Verpackungsprozess sehr energieintensiv. Die benötigten Vakuumpumpen sowie alle anderen Bestandteile der Verpackungsanlage werden mit Strom betrieben (LFU 2000a).

9.2.4 Herstellung von Bier

Energetisch ist der Brauprozess als komplex zu bezeichnen, da mehrfach Wärme- und Kühlprozesse zur Anwendung kommen. Zu den zentralen energieintensivsten Prozessen in der Herstellung von Bier zählen:

- das Maischen, das Erwärmen des Malzschrots im Maischbottich: dabei wird das Malzschrot mit Wasser zur sogenannten Maische vermischt und danach dort auf verschiedenen Temperaturstufen erhitzt.
- das Würzekochen: dabei wird in der Würzepfanne der flüssigen Würze der Hopfen zugegeben, dann wird sie etwa eine Stunde gekocht.
- die Kühlung, bei der die Würze im Würzekühler heruntergekühlt wird, bevor die Hefe hinzugegeben wird und anschließende Gärung (DBB 2009b).

9.2.5 Herstellung von Backwaren

Obwohl sich der komplette Herstellungsprozess durch viele kleine Teilprozesse auszeichnet, sind nur wenige sehr energieintensiv. Darunter zählen das Backen in den verschiedenen Öfen, das Haltbarmachen im Pasteur sowie das Kühlen und Tiefkühlen.

Backen

Die Backöfen werden je nach Produkt mit 200 – 300°C betrieben. Dabei wird hauptsächlich Gas, aber auch Strom bzw. Fernwärme (in Form von Niederdruckdampf), verwendet. Für das Backen werden sowohl diskontinuierliche Backverfahren (z. B. Etagenbacköfen oder Backschränke in kleineren Betrieben) als auch kontinuierliche Verfahren (z. B. Tunnelöfen in Großbetrieben) verwendet. Aufgrund der kontinuierlich

hohen Betriebstemperaturen sowie weiteren Faktoren (z. B. Überhitzung, fehlende Regelung) sind die Backöfen der größte Energieverbraucher bei der Backwarenherstellung.

Kühlen und Tiefkühlen

Im Gegensatz zu der Fleischherstellung wird das Kühlen bzw. Tiefkühlen bei der Herstellung von Backwaren meist erst am Ende des Produktionsprozesses eingesetzt. Wobei der Unterschied zwischen Tiefkühlen und Kühlen in der Temperatur und dem Einsatzgrund liegt. Das Kühlen geschieht mit einer Temperatur von 0 bis +4 °C, um so das „Altbackwerden“ (Retrogradation der Stärke) zu verhindern. Im Gegensatz dazu wird das Tiefkühlen, bei Temperaturen zwischen -30 °C und -18 °C, hauptsächlich dazu verwendet, vorgegarte bzw. halbgebackene Teiglinge frisch zu halten. Die Teiglinge werden dann in den verschiedenen Verkaufsladen oder vom Endverbraucher selbst fertig gebacken.

Pasteurisieren

Das Pasteurisieren dient (ähnlich wie bei der Milchverarbeitung) dazu, die Produkte haltbarer zu machen, indem durch kurze Erhitzung und sofortiges Abkühlen ein Großteil aller schädlichen Bakterien abgetötet wird. Der Pasteur kommt in der Regel nur bei leicht verderblichen Produkten wie zum Beispiel Toastbrot zum Einsatz (LFU 2000b).

9.2.6 Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen

Genauso wie die Herstellung von den verschiedenen Stärkeerzeugnissen von den Rohmaterialien abhängig ist, so ist auch der Energiebedarf je nach Rohmaterial (Mais, Weizen, Kartoffeln) unterschiedlich. Dennoch ist für den hohen Energiebedarf im Grundsatz nur ein Prozess verantwortlich, der Verdampfungs- und Trocknungsprozess. Dieser benötigt ausschließlich thermische Energie für das endgültige Stärkepulver mit einer Reinheit von bis zu 99 % und einem Wassergehalt von höchstens 12 – 15 %. Im Vergleich zu diesem Prozess sind alle vorherigen Prozesse zur Herstellung der Suspensionen bzw. anschließende Trennprozesse von eher geringerer Bedeutung.

Somit ist der Verdampfungs- und Trocknungsprozess aufgrund seines vergleichsweise hohen Energieverbrauchs der einzige energieintensive Prozess, welcher für diese Studie von Bedeutung ist. (BREF 2006)

9.2.7 Zusammenfassung: THG-Emissionen und Energiebedarf

Analysiert man die Energiebedarfsdaten der ausgewählten Branchen der Ernährungsindustrie, so liegt der Schwerpunkt des Energieeinsatzes mit 75 PJ (gut 71 %) stärker bei der thermischen Energie als beim Strom (30 PJ mit knapp 29 %; vgl. Tabelle 9-2). Der gleiche Schwerpunkt gilt etwas abgeschwächt auch für die restliche Ernährungsindustrie. Die milchverarbeitende Industrie mit ca. 22 PJ in 2007 gefolgt von der Zuckerindustrie mit 17 PJ in 2007 sind die größten Brennstoffverbraucher. Die milchverarbeitende Industrie sowie fleischverarbeitende Unternehmen und Backwarenindustrie verbrauchen (vergleichsweise) viel Strom (in jeder Branche etwa 7 PJ in 2007) (siehe auch Abbildung 9-8).

Tabelle 9-2: Absoluter und spezifischer Energiebedarf* – Brennstoffe und Strom – und Produktion der ausgewählten Produkte der Ernährungsindustrie, Basisjahr 2007

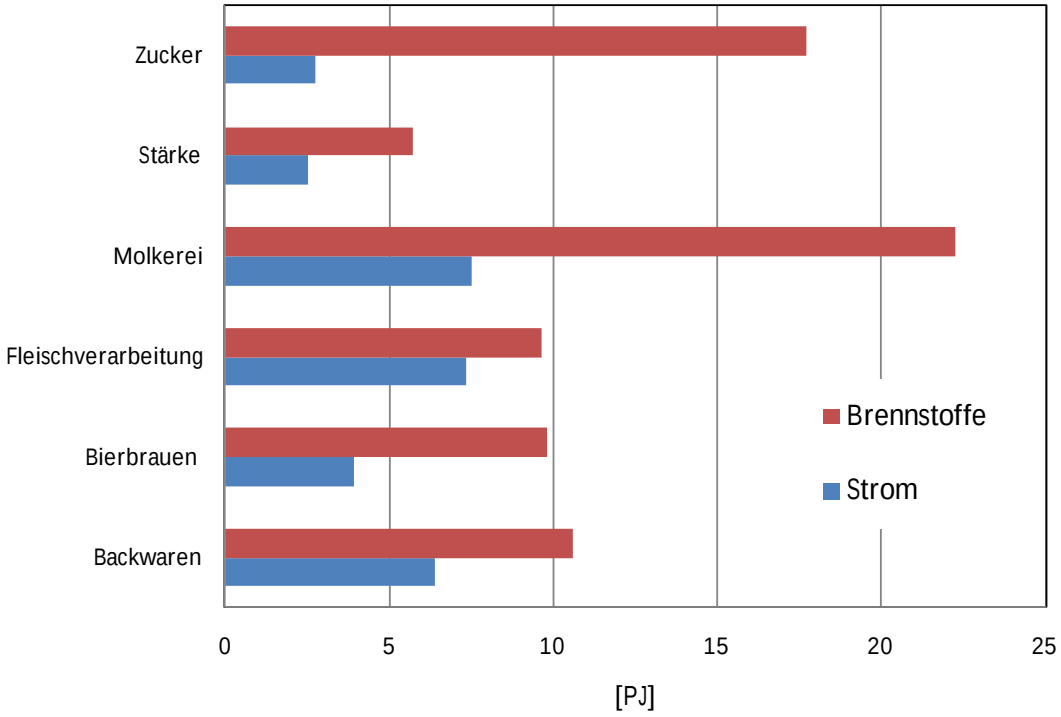
Endenergieverbrauch in PJ Jahr 2007 Wirtschaftszweig/Prozess	Nr. WZ 2003	Nr. WZ 2008	EEV gesamt	Brennstoffe/ Fernwärme	Strom	Produktion [1000 t]	Spez. Energieverbrauch [GJ/t]	
							Brennstoffe/ Fernwärme	Strom
Ernährung und Tabak	15, 16	10, 11, 12	**204,3**	**142,9**	**61,4**			
Fleischverarbeitung	15.13	10.13	17,0	9,6	7,3	4.730	2,0	1,5
Milchverarbeitung	15.51	10.51	29,8	22,3	7,5	14.173	1,6	0,5
Herstellung v. Stärke	15.62	10.62, 10.89	8,2	5,7	2,5	1.850	3,1	1,4
Herst. v. Backwaren	15.81	10.71	17,0	10,6	6,4	4.420	2,4	1,4
Herstellung v. Zucker	15.83	10.81	20,5	17,7	2,8	3.928	4,5	0,7
Herst. von Bier	15.96	11.05	13,8	9,8	4,0	10.063	1,0	0,4
Rest			98,2	67,2	31,0			

* ohne Brennstoffeinsatz für Stromeigenerzeugung, ohne nichtenergetischer Verbrauch

Quellen: AGEB 2009; Statistisches Bundesamt 2008, 2009b; DBB 2009a; WZV 2009a; Berechnungen Fraunhofer ISI

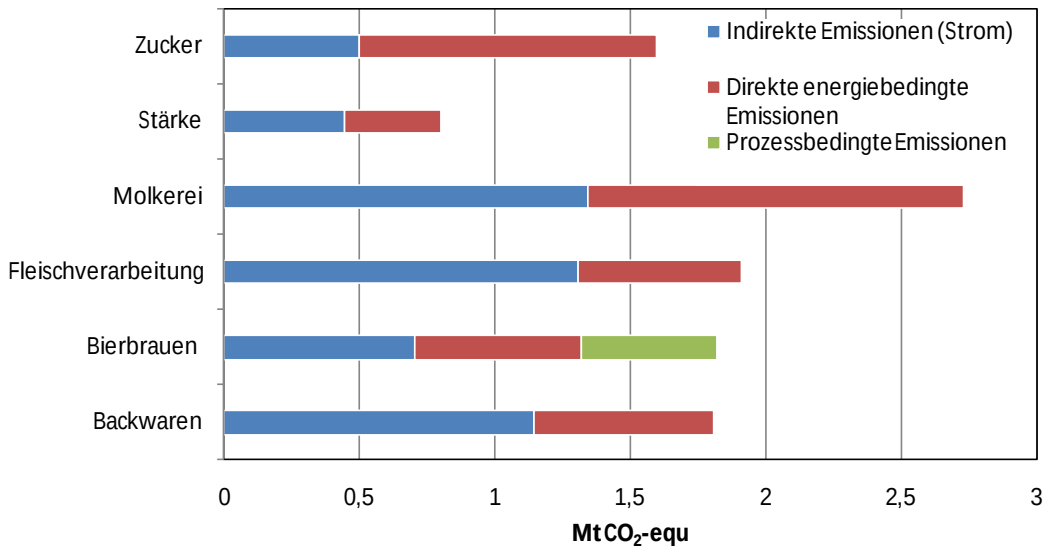
Direkte energiebedingte Emissionen der ausgewählten Branchen werden durch die Brennstoffnutzung (meist von Erdgas) verursacht; sie betrugen im Jahr 2007 4,7 Mio. t CO_2-eq. Indirekte Emissionen von etwa 5,5 Mio. t CO_2-eq. werden durch den Strombedarf verursacht. Für die direkten prozessbedingten Emissionen sind nur die Emissionen der Brauindustrie von Bedeutung, die zum größten Teil durch die Gärung verursacht werden und im Jahr 2007 0,5 Mio. t CO_2-eq. betrugen.

Abbildung 9-8: Strom- und Brennstoffbedarf der betrachteten Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, 2007



Quelle: AGEB 2009; Statistisches Bundesamt 2008, 2009b

Abbildung 9-9: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, 2007



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von AGEB 2009; Statistisches Bundesamt 2008, 2009b

Tabelle 9-3: Strom- und Wärmebedarf und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, 2007

	Energieverbrauch [PJ]		Treibhausgasemissionen [Mt CO_2eq]		
Prozess	Strom	Brennstoffe	Prozessbedingte Emissionen	Indirekte Emissionen (Strom)	Direkte energiebedingte Emissionen
Backwaren	6,39	10,61	-	1,14	0,66
Bierbrauen	3,95	9,80	0,50	0,71	0,61
Fleischverarbeitung	7,32	9,64	-	1,31	0,60
Molkerei	7,51	22,27	-	1,34	1,39
Stärke	2,50	5,71	-	0,45	0,36
Zucker	2,77	17,69	-	0,50	1,10

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES

9.3 Analyse der Einsparoptionen

Im Rahmen der Analyse wurden verschiedene Fachleute aus der Ernährungsindustrie befragt, die aus ihrer eigenen Erfahrung meinten, dass außer den schon identifizierten Technologien (siehe Kapitel 9.3.1 bis 9.3.6) noch zusätzliche deutliche Reduktionspotenziale durch eine optimierte Produktionsplanung oder durch Hinterfragen und Anpassen von Prozessparametern möglich seien. Zum Heben dieser Potenziale sind meist keine oder nur geringe Investitionen notwendig. Noch weitgehend ungenutzte Potenziale bestehen nach Meinung von Experten bei der Nutzung der Wärme aus Ab- und Prozesswässern für die Wärmeerzeugung über Wärmepumpen sowie bei der Vorwärmung von Reinigungswasser durch Nutzung der Abwärme aus Kühlkreiskreisläufen der Vakuum- und Kälteerzeuger.

Um einen Überblick über die analysierten und in Berechnungen berücksichtigten Einsparoptionen und -potenziale zu geben, werden hier branchenspezifischen Einsparoptionen aufgelistet und kurz erläutert.

9.3.1 Herstellung von Zucker

Als Folge der Selbstverpflichtungserklärung zur Minderung der CO_2-Emissionen wurden in der Zuckerindustrie schon deutliche Verbesserungen des spezifischen Energiebedarfs erreicht. Jedoch wurden in der Betrachtung folgende Einsparoptionen identifiziert, deren Diffusion in die Praxis unterschiedlich weit vorangeschritten ist:

- ***Mehrstufige Verdampfung mit Brüdenkompression*** (nach Expertenschätzungen erzielt man damit 11 % Einsparung bei den eingesetzten Brennstoffen),

- ***Zweistufige Schnitzeltrocknung*** (eine kombinierte Nieder- und Hochtemperaturtrocknung, nach Expertenschätzungen erzielt man damit 15 % Einsparung bei den eingesetzten Brennstoffen),
- ***Wirbelschicht-Verdampfungstrocknung*** von Zuckerrübenschnitzeln (Laut Experten sind mit diesem Verfahren bis 75 % Einsparung des zur Trocknung benötigten thermischen Energiebedarfs[76] möglich) (BREF 2006).

9.3.2 Milchverarbeitung

In der milchverarbeitenden Industrie sind die folgenden Einsparoptionen von größerer Bedeutung:

- ***Teilhomogenisierung***, bei diesem Verfahren wird der Rahm zusammen mit einer kleinen Menge Magermilch homogenisiert. Die restliche Magermilch fließt direkt aus dem Zentrifugalseparator in die Pasteurisiereinheit des Pasteurisators. Der homogenisierte Rahm wird dem Magermilchstrom vor Eintritt in den Aufheizbereich wieder zugemischt. Mithilfe dieser Technik kann die Größe des Homogenisators erheblich verringert werden, was zu möglichen Stromeinsparung bis zu 65 % führen kann.
- ***Regenerativer Wärmetauschverfahren bei der Pasteurisation.*** Die Pasteurisatoren werden mit regenerativen Gegenstromwärmezonen ausgerüstet. Die neu eingeleitete Milch wird von der heißen Milch, die die Pasteurisationszone verlässt, vorgewärmt. Damit lässt sich eine Einsparung der Wärmeenergie bis zu 80 % erzielen (BREF 2006).
- Weitere Einsparpotenziale in der milchverarbeitenden Industrie liegen in der ***regelmäßigen Kontrolle, Wartung und Instandhaltung*** der Produktionsanlagen. Da diese Optionen in der Regel die Querschnittstechniken betreffen, wird dieses Potenzial in der Analyse nicht weiter berücksichtigt.

9.3.3 Fleischverarbeitung

Innerhalb der Fleischverarbeitung bieten folgende Prozessoptimierungen bzw. Prozessveränderungen Einsparpotenziale:

- ***Diverse organisatorische Maßnahmen*** (z. B. die Verwendung von Eis für die Kühlung des Kutters kann reduziert werden, indem man eine passende Mischung aus gefrorenem und aufgetautem Fleisch verwendet) und optimale Auslegung der Kälteanlagen (BREF 2006) beim Kühlen und Tiefkühlen können zur Stromeinsparung bis zu 35 % führen.
- Eine weitere wichtige Maßnahme stellt die ***Nutzung der Abwärme*** aus den Prozessen der Kälteerzeugung mit der gezielten Integration einer Wärmepumpe in den

76 Die Schnitzeltrocknung benötigt etwa ein Drittel des gesamten thermischen Energiebedarfs einer Zuckerfabrik.

Wärmenetzen dar, dabei ist eine Einsparung von mindestens 10 % möglich (Fritzson et al. 2006).

Es gibt eine Reihe von Maßnahmen, die bei der Durchführung zu weiteren Energieeinsparungen führen können. Allerdings aufgrund von Datenverfügbarkeit werden diese Optionen in den Berechnungen nicht berücksichtigt:

- Benutzung von überhitztem Wasserdampf für das Räuchern der Fleisch- und Wurstwaren,
- die Benutzung von Dampfkochtöpfen anstelle des normalen Wasserbadofens kann den Wasserverbrauch und die benötigte Energie für das Aufheizen senken.
- Auftauen der Tiefkühlware bei „normaler" Luftzufuhr. Hierbei wird im Vergleich zu den konventionellen Auftaumethoden der Wasserverbrauch gesenkt und auch weniger Brauchwasser produziert. Der Kühlraum selbst wird für 18 – 24 Stunden auf einem gleichbleibenden Temperaturniveau gehalten.

9.3.4 Herstellung von Bier

In der Brauwirtschaft wurde eine Reihe von innovativen Technologien identifiziert:

- Einsatz eines Blockheizkraftwerks mit innovativem ***Zeolithspeicher***. Dabei wird die von BHKW erzeugte Wärme durch einen Zeolithspeicher von 90 °C bis zum Temperaturniveau von 110 °C angehoben. Dieses Temperaturniveau wird bei der Würzekochung benötigt. Mögliche Wärmeenergieeinsparung könnte dabei mindestens 10 % betragen (DEI 2009a).
- ***Rektifikationswürzekochung***, dieses Verfahren arbeitet nach dem Prinzip der fraktionierten Destillation (wie bei Raffinerien) und steigert die Ausdampfeffizienz der herkömmlichen Außen- und Innenkochsystemen für Würzekochung. Die Würze wird dabei in einer nachrüstbaren Rektifikationskolonne im Gegenstromprinzip mehrfach durch den Dampf geführt. Dadurch werden vielmehr Aromastoffe aufgenommen als bei einer herkömmlichen Würzekochung und eine mögliche Einsparung von 80 % bei Erdgas erzielt (Hertel 2007, DEI 2010).
- ***Biertrebervergärung für Biogas*** (Wärmeenergieeinsparung bis zu 30 % möglich). Dabei handelt sich um die Verwendung des beim Brauen von Bier entstehenden Reststoffs, Biertreber. Da Biertreber überwiegend organische Substanzen enthalten, eignen sie sich hervorragend für die Biogasherstellung, das wiederum als Brennstoff in der Brauerei eingesetzt werden kann (GTM 2009).

9.3.5 Herstellung von Backwaren

Bei der Herstellung von Backwaren konnten bei der ersten Betrachtung folgende Einsparpotenziale ausfindig gemacht werden:

- Durch gezielte ***Wärmerückgewinnung*** kann zum Beispiel die Abwärme der Back-Öfen dazu genutzt werden, um Warmwasser auf 50 – 60°C aufzuheizen. Auch die

Abgaswärme von ca. 110 °C kann durch den Einsatz von Wärmetauscher deutlich reduziert werden. Diese Maßnahmen können zu einer Einsparung von mindestens 10 % führen (LFU 2000b, Wang 2009).

· Organisatorische Maßnahmen, wie die volle Auslastung der Backöfen (z. B. Belegung der Flächen im Backofen) können bis zur 20 % der Wärmeenergieeinsparung führen (BREF 2006, Wang 2009).

9.3.6 Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen

In der Stärkeindustrie wurde in der Betrachtung folgende Einsparoption identifiziert:

· Wie in Kapitel 9.2.6. dargestellt, wird hier die Verdampfung als zentraler energieintensiver Prozess betrachtet. Eine geeignete Alternative stellt das ***Membranfiltrationsverfahren*** dar. Es wird oft zur Quellwasser-Aufkonzentration (z. B. Umkehrosmose) sowie zur Konzentration von Maissirup eingesetzt. Mit dem Einsatz von Membranfiltration ist es nach verschiedenen Einschätzungen (Wang 2009, Rausch 2002) möglich, ca. 30 % der thermischen Energie einzusparen.

Tabelle 9-4: Wirtschaftlichkeit ausgewählter Einsparmaßnahmen bei der Ernährungsindustrie

Branche	**Maßnahme**	**Wirtschaftlichkeit**
H.v. Zucker	Mehrstufige Verdampfung mit Brüdenverdichtung: Zucker	Hoch – Mittel
	Zweistufentrocknung der Schnitzel	Mittel
	Wirbelschicht-Verdampfungstrocknung – Zuckerrübenschnitzel	Mittel – Niedrig
Milchverarbeitung	Teilhomogenisierung	Hoch
	regenerativer Wärmetauschverfahren – Pasteurisation	Hoch
H.v. Bier	BHKW mit Zeolithspeicher	Mittel – Niedrig (noch sehr innovativ)
	Rektifikationswürzekochung	Mittel – Niedrig (noch sehr innovativ)
	Biertrebervergärung für Biogas	Niedrig
Fleischverarbeitung	optimale Auslegung bei Kühlung	Hoch
	Integration einer Wärmepumpe	Mittel
H.v. Backwaren	Abwärmenutzung Öfen	Hoch
	Volle Auslastung der Öfen	Hoch
H.v. Stärke und Stärkeerzeugnissen	Membranfiltration	Mittel

Quelle: eigene Erhebungen

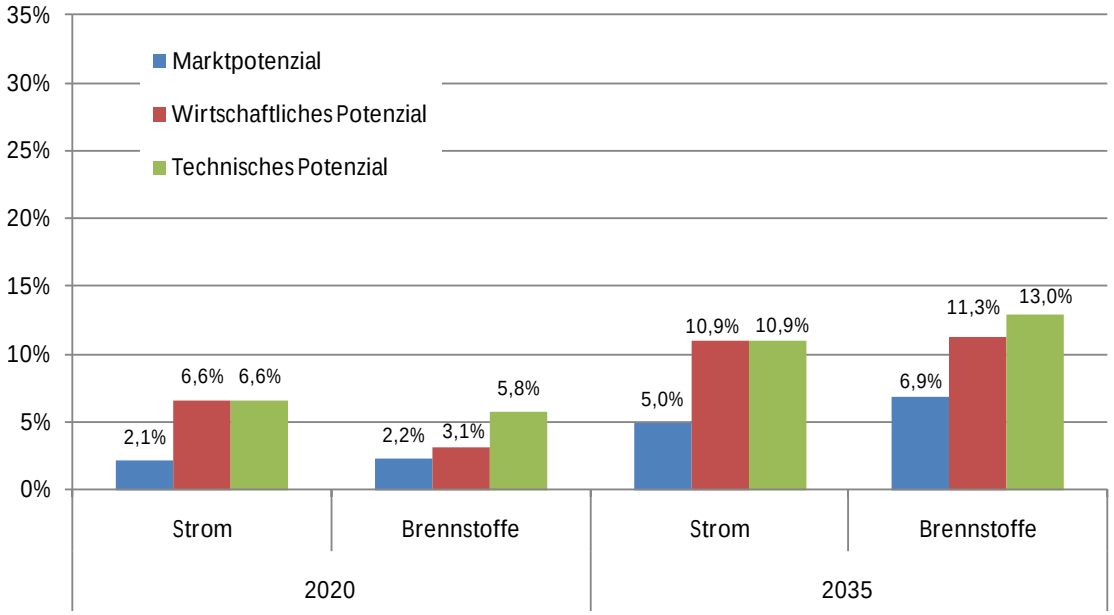
Der Überblick über die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Einsparmaßnahmen zeigt durchaus große Schwankungen (vgl. Tabelle 9-4). Die Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienzinvestitionen hängt davon ab, wie aufwändig der Umbau in bestehenden Anla-

gen bzw. bestehenden Betrieben ist oder wie innovativ oder etabliert die eingesetzten Technologien sind. Denn wenn die Technologie noch relativ neu ist und bisher wenig eingesetzt wird, bestehen meist hohe Kostensenkungspotenziale.

9.4 Szenarien zur Wirkung der Einsparpotenziale

Die mögliche zukünftige Wirkung der diskutierten Einsparoptionen bezieht sich auf den gesamten Endenergieverbrauch der Ernährungsindustrie von 204 PJ im Jahr 2007 und einer Entwicklung in vier verschiedenen Szenarien bis zum Jahre 2035: „Frozen Efficiency“, „Marktdiffusion“, „wirtschaftliche Diffusion“ und „Technische Diffusion“ (vgl. Kapitel 1.4.1 und Tabelle 9-7).

Abbildung 9-10: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen der Ernährungsindustrie bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario für 2020 und 2035

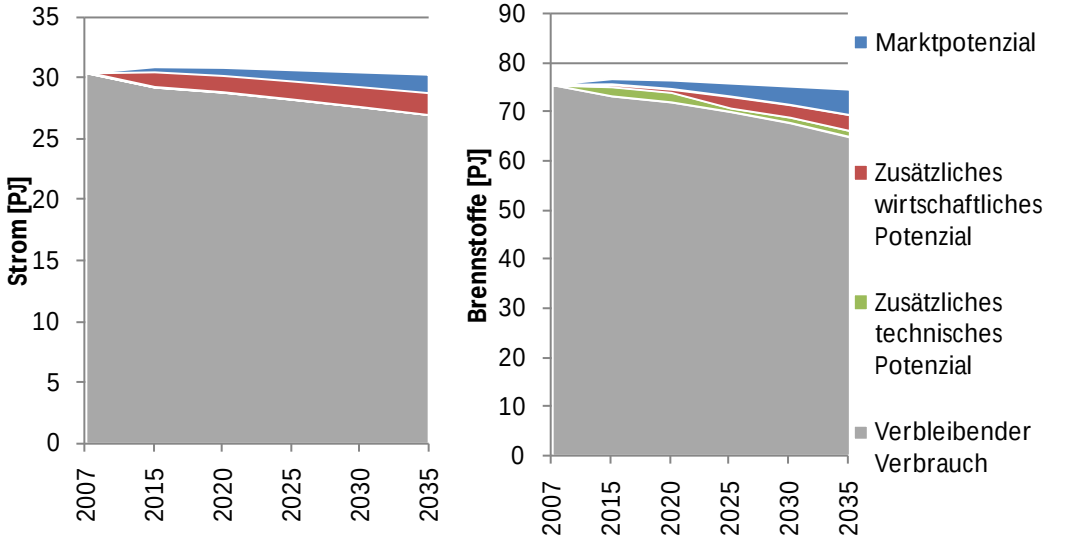


Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in den Kapiteln 9.1 bis 9.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Der gesamte Energieverbrauch im Szenario Frozen Efficiency und die resultierende Einsparpotenziale aus den verbleibenden Szenarien der sechs ausgewählten Branchen der Ernährungsindustrie bis zum Jahr 2035 sind aggregiert in der Abbildung 9-11 dargestellt. Im Szenario Frozen Efficiency steigen sowohl der Strom- als auch der Brennstoffbedarf entsprechend der Produktion zunächst leicht an, ab dem Jahr 2020 beobachtet man jedoch einen leichten Rückgang.

Dabei werden die wesentlichen Unterschiede für den Strom- und Brennstoffbedarf in den unterschiedlichen Szenarien deutlich). Für den Strombedarf konnten nur die Effizienzmaßnahmen berücksichtigt werden, die auf dem Markt relativ weit verbreitet und wirtschaftlich sind. Dementsprechend ist für Stromeinsparungen kein technisches Potenzial vorhanden (vgl. Abbildung 9-11). Beim Brennstoffbedarf wurden zusätzlich mehrere innovative Technologien berücksichtigt, die noch relativ weit vor der Markteinführung stehen, deren Entwicklung aber bis 2035 noch ein zusätzliches Effizienz- Potenzial eröffnen könnte.

Abbildung 9-11: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035



Strom [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	30,4	31,0	30,9	30,7	30,5	30,3
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	0,4	0,7	0,9	1,2	1,5
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Brennstoffe [PJ]	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Energieverbrauch - Frozen Efficiency	75,7	76,8	76,6	75,9	75,3	74,7
Einsparpotenziale						
Marktpotenzial	0,0	1,0	1,7	2,6	3,7	5,2
Zusätzliches wirtschaftliches Potenzial	0,0	0,4	0,7	2,4	2,6	3,3
Zusätzliches technisches Potenzial	0,0	2,0	2,0	0,7	1,1	1,2

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in den Kapiteln 9.1 bis 9.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die dargestellten Einsparpotenziale beziehen sich auf die absoluten Daten zum Endenergiebedarf und THG-Emissionen für die vier Diffusions-Szenarien und werden in

Tabelle 9-5 nach den sechs ausgewählten Branchen der Ernährungsindustrie dargestellt. Es ergeben sich folgende Resultate (auszugsweise):

- Insgesamt vermindert sich der Strombedarf allein durch die verbesserten Prozesse der sechs Branchen im Szenario Wirtschaftliche Diffusion gegenüber Frozen Efficiency im Jahre 2035 um 3,3 PJ (knapp 11 % von 30,3 PJ auf 27 PJ) sowie beim Brennstoffbedarf um 8,4 PJ (gut 11 % von 74,7 PJ auf 66,3 PJ).
- Den größten Beitrag zu diesem wirtschaftlichen Potenzial liefern beim Strom die Milchverarbeitende Industrie mit 2,4 PJ und bei den Brennstoffen die Brauereien mit 2,3 PJ sowie die Zuckerherstellung mit 2 PJ.
- Infolge der kaum sich verändernden Produktionszahlen der Ernährungsindustrie (infolge stagnierender Bevölkerung bei durchschnittlich hohen Pro-Kopf-Einkommen) erhöhen sich weder der Strom- noch der Brennstoffbedarf im Frozen-Efficiency-Szenario bis 2035, d. h., man wird auf in Zukunft mit einem abnehmenden Energiebedarf der Ernährungsindustrie rechnen können.

Tabelle 9-5: Resultierender absoluter Energiebedarf (Strom und Brennstoffe) und THG-Emissionen je Branche und je Szenario, 2007 bis 2035

	Strom [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Backwaren	6,39	6,51	6,42	6,51	6,42	6,51	6,42	6,51	6,42
Bierbrauen	3,95	3,90	3,68	3,90	3,68	3,90	3,68	3,90	3,68
Fleischverarbeitung	7,32	7,55	7,66	7,38	7,27	6,98	6,72	6,98	6,72
Molkerei	7,51	7,58	7,36	7,09	6,25	6,11	4,98	6,11	4,98
Stärke	2,50	2,55	2,51	2,55	2,51	2,55	2,51	2,55	2,51
Zucker	2,77	2,80	2,72	2,80	2,72	2,80	2,72	2,80	2,72
Summe	30,45	30,90	30,34	30,24	28,84	28,85	27,02	28,85	27,02

	Brennstoffe [PJ]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Backwaren	10,61	10,81	10,65	10,63	10,24	10,30	9,80	10,30	9,80
Bierbrauen	9,80	9,69	9,12	9,27	7,59	9,18	6,77	9,05	6,75
Fleischverarbeitung	9,64	9,94	10,09	9,78	9,72	9,68	9,50	9,68	9,50
Molkerei	22,27	22,46	21,80	22,27	21,42	22,27	20,10	20,95	20,10
Stärke	5,71	5,82	5,73	5,56	4,98	5,43	4,71	5,43	4,71
Zucker	17,69	17,85	17,32	17,34	15,60	17,34	15,38	16,75	14,17
Summe	75,71	76,57	74,71	74,86	69,54	74,20	66,26	72,16	65,03

	Treibhausgasemissionen [kt CO_2eq]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Backwaren	1.806	1.766	1.345	1.755	1.320	1.734	1.293	1.734	1.293
Bierbrauen	1.818	1.753	1.419	1.721	1.305	1.713	1.247	1.705	1.246
Fleischverarbeitung	1.911	1.886	1.447	1.848	1.381	1.774	1.309	1.774	1.309
Molkerei	2.734	2.670	2.123	2.575	1.979	2.410	1.760	2.328	1.760
Stärke	804	790	621	774	576	766	559	766	559
Zucker	1.600	1.579	1.345	1.548	1.241	1.548	1.228	1.511	1.155
Summe	10.673	10.444	8.299	10.221	7.802	9.945	7.396	9.819	7.322

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den in den Kapiteln 9.1 bis 9.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs (vgl. Tabelle 9-7) für die sechs ausgewählten Branchen reflektiert die Effizienz-Potenziale für die strom- oder brennstoffrelevanten Prozesse (z. B. nur die stromrelevanten Effizienzmaßnahmen der fleischverarbeitenden und milchverarbeitenden Industrien). Die Zahlen in Tabelle 9-5 und in Tabelle 9-7 reflektieren **nicht** die die insgesamt möglichen und wirtschaftlichen Effizienz-Maßnahmen der jeweiligen Branchen. Denn die Wirkungen der Effizienz-Optionen der Querschnittstechnologien (z. B. Druckluft, Vakuum, Beleuchtung, Heizung, Ventilation) sind hier nicht berücksichtigt.

Tabelle 9-6: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse

	Produktion [kt]					
Prozess	2007	2015	2020	2025	2030	2035
Backwaren	4.420	4.504	4.504	4.481	4.459	4.437
Bierbrauen	10.063	10.101	9.951	9.753	9.560	9.371
Fleischverarbeitung	4.730	4.844	4.880	4.905	4.929	4.954
Molkerei	14.173	14.370	14.298	14.156	14.015	13.875
Stärke	1.850	1.885	1.885	1.876	1.866	1.857
Zucker	3.928	3.983	3.963	3.923	3.884	3.845

Quelle: Annahmen für Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES

Tabelle 9-7: Resultierender spezifischer Energiebedarf (Strom und Brennstoffe) je Branche und je Szenario, 2007 bis 2035

	Strom [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Backwaren	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Bierbrauen	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Fleischverarbeitung	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4
Molkerei	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Stärke	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Zucker	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

	Brennstoffe [GJ/t]								
	Basisjahr	Frozen Efficiency		Marktbarrieren		Wirtschaftliche Diffusion		Technische Diffusion	
Prozess	2007	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
Backwaren	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,3	2,2
Bierbrauen	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	0,7	0,9	0,7
Fleischverarbeitung	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	2,0	1,9
Molkerei	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,6	1,4	1,5	1,4
Stärke	3,1	3,1	3,1	2,9	2,7	2,9	2,5	2,9	2,5
Zucker	4,5	4,5	4,5	4,4	4,1	4,4	4,0	4,2	3,7

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Die Einsparungen für das Szenario Technische Diffusion, die durch berücksichtigte Einsparoptionen erzielt werden könnten, zeigt Tabelle 9-8. Die hier dargestellten Potenziale sind als Differenz der Szenarien Frozen Efficiency und Technische Diffusion berechnet. Dabei bestehen wesentliche Potenziale für Brennstoffeinsparungen bei dem Szenario Technische Diffusion in den Branchen der Brauindustrie, Zucker- und Stärkeherstellung[77]. Hier ist nochmals darauf hinzuweisen, dass in diesem Szenario die mögliche Effizienzsteigerung dargestellt wird, wenn wirtschaftliche Überlegungen völlig außer acht gelassen werden.

Tabelle 9-8: Resultierende technische Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption

	Energie-Einsparpotenzial						THG Vermeidung		
	Strom [PJ]		Brennstoffe [PJ]		Strom [%]	Brennstoffe [%]	[kt CO_2eq]		[%]
	2020	2035	2020	2035	2035	2035	2020	2035	2035
Ernährungsgewerbe	2,05	3,32	4,40	9,69	**11%**	**13%**	625	978	**9%**
Backwaren	-	-	0,51	0,84	**0%**	**8%**	32	51	**3%**
Abwärmenutzung Öfen	-	-	0,19	0,32			12	19	
Volle Auslastung der Öfen	-	-	0,32	0,53			20	32	
Bierbrauen	-	-	0,64	2,38	**0%**	**26%**	47	173	**10%**
BHKW mit Zeolithspeicher	-	-	0,04	0,06			2	4	
Biertrebevergärung für Biogas	-	-	0,26	1,00			16	60	
Rektifikationswürzekochung	-	-	0,34	1,32			29	109	
Fleischverarbeitung	0,57	0,94	0,27	0,59	**12%**	**6%**	112	138	**7%**
Intergration einer Wärmepumpe	-	-	0,27	0,59			16	36	
optimale Auslegung bei Kühlung	0,57	0,94	-	-			96	103	
Molkerei	1,47	2,38	1,51	1,70	**32%**	**8%**	342	363	**14%**
regenerative Wärmetauscher	-	-	1,51	1,70			94	103	
Teilhomogenisierung	1,47	2,38	-	-			248	259	
Stärke	-	-	0,39	1,02	**0%**	**18%**	24	62	**8%**
Membranfiltration	-	-	0,39	1,02			24	62	
Zucker	-	-	1,09	3,15	**0%**	**18%**	68	191	**12%**
Mehrstufige Verdampfung	-	-	0,26	0,39			16	24	
Wirbelschicht-Verdampfungstrocknung	-	-	0,70	2,59			43	157	
Zweistufentrocknung der Schnitzel	-	-	0,14	0,16			9	10	

Quelle: Modellrechnungen Fraunhofer ISI und IREES basierend auf den Kapitel 8.1 bis 8.3 genannten Datenquellen und Annahmen

Für die Ernährungsindustrie insgesamt besteht nach heutiger Kenntnis für den Prozessenergiebedarf noch maximal ein technisches Einsparpotenzial von 11 % beim Strom und von 13 % bei den Brennstoffen. Dieses Ergebnis bezieht sich **nicht** auf die gesamte Branche, sondern auf die sechs betrachteten Teilsektoren der Ernährungsindustrie. Darüber hinaus konnten aufgrund der Datenverfügbarkeit und der komplexen Produktionsprozesse innerhalb der Ernährungsindustrie nicht alle in Kapitel 9.3 aufgeführten Effizienzoptionen mit quantitativen Kennwerten in die Untersuchung mit einfließen.

77 Die Prozentwerte sind als technisches Potenzial bezogen auf den Energieverbrauch im Frozen Efficiency Szenario des Jahres 2035 berechnet.

Die größten relativen Effizienzpotenziale der Prozesse in den sechs Branchen weisen

- im Strombereich die fleisch- und milchverarbeitende Industrie mit 12 % bzw. 32 % auf sowie
- im Brennstoffbereich die Brauereien (10 %), die Milchverarbeitung (14 %) und die Zuckerherstellung (12 %). Hier sind in allen sechs Branchen Effizienzpotenziale in den Prozessen zu realisieren.

9.5 Branchenspezifische Hemmnisse und fördernde Faktoren

Branchenspezifische Hemmnisse

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Experten aus der Ernährungsindustrie zu dem Thema der Hemmnisse der energieeffizienten Technologien befragt. Die Ergebnisse dieser Befragung sind gemeinsam mit den anderen Industriesektoren im Kapitel 2 ausgewertet und kommentiert. An dieser Stelle werden lediglich die von den befragten Experten genannten und für die Ernährungsindustrie charakteristischen Hemmnissen beschrieben.

Die meisten Branchen der deutschen Nahrungsmittelindustrie sind mittelständisch strukturiert, wenngleich es einerseits Konzentrationsprozesse gibt (z. B. bei Brauereien), andererseits auch Global Player (z. B. Nestlé, Danone oder Coca-Cola). Somit lassen sich Hemmnisse nach zwei Unternehmensgrößen unterscheiden: die typischen mittelständischen Unternehmen und die von einer (meist im Ausland befindliche) Unternehmenszentrale aus agierenden technischen Abteilungen der global Player.

Allgemeine Hemmnisse, unabhängig von der Unternehmensgröße

- Sehr häufig – selbst bei großen Unternehmen – wird bei der Investition lediglich auf die Höhe der Investitionssumme geachtet und nach der Amorisationszeiten-Methode entschieden. Die Abfrage im Angebot nach den Lebenszykluskosten von zwei Alternativen und die entsprechende Ermittlung des Barwertes oder der internen Verzinsung sind sehr selten.
- Zudem gibt es häufig eine nachrangige Priorität von Energieeffizienz-Investitionen im Bereich der Nebenanlagen (Querschnittstechnologien). Somit werden Investitionen in Produktionsanlagen, Gebäude oder Repräsentation den Energieeffizienz-Investitionen systematisch vorgezogen. Es hängt dann von dem insgesamt zur Verfügung stehenden Investitionsbudget ab, in wie weit noch Energieeffizienz-Investitionen getätigt werden.

Diese beiden Hemmnisse wurden von den meisten Befragten als sehr wichtig oder eher wichtig bewertet.

Allerdings entsteht bei größeren Re-Investitionen wie z. B. Kesselanlagen ein Umdenken. Auch beobachtet man dieses Umdenken in den zentralen Technikabteilungen der Großunternehmen, die spezielle Lösungen im Bereich Energieeffizienz ausarbeiten und diese Lösung dann für alle Betriebe verpflichtend wird (z. B. bei Nestlé). Oder es werden jährliche THG-Emissionsminderungsziele für jeden Betrieb eines Unternehmens vorgegeben (z. B. Danone). Dies ist eine positive Entwicklung, wenngleich diese voraussetzt, dass die zentrale Technikabteilung einen sehr guten Marktüberblick hat und ihre Lösungen jeweils an den technischen Fortschritt anpasst.

Kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

Der technische Leiter der mittelständischen Betriebe ist in der Regel für viele Aufgaben – auch für die energieeffizienten Produktions- und Nebenanlagen – zuständig. Sein Arbeitsfokus ist in aller Regel die eigentliche Produktion und die Produktqualität, nicht aber die Senkung von Energiekosten, die in aller Regel unter 5 bis 10 % der Produktionskosten liegen. Nach den Erkenntnissen aus den durchgeführten Interviews gelten für die kleinen und mittelständischen Betriebe folgende Hemmnisse[78]:

- Der Energieverbauch einzelner Betriebsteile und Prozesse ist meist nicht bekannt, die Energiekosten werden als Gemeinkosten behandelt, der Marktüberblick über energieeffiziente Optionen ist sehr gering.
- Nicht zuletzt wegen der geringen Kenntnisse über energieeffiziente Lösungen befürchten die Betriebe Qualitätseinbußen oder Veränderungen bei Sicherheit, Zuverlässigkeit, Hygiene oder Arbeitsproduktivität.
- Technische Standards für energieeffiziente Investitionen oder Vorgaben zu energieeffizienten Komponenten für die Ausschreibungen des Einkaufs sind praktisch nicht vorhanden, bieten also keine Hilfe.
- Ein weiteres zentrales Hemmnis sind Zeitmangel des technischen Leiters und bestehende Ablaufroutinen, die nicht hinterfragt werden (z. B. beim Einkauf die geringste Investitionssumme ohne technische Vorgaben und o. g. Hemmnisse).
- Häufig gibt es auch keinen ausgewiesenen Energieverantwortlichen, der Energieverluste aufspürt (z. B. Druckluftleckagen, Abwärme, fehlende Isolation) und Vorschläge für energieeffiziente Maßnahmen macht.

78 Nur wenn es ein Steckenpferd des technischen Leiters ist, nach der Energieeffizienz zu schauen, gelten die genannten Hemmnisse in der Regel nicht.

Fördernde Faktoren

Sowohl bei großen Unternehmen wie auch in KMU gibt es neuerdings die Tendenz, das Image des Unternehmens bei seinen Kunden – insbesondere bei Endkunden – durch eine umweltfreundliche und energieeffiziente Produktion zu verbessern und sich dadurch von anderen Produkten abzuheben. Ein Beispiel ist die jüngste Aktion der Coca-Cola GmbH (5 % CO_2-Reduktion bei steigender Produktion, neue Kühlgeräte mit 40 % weniger Strombedarf, Ausstieg aus der FKW-Kühlung mit Unterstützung des Top-Managements, Mitarbeitermotivation und Zusammenarbeit/Kontrolle durch eine grüne Organisation wie den WWF).

Von den befragten Experten wurde bestätigt, auch aufgrund von bisheriger Erfahrung, dass das Thema Energieeffizienz einen zunehmend hohen Stellenwert erhält, insbesondere, wenn ein Energiemanagementsystem im Unternehmen eingeführt wird. Bei großen Unternehmen kann die Einführung des Energiemanagements auch zu einer Steigerung der Motivation der Mitarbeiter führen. Damit lässt sich die Einführung eines Energiemanagementssystems als wichtiger fördernder Faktor für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen identifizieren.

9.6 Branchenspezifische politische Instrumente

9.6.1 Bestehende Instrumente

Zu den existierende politischen Instrumenten der Energieeffizienz in der Ernährungsindustrie zählen die Initiative der Bundesvereinigung der Ernährungsindustrie über Energieeffizienz-Netzwerke und Beteiligung der deutschen Zuckerindustrie in der Selbstverpflichtungserklärung zur Klimavorsorge.

Im Jahr 2008 initiierte die Bundesvereinigung der Ernährungsindustrie ein **Netzwerk zum Thema Energieeffizienz** speziell für die Unternehmen der Branche. Bislang haben sich in Deutschland insgesamt rund 270 Unternehmen in 18 Energieeffizienz-Netzwerken zusammengeschlossen. So konnte beispielsweise ein Netzwerk mit 16 Unternehmen aus Baden-Württemberg in einem Jahr rund 3 Mio. € an Energiekosten einsparen (DEI 2009b, BVE 2009).

Im Rahmen der **Selbstverpflichtungserklärung** der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge hat sich die deutsche Zuckerindustrie im Jahr 2000 dazu verpflichtet, ausgehend vom Jahr 1990 den spezifischen CO_2-Ausstoß bis zum Jahr 2005 um 41 bis 45 % zu verringern. Dies bedeutet eine Minderung der spezifischen CO_2-Emissionen im Basisjahr von 148 kg/t Rüben auf 81 bis 87 kg/t Rüben im Jahr 2005. Im Jahr 2008 hat sich der Verein der Zuckerindustrie ab 2006 zu weiterem Ziel verpflichtet, nämlich eine

Minderung der spezifischen CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2012 auf 85 bis 79 kg/t Rüben. Nach Angaben des Verbandes (VdZ 2009) wird trotz weiterer technischer Anstrengungen in der Zukunft erwartet, dass nur noch geringfügige CO_2-Minderungen erzielt werden können. Dies steht im Einklang mit den o. g. Potenzialen des Szenarios Wirtschaftliche Diffusion.

9.6.2 Weitere Empfehlungen zu Instrumenten

Als spezifische Maßnahmen der Politik und der betroffenen Verbände im Ernährungsgewerbe schlagen die Autoren aufgrund der Hemmnisse und der fördernden Faktoren vor:

- eine Informationskampagne der Anwender-Verbände der Nahrungsmittelindustrie und des VDMA zum Thema der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für energieeffiziente Lösungen (Lebenszykluskosten, Barwert und interne Verzinsung) sowie zu Ausschreibungen zu Investitionen mit energietechnischen Standards.
- Eine Informations- und Fortbildungskampagne der Verbände der Nahrungsmittelindustrie und des ZVEI zu energietechnischen Messverfahren und kostengünstigen Energiemanagement-Systemen für KMU.
- Eine Initiative der Bundesregierung, an die großen Unternehmen der Nahrungsmittelindustrie mit der Bitte heranzutreten, ehrgeizige Energieeffizienzprogramme und Maßnahmen zu FKW-freien Kühl- und Kälteanlagen durch ihre technische Zentralen entwickeln zu lassen. Hierzu könnte eine vergleichbare Initiative wie mit dem DIHK entwickelt werden.

9.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bei der Betrachtung der historischen Entwicklung des Endenergiebedarfs der Ernährungsindustrie beobachtet man einen Anstieg von 11 % von 1998 (183,5 PJ) bis 2007 (204,3 PJ). Dabei ist der Strombedarf um 33 % (von 46,2 PJ in 1998 auf 61,4 PJ in 2007) gestiegen und Brennstoffbedarf nur um 4 % gewachsen (von 137,2 PJ in 1998 auf 142,9 PJ in 2007) (AGEB 2009). Für diesen Trend ist u. a. die zunehmende Automatisierung der Produktion in der Ernährungsindustrie sowie der steigende Bedarf nach Fertig- und Tiefkühlprodukten die Ursache. Dennoch haben die Unternehmen des Ernährungsgewerbes viele Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz unternommen, da dieser mittelständisch geprägter Sektor seit Jahren unter hohen, die Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigenden Energiekosten leidet. In jüngster Zeit haben sich einige Großunternehmen mit direkten Endkunden-Produkten ehrgeizige Energieeffizienz- und CO_2-Minderungs-Ziele gesetzt.

Die Analyse der Technologien und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Ernährungsindustrie hat gezeigt, dass mit den ausgewählten 13 Einsparoptionen eine Reduktion des Strombedarfs um 11 % und des Brennstoffbedarfs um 13 % bis 2035 technisch möglich ist (jeweils im Vergleich zum Frozen-Efficiency-Szenario).

Trotz erreichter Energieeffizienzsteigerungen liegen noch weitere wesentliche Effizienzpotenziale bei innovativen Technologien in den jeweiligen Prozessen vor, wie z. B.

- die Behandlung von Lebensmitteln mit gepulsten elektrischen Feldern zur Pasteurisierung,
- Hochdruckverfahren zur Pasteurisierung und Sterilisation von Lebensmitteln,
- eine energetische Nutzung von organischen Abfällen aus der Ernährungsindustrie (z. B. via Biogaserzeugung und anschließender Nutzung als Brennstoff).

Einsparpotenziale bei Querschnittstechnologien wie Motoren, Pumpen, Beleuchtung und Kälteerzeugung wurden hier nicht berücksichtigt, da diese Technologien nicht Untersuchungsgegenstand waren, sie sind aber als erheblich einzuschätzen.

Für die Unternehmen der sechs untersuchten Branchen der Ernährungsindustrie (mit etwa 52 % des Energiebedarfs des gesamten Industriezweiges) stellen eine verbesserte Prozessführung und neue Prozesstechniken, die teilweise schon eingeführt sind, das bedeutendste Potenzial dar, wirtschaftlich und nachhaltig Primärenergieeinsparungen von durchschnittlich 10 % zu realisieren.

Die Realisierung selbst hängt einerseits von Re-Investitionszyklen und räumlichen Möglichkeiten ab, andererseits in erheblichem Umfang von der Verminderung von Hemmnissen insbesondere in den mittelständischen Unternehmen der Ernährungsindustrie. Hier ist die Branche durch die Etablierung von Energieeffizienz-Netzwerken auf gutem Wege. Wichtig wären die weiteren vorgeschlagenen Maßnahmen der Selbstorganisationen der Branche, des VDMA und weiterer Akteure möglichst bald zu realisieren.

9.8 Literatur

AGEB (2009): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1990-2007 und Auswertungstabellen 1990-2008. Stand 28. Oktober 2009. DIW Berlin, EEFA, Köln http://www.ag-energiebilanzen.de

BREF (2006): Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries. European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control. IPTS, August 2006. Internet: http://eippcb.jrc.es/reference/

BVE (Hrsg.) (2009): Klima und Umweltschutz in der Ernährungsindustrie. Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie Berlin, https://www.bve-online.de/presseservice/veroeffentlichungen/bve-klima-umwelt2009/

BVE (Hrsg.) (2010): Jahresbericht 2009-2010. Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie Berlin, www.bve-online.de/presseservice/pressemitteilungen/pm_100504/

DBB (2009a): Die deutsche Brauwirtschaft in Zahlen 2008. Berichte des Deutschen Brauer-Bundes, Berlin

DBB (2009b): Vom Halm zum Glas. Brauprozesse. Deutscher Brauer-Bund, Berlin

DEI (2009a): Darauf ein Energiesparbier. Die Ernährungsindustrie, Fachartikel, September 2009

DEI (2009b): Unternehmensmeldung: Unternehmen bündeln ihre Kräfte. Die Ernährungsindustrie, Nr. 6

DEI (2010): Joest, S., Streibel, M.: Energieeffizientes Kochverfahren beim Bierbrauen. Die Ernährungsindustrie, Fachartikel, Januar 2010

EU Zuckermarktordnung (2001): EU (2001a), EG Verordnung Nr. 1260/2001 des Rates vom 19. Juni 2001 über die gemeinsame Marktorganisation für Zucker. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L178/1. Brüssel: Europäische Kommission, Internet: www.eur-lex.europe.eu/de/index.html

Foissy, H. (2005): Technologie der Milch. IMB-Verlag 2005. Universität für Bodenkultur Wien

FSI (2009): Zahlen und Fakten zur Stärke-Industrie 2009. Pressemitteilung, Fachverband der Stärke-Industrie Berlin

Fritzson, A., Berntsson, T. (2005): Energy Efficiency in the slaughter and meat processing industry – opportunities for improvements in future energy markets. Journal of Food Engineering 77, 2006, S.792-802

GTM (2009): Bier zum energetischen Nulltarif. Getränke Technologie und Marketing 5/2009

Hertel, M., Scheuren, H., Dauth, H., Sommer, K. (2007): Ein neues Würzekochsystem auf Basis der Rektifikation. Lehrstuhl für Maschinen- und Apparatenkunde, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, erschienen im „Der Weihenstephaner“ 2/2007

IfUL (2003): Stärke. Institut für umweltgerechte Landbewirtung: http://www.inaro.de/Deutsch/ROHSTOFF/industrie/STAERKE/starke.htm 25.5.2010

Kuhn, H.; Leis, U. (1999): Energieeinsparung in Bäckereien. In: Energie Effizient nutzen – Schwerpunkt Strom – Modellvorhaben und Fachartikel. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe

LFU (2000a): Minderung öko- und klimaschädigender Abgase aus industriellen Anlagen durch rationelle Energienutzung – Fleischverarbeitender Betrieb. Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg

LFU (2000b): Minderung öko- und klimaschädigender Abgase aus industriellen Anlagen durch rationelle Energienutzung – Großbäckerei. Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg

MIV (2009): Einblick, Analysen und Perspektiven. Geschäftsbericht des Milchindustrie-Verbands 2008/2009. Berlin. Internet: http://www.milch-markt.de/de/presse/geschaeftsbericht/miv_geschaeftsbericht_2008_2009.pdf

Meyer, J.; Kruska, M.; Kuhn, H-G.; Sieberger, B-U.; Bonczek, P. (2000): Rationelle Energienutzung in der Ernährungsindustrie – Leitfaden für die betriebliche Praxis. Vieweg Verlag

Rausch, K. D. (2002): Front End to Backpipe: Membrane Technology in the Starch Processing Industry.

RWI (2009): Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2008. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung

Statistisches Bundesamt (2008): Fachserie 4, Reihe 3.1, Produktion im Produzierenden Gewerbe 2007. Stand 6.5.2008

Statistisches Bundesamt (2009a): Fachserie 4, Reihe 4.3, Kostenstrukturstatistik 2007. Stand 18.5.2009

Statistisches Bundesamt (2009b): Erhebung über die Energieverwendung. Energieverbrauch nach Energieträgern. Berichtszeitraum 2007 sowie Stromerzeugungsanlagen 2007 der Betriebe im Bergbau und Verarbeitenden Bergbau. Brennstoffeinsatz für die Strom- und/oder Wärmeerzeugung nach Energieträgern. Wiesbaden

Statistisches Bundesamt (2009c): Bierabsatz im ersten Halbjahr 2009 um 4,5 % gesunken. Pressemitteilung Nr. 286 vom 30.6.2009, Wiesbaden

Südzucker (2009): Prozesse der Zuckergewinnung.

VDG (2009): Die Struktur des Backwarenmarkts in Deutschland. Pressemitteilung Sept. 2009, Verband Deutscher Großbäckereien

VDF (2009): Wirtschaftliche Entwicklung 2008. Jahresbericht des Verbandes der Fleischwirtschaft 2008/2009. Bonn

VdZ (2009): Monitoring über die Minderung des CO_2-Ausstoßes in der Zuckerindustrie. 13. Verbändebericht für das Jahr 2008. Verein der Zuckerindustrie, Berlin

Wang, L. (2009): Energy efficiency and management in food processing facilities. CRC Press

WVZ (2009a): Zuckerbilanz in Deutschland 2007/2008. Zuckermarkt Deutschland, Wirtschaftliche Vereinigung Zucker, Bonn

WVZ (2009b): Prozesse der Zuckererzeugung. Wirtschaftliche Vereinigung Zucker, Bonn

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
ACD	Annoden-Kathoden-Abstand
ACP	Advanced conventional process
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
Al	Aluminium
ASK	Ringschaftofen
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAT	Best available technology
BAU	Business as Usual
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
BDZ	Bundesverband der Deutschen Zementindustrie
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BREF	Best Available Technique Reference Documents
BTL	Biomass to Liquids
BV Glas	Bundesverband der Deutschen Glasindustrie
BV Kalk	Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie
BVE	Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie
BVT	Beste Verfügbare Technik
C_2F_6	Hexafluorethan
$CaCO_3$	Calciumcarbonat
CaO	Kalk
CCS	Carbon Capture and Storage
CDM	Clean Development Mechanism
CEFIC	European Chemical Industry Council
CEPI	Confederation of European Paper Industries
CF_4	Tetrafluorethan
CFD	Numerische Strömungsmechanik (computational fluid dynamics)
CH_4	Methan
Cl_2	Chlor
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
CO_2-eq.	CO_2-Äquivalente
CSP	Compact Strip Production
CTMP	Chemo-Thermo-Mechanical Pulp
Cu	Kufper
CuS	Spurstein
DBB	Deutscher Brauer-Bund
DC	Direct Current

DEI	Die Ernährungs-Industrie
DGG	Deutsche Glastechnische Gesellschaft
DIHK	Deutscher Industrie- und Handelskammertag
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DREBS	Drehgenerator-Brenner-System
DRI	Direct Reduced Iron
E.M.S.	Energie-Management-System
EAF	Elektrolichtbogenofen (electric arc furnace)
EBPG	Energiebetriebene-Produkte-Gesetz
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EMAS	Eco- Management and Audit Scheme
ERP	European Recovery Programme
ES	Elektrostahl
ESP	Endless Strip Production
ETBE	Ethyltertiärbuthylether
ETS	Emissionszertifikate
EU	Europäische Union
EUA	Emissionszertifikate
EU-EH	Europäischer Emissionshandel
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoff
Fe_2O_3	Eisenerz
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
FKW	Fluor-Kohlenwasserstoff
FSI	Fachverband der Stärke-Industrie
FuE	Forschung und Entwicklung
FW	Fernwärme
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GJ	Gigajoules (10^9 Joules)
GTM	Getränke Technologie und Marketing
GuD	Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
GW	Groundwood
H.v.	Herstellung von
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
HBI	Hot Briquetted Iron
HCl	Chlorwasserstoff
HDPE	High density polyethylene
HFC	Fluorkohlenwasserstoff
HNO_3	Salpetersäure
HPR	Heat exchange autothermal reforming
HSD	High Strength and Ductility Steel (hochfester Stahl)
HSLA	Hochfeste, niedriglegierte Stähle
HVC	High value chemicals

HVG	Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie
IAI	Internationales Aluminium-Institut
IEA	International Energy Agency
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaprogramm
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IfUL	Institut für umweltgerechte Landbewirtung
IISI	International Iron and Steel Institute
iku	Innovationspreis für Klima und Umwelt
IPCC	Intergovernmental Panel On Climate Change
IPTS	Institute for Prospective Technological Studies
IREES	Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien
IT	Informationstechnik
JI	Joint Implementation
KCL	Papiertechnisches Forschungsinstitut (Finnland)
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
kJ	Kilojoules (10^3 Joules)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KRS	Kombinierter Schmelz- und Konverterprozess
KW	Kohlenwasserstoffe
kWh	Kilowattstunde (10^3 Wattstunden)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCD	Flüssigkristallanzeige (liquid crystal display)
LDPE	Low density polyethylene
LEEN	lernende Energieeffizienz-Netzwerke
LfU	Landesamt für Umwelt
LFU	Bayrisches Landesamt für Umweltschutz
LLDPE	Linear low density polyethylene
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas)
LRK	Landdrehrohrofen
MAX	Maximale Diffusion
MDI	Methylenbisphenylisocyanat oder Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat
MFSK	Schaftofen mit Mischfeuerung
MIV	Milchindustrie-Verband
MJ	Megajoules (10^6 Joules)
Mt	Megaton
MTBE	Methyltertiärbuthylether
MW	Megawatt (10^6 Watt)
N, N_2	Stickstoff
N_2	Stickstoff
N_2O	Distickstoffoxid oder Distickstoffmonoxid
Na_2CO_3	Natriumcarbonat
Na_2S	Natriumsulfid

NACE	Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft
NaOH	Natriumhydroxid (Ätznatron)
NAP	Nationaler Allokationsplan
NEEAP	Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan der Bundesrepublik Deutschland
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NH_3	Ammoniak
NKI	Nationale Klimainitiative
NO_x	Stickstoffoxide
NSCR	Nicht-selektive katalytische Reduktion
o.J.	Ohne Jahresangabe
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OEM	Original Equipment Manufacturer
OK	Andere Ofentypen
ORC	Organic Rankine Cycle
ÖSR	Ökologische Steuerreform
Pb	Blei
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzelle
PET	Polyethylenterephthalat
PFC	Perfluorcarbon
PFRK	Gleichstrom-Regenerativ-Ofen
PGW	Pressure Groundwood
PI	Permanent-Impuls-Verfahren
PJ	Petajoules (10^{15} Joules)
PRK	Drehrohrofen mit Vorwärmer
PTS	Papiertechnische Stiftung
PVC	Polyvinylchlorid
RE	Roheisen
REACH	EU-Verordnung zur Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien
RMP	Refiner Mechanical Pulp
RPR	Reduced primary reforming
RS	Rohstahl
RTS	Residence Time, Temperature und Speed
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
SF_6	Schwefelhexafluorid
SiC	Siliciumcarbid
SiO_2	Siliciumdioxid (Quarzsand)
SO_2	Schwefeldioxid
SO_x	Schwefeloxide
t RE	Tonne Roheisen
TA	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft; Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz
TDA	Toluylendiamin
TDI	Toluylendiisocyanat oder Toluol-2,4-diisocyanat
TDM	2,4-Toluylendiamin oder 2,4-Diamintoluol

TFEU	Total final energy use
THG	Treibhausgas
TiB_2	Ttandiborid
TJ	Terajoules (10^{12} Joules)
TMP	Thermo-Mechanical Pulp
TPEU	Total primary energy use
TWh	Terawattstunde (10^{12} Wattstunden)
UBA	Umweltbundesamt
UHT	Ultra High Temperature
ULCOS	Ultra Low CO_2 Steelmaking
VCI	Verband der Chemischen Industrie
VDEh	Verband deutscher Eisenhüttenleute
VDF	Verband der Fleischwirtschaft
VDG	Verband Deutscher Großbäckereien
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VDP	Verband deutscher Papierfabriken
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
VdZ	Verein der Zuckerindustrie
VÖZ	Vereinigung der österreichischen Zementindustrie
WVM	Wirtschaftsvereinigung Metalle
WVZ	Wirtschaftliche Vereinigung Zucker
WWF	World Wide Fund For Nature
WZ-Nummer	Wirtschaftszweignummer
ZKG	Zement-Kalk-Gips International
Zn	Zink
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie
ΔH	Reaktionsenthalpie

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 1-1: Entwicklung von Endenergieverbrauch und energiebedingten CO_2-Emissionen im Sektor Industrie, 1990-2008 18
Abbildung 1-2: Überblick der Arbeitsschritte 23
Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Modellhierarchie am Beispiel des Papiergewerbes 25
Abbildung 1-4: Klassifizierung der in der Studie untersuchten Einsparpotenziale 27
Abbildung 2-1: Energieverbrauch, Bruttowertschöpfung und Energieintensität (Fläche der Kreise) einzelner Industriebranchen (2007) 43
Abbildung 2-2: Anteile der hier untersuchten Industriebranchen am gesamten Endenergieverbrauch der Industrie 44
Abbildung 2-3: Stromverbrauch der betrachteten Prozesse als Anteil am gesamten Stromverbrauch der Industrie im Jahr 2007 47
Abbildung 2-4: Brennstoffbedarf der betrachteten Prozesse als Anteil am gesamten Brennstoffbedarf der Industrie im Jahr 2007 48
Abbildung 2-5: Strom- und Brennstoffbedarf der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 49
Abbildung 2-6: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 50
Abbildung 2-7: Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis zum Jahr 2020 und 2035 52
Abbildung 2-8: Brennstoff- und Stromverbrauch – Einsparpotenziale und verbleibender Verbrauch aggregiert über alle Prozesse 53
Abbildung 2-9: Potenziale der Treibhausgasvermeidung für die Jahre 2020 und 2035 54
Abbildung 2-10: Strom-Einsparpotenziale nach Industriebranchen im Jahr 2035 55
Abbildung 2-11: Brennstoff-Einsparpotenziale nach Industriebranchen im Jahr 2035 55
Abbildung 2-12: Treibhausgasvermeidung nach Sektoren bis zum Jahr 2035 56
Abbildung 2-13: Technisches Strom-Einsparpotenzial der 30 wirkungsvollsten Einsparoptionen über alle Sektoren 58
Abbildung 2-14: Technisches Brennstoff-Einsparpotenzial der 30 wirkungsvollsten Einsparoptionen über alle Sektoren 59
Abbildung 2-15: Technisches Einsparpotenzial nach Technologiegruppen aller modellierten Prozesse 61
Abbildung 2-16: Verteilung der Amortisationszeit (in Jahren) je Einsparoption 63
Abbildung 2-17: Kostenkurve der Stromeinsparoptionen bis zum Jahr 2035 (Energie- und EUA Preise enthalten) 65
Abbildung 2-18: Kostenkurve der Brennstoff-Einsparoptionen bis zum Jahr 2035 (Energie- und EUA Preise enthalten) 66
Abbildung 2-19: Kostenkurve der THG-Einsparoptionen bis zum Jahr 2035 (Energie- und EUA Preise enthalten) 67

Abbildung 2-20: Stromverbrauch der Industrie und Einsparpotenziale in Prozess- und Querschnittstechniken (Angaben des technischen Potenzials) 72
Abbildung 2-21: Brennstoffbedarf der Industrie und Einsparpotenziale in Prozess- und Querschnittstechniken (Angaben des technischen Potenzials) 73
Abbildung 2-22: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Informationen als Handlungsgrundlage“ 77
Abbildung 2-23: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Umgang mit Einsparungen, Kosten und Unsicherheiten“ 79
Abbildung 2-24: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Kapitalverfügbarkeit, -beschaffung und -nutzung“ 81
Abbildung 2-25: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Weitere Hemmnisse“ 83
Abbildung 2-26: Einschätzungen der Experten zum Themenfeld „Fördernde Faktoren“ 84
Abbildung 2-27: Erhöhungssätze im Rahmen der Ökologischen Steuerreform in den Jahren 1999 – 2003 90
Abbildung 2-28: Übersicht über alle Antworten aus den Expertengespräche 106
Abbildung 3-1: Kumulativer Brennstoff- und Dampfverbrauch in Deutschland in Abhängigkeit von einer Anzahl ausgewählter Prozesse der Grundstoffchemie 122
Abbildung 3-2: Kumulativer Stromverbrauch in Deutschland in Abhängigkeit von einer Anzahl ausgewählter Prozesse der Grundstoffchemie 122
Abbildung 3-3: Strom- und Wärmeverbrauch der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007 165
Abbildung 3-4: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 168
Abbildung 3-5: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Grundstoffchemiesektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario 246
Abbildung 3-6: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035 247
Abbildung 3-7: Die Entwicklung des Energieverbrauchs nach Prozessen bis 2035 250
Abbildung 3-8: Strom- und Wärmeverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 261
Abbildung 3-9: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Grundstoffchemiesektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario 262
Abbildung 3-10: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035 262
Abbildung 4-1: Produktion (weltweit) von Rohstahl und Aluminium 278
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Stahlherstellungsprozesse für die Modellierung 279
Abbildung 4-3: Entwicklung des Reduktionsmitteleinsatzes bei der Roheisenerzeugung im Hochofen 283

Abbildung 4-4: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 290
Abbildung 4-5: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 291
Abbildung 4-6: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Metallerzeugungssektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario 304
Abbildung 4-7: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035 305
Abbildung 5-1: Produktion von primären und sekundären NE-Metallen sowie Produkten der ersten Verarbeitungsstufe und NE-Metallguss, 2007 318
Abbildung 5-2: Produktion von Hütten- und Sekundäraluminium (in t) in Deutschland 319
Abbildung 5-3: Prozentualer Anteil des (End-)Energieeinsatzes für einzelne Produktgruppen der NE-Metallbranche (einschließlich erster Weiterverarbeitung und NE-Gießereien) 2007 320
Abbildung 5-4: Primärenergieeinsatz zur Herstellung von Primäraluminium in GJ/t Aluminium (oben) und Primärenergieeinsatz zur Herstellung von Sekundäraluminium in GJ/t Aluminium (unten) 322
Abbildung 5-5: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 327
Abbildung 5-6: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 328
Abbildung 5-7: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Nichteisenmetallsektors bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario 335
Abbildung 5-8: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035 337
Abbildung 6-1: Entwicklung von Energiebedarf und Energieintensität im Papiergewerbe 346
Abbildung 6-2: Produktion von Papier und Faserstoffen in Deutschland 346
Abbildung 6-3: Anteile der Sorten an der Papierproduktion in Deutschland 347
Abbildung 6-4: Schematische Abbildung des Papiergewerbes für die Modellierung 350
Abbildung 6-5: Prozessschritte bei der Papierherstellung 358
Abbildung 6-6: Wassergehalt und Verweilzeit bei der Entwässerung der Papierbahn in der Papiermaschine 359
Abbildung 6-7: Systemgrenzen für die Modellierung des Prozesses „Papierherstellung“ 362
Abbildung 6-8: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 364
Abbildung 6-9: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 364
Abbildung 6-10: Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes der Papierherstellung, bezogen auf die jährliche Papierproduktion 366
Abbildung 6-11: Papillon-Zylinderrefiner 368

Abbildung 6-12: Schuhpresse: Zu erkennen ist der verlängerte Pressnip zwischen Presswalze (unten) und Pressschuh (oben), die Nassfilze (in grün) sowie die Papierbahn (in beige) 373

Abbildung 6-13: Anteile der Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch des Papiergewerbes in Deutschland 383

Abbildung 6-14: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen des Papiergewerbes bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario 389

Abbildung 6-15: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035 390

Abbildung 7-1: Prozesskette der Zementproduktion 410

Abbildung 7-2: Lebensweg von Zement und Beton 411

Abbildung 7-3: Schematische Darstellung der Kalkherstellung 414

Abbildung 7-4: Schematische Darstellung der Pressdachziegelherstellung 417

Abbildung 7-5: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 424

Abbildung 7-6: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse im Jahr 2007 425

Abbildung 7-7: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie, 2007 – 2035 447

Abbildung 7-8: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den un-tersuchten Prozessen der Steine-Erden Industrie bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario 450

Abbildung 8-1: Produktionsanteile der unterschiedlichen Glasarten in Deutschland 2007, gemessen in Tonnen 469

Abbildung 8-2: Bruttoproduktionswert der Glasarten in Deutschland, 2007 470

Abbildung 8-3: Produktionsanteile der Keramikarten in Deutschland, 2007 (in Tonnen) 472

Abbildung 8-4: Entwicklung der Produktion (Balkendiagramm in 1000 t) und des spezifischen Energiebedarfs (Linien) in der Glasindustrie, 1995-2007 473

Abbildung 8-5: Prinzipieller Prozessablauf bei der Glasherstellung 476

Abbildung 8-6: Prinzipieller Prozessablauf bei der Keramikherstellung 479

Abbildung 8-7: Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs in der Glasindustrie 1995-2007 482

Abbildung 8-8: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Teilbranchen der Glasindustrie (2007) 483

Abbildung 8-9: Strom- und Brennstoffverbrauch der betrachteten Teilbranchen in der Keramikindustrie (2007) 484

Abbildung 8-10: Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen der Branchen Glas (obere Abbildung) und Keramik (untere Abbildung) bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario 494

Abbildung 9-1: Anteile der Energieträger in der deutschen Ernährungsindustrie, 2007 512

Abbildung 9-2: Vereinfachte schematische Darstellung der Prozesse in der Zuckerherstellung 517
Abbildung 9-3: Standard- und Nebenprodukte der milchverarbeitenden Industrie (vereinfacht) 518
Abbildung 9-4: Beispielhafte Prozessdarstellung bei der Fleisch- und Wurstwaren-Herstellung (vereinfacht) 519
Abbildung 9-5: Schematische Darstellung des Brauprozesses (vereinfacht) 520
Abbildung 9-6: Beispielhafte Prozessdarstellung einer Großbäckerei (vereinfacht) 521
Abbildung 9-7: Schematische Darstellung Stärkegewinnung (Maisstärke) 522
Abbildung 9-8: Strom- und Brennstoffbedarf der betrachteten Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, 2007 529
Abbildung 9-9: Treibhausgasemissionen der betrachteten Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, 2007 529
Abbildung 9-10: Resultierende Einsparpotenziale für Strom und Brennstoffe in den untersuchten Prozessen der Ernährungsindustrie bezogen auf den Verbrauch im Frozen-Efficiency-Szenario für 2020 und 2035 534
Abbildung 9-11: Resultierende Energieeinsparpotenziale für Strom und Brennstoffe bis 2035 535

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1-1: Für die Modellrechnungen angenommene Wirtschaftsentwicklung in der Industrie (reale Bruttowertschöpfung, in Mrd. €) 29

Tabelle 1-2: Für die Modellierung hinterlegte Entwicklung der Energieträgerpreise (€/GJ) 29

Tabelle 1-3: Für die Modellierung hinterlegte Preise für Emissionszertifikate im Europäischen Emissionshandel (EUA) 30

Tabelle 1-4: Für die Modellierung hinterlegte Emissionsfaktoren 30

Tabelle 1-5: Rückläufe der Fragebögen nach Branchen 37

Tabelle 1-6: Instrumententypen der Klima- und Energiepolitik mit Ausgestaltungsbeispielen 38

Tabelle 2-1: Allgemeine Charakteristik der in dieser Studie betrachteten Industriebranchen 45

Tabelle 2-2: Treibhausgaseinsparungen je Szenario über alle betrachteten Prozesse 54

Tabelle 2-3: Auswahl branchenübergreifender und branchenspezifischer Faktoren für den Einsatz von Effizienzmaßnahmen 75

Tabelle 2-4: Tätigkeiten, die in den Geltungsbereich der Richtlinien 2003/87/EG und 2009/29/EG fallen (für detaillierte Angaben vgl. Anhang I der Richtlinien) 88

Tabelle 3-1: Abgrenzung der chemischen Grundstoffindustrie 116

Tabelle 3-2: Bruttoproduktionswert und Endenergieverbrauch (ohne nicht-energetischen Verbrauch) der chemischen Industrie in Deutschland 118

Tabelle 3-3: Geschätzter differenzierter Stromverbrauch in der chemischen Industrie in Deutschland im Jahre 2003 119

Tabelle 3-4: Wichtigste Parameter der Adipinsäure-Herstellung in Deutschland 130

Tabelle 3-5: Rohstoff- und Energieverbrauch bei der Ammoniak-Herstellung 132

Tabelle 3-6: Energetischer und nicht-energetischer Verbrauch bei der Ammoniak-Herstellung 133

Tabelle 3-7: Wichtigste Parameter der Ammoniak-Herstellung in Deutschland 134

Tabelle 3-8: Wichtigste Parameter der Calciumcarbid-Herstellung in Deutschland 135

Tabelle 3-9: Wichtigste Parameter der Ethylen-Herstellung in Deutschland 137

Tabelle 3-10: Wichtigste Parameter der Herstellung von Industrieruß in Deutschland 139

Tabelle 3-11: Wichtigste Parameter der Methanol-Herstellung in Deutschland 140

Tabelle 3-12: Typische Energieverbrauchswerte für Salpetersäure-Anlagen mit Dampfturbinen 142

Tabelle 3-13: Wichtigste Parameter der Salpetersäure-Herstellung in Deutschland 143

Tabelle 3-14: Wichtigste Parameter der TDI-Herstellung in Deutschland (Nitrierung, Hydrierung und Phosgenierung) 145

Tabelle 3-15: Zusammenfassung der Energieverbräuche der organischen Grundstoffe ... 146
Tabelle 3-16: Zusammenfassung der N_2O-Emissionen 2007 bei den organischen Grundstoffen ... 147
Tabelle 3-17: Technologiespezifische Verbrauchswerte für Verfahren zur Chlor-Alkali-Elektrolyse ... 149
Tabelle 3-18: Wichtigste Parameter der Chlor-Herstellung in Deutschland ... 149
Tabelle 3-19: Wichtigste Parameter der Herstellung von Sauerstoff in Deutschland ... 151
Tabelle 3-20: Energieverbrauch bei der Soda-Herstellung ... 153
Tabelle 3-21: Wichtigste Parameter der Soda-Herstellung in Deutschland ... 153
Tabelle 3-22: Energieverbrauch beim Sulfat-Verfahren für deutsche Produktionsstandorte ... 155
Tabelle 3-23: Energiebedarf des Chlorid-Verfahrens, Mittelwerte aus der Anlage in Leverkusen ... 155
Tabelle 3-24: Wichtigste Parameter der Titandioxid-Herstellung in Deutschland ... 156
Tabelle 3-25: Zusammenfassung der Energieverbräuche der anorganischen Grundstoffe ... 157
Tabelle 3-26: Wichtigste Parameter der Polycarbonat-Herstellung in Deutschland ... 158
Tabelle 3-27: Wichtige Parameter für Polyethylen mit ihren Werten ... 160
Tabelle 3-28: Wichtigste Parameter der Polyethylen-Herstellung in Deutschland ... 161
Tabelle 3-29: Wichtigste Parameter der Polypropylen-Herstellung in Deutschland ... 162
Tabelle 3-30: Wichtigste Parameter der Polysulfon-Herstellung in Deutschland ... 163
Tabelle 3-31: Zusammenfassung der Energieverbräuche der Polymere ... 164
Tabelle 3-32: Vergleich der Bottom-up- mit der Top-down-Analyse für 2007 ... 166
Tabelle 3-33: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007 ... 169
Tabelle 3-34: CO_2-Äquivalente der ausgewählten Prozesse für der Basisjahr 2007 ... 169
Tabelle 3-35: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen und die THG-Emissionen für Adipinsäure ... 182
Tabelle 3-36: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Ammoniak ... 190
Tabelle 3-37: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Calciumcarbid ... 193
Tabelle 3-38: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Ethylen ... 199
Tabelle 3-39: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Industrieruß ... 202
Tabelle 3-40: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Methanol ... 206
Tabelle 3-41: Energieverbrauch bei Salpetersäure-Anlagen ... 208
Tabelle 3-42: Kostendaten für sekundäre und tertiäre Maßnahmen für eine 1.000 t/d Salpetersäure-Anlage ... 210

Tabelle 3-43: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen und die THG-Emissionen für Salpetersäure 212
Tabelle 3-44: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für TDI 215
Tabelle 3-45: Szenarien für Energieeinsparpotenziale bei der Chloralkalielektrolyse 221
Tabelle 3-46: Wichtige Parameter zu den Enaergieeinsparpotenzialen für Chlor 221
Tabelle 3-47: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Sauerstoff 224
Tabelle 3-48: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Soda 228
Tabelle 3-49: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Titandioxid 231
Tabelle 3-50: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polycarbonate 234
Tabelle 3-51: BVT-Energieverbrauch für Polyethylen 237
Tabelle 3-52: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polyethylen 237
Tabelle 3-53: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polypropylen 240
Tabelle 3-54: Wichtige Parameter zu den Energieeinsparpotenzialen für Polysulfone 242
Tabelle 3-55: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse 248
Tabelle 3-56: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess nach Szenario 249
Tabelle 3-57: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario 251
Tabelle 3-58: Resultierender Energie- und THG-Einsparpotenziale nach Prozessen 252
Tabelle 3-59: Standorte und Kapazitäten der Adipinsäure-Anlagen in Deutschland 271
Tabelle 3-60: Standorte und Kapazitäten der Ammoniak-Anlagen in Deutschland 271
Tabelle 3-61: Standorte und Kapazitäten der Steam-Cracker in Deutschland 272
Tabelle 3-62: Standorte und Kapazitäten der Methanol-Anlagen in Deutschland 272
Tabelle 3-63: Standorte und Kapazitäten der TDI-Anlagen in Deutschland 273
Tabelle 3-64: Standorte und Kapazitäten der Chloralkalielektrolyse-Anlagen in Deutschland 273
Tabelle 3-65: Standorte und Kapazitäten der Soda-Anlagen in Deutschland 274
Tabelle 3-66: Standorte und Kapazitäten der Titandioxid-Anlagen in Deutschland 275
Tabelle 4-1: Brennstoff-, Strom- und Endenergieverbräuche (spezifisch und absolut) der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland nach Prozessen im Jahr 2007 289
Tabelle 4-2: Brennstoff-, Strom- und Endenergieverbräuche (spezifisch und absolut) nach Prozessen und gesamt der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland, 2007 290

Tabelle 4-3: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007 291
Tabelle 4-4: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse 303
Tabelle 4-5: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess nach Szenario 304
Tabelle 4-6: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario 306
Tabelle 4-7: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (Technisches Potenzial) 307
Tabelle 5-1: Produktion der mengenmäßig wichtigsten NE-Metalle in Deutschland, 2007 318
Tabelle 5-2: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007 328
Tabelle 5-3: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse 336
Tabelle 5-4: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess nach Szenario 338
Tabelle 5-5: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario 339
Tabelle 5-6: Resultierender Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption 340
Tabelle 6-1: Energieverbrauch des Papiergewerbes nach unterschiedlichen Statistiken [PJ] 348
Tabelle 6-2: Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch der Sulfatzellstoffherstellung 353
Tabelle 6-3: Energieintensität verschiedener mechanischer Aufschlussverfahren [MJ/t Holzstoff] 354
Tabelle 6-4: Annahmen zum Energieverbrauch der Holzstoffherstellung mit dem Holzschliff-Verfahren (Bezugsgröße für die Angaben ist die produzierte Menge Holzstoff) 355
Tabelle 6-5: Energieverbrauch nach Prozessschritten bei der Altpapieraufbereitung wie er für die Modellrechnungen hinterlegt wurde (bezogen auf den Faserstoffdurchsatz) 356
Tabelle 6-6: Annahmen zum Energieverbrauch für den Prozess „Papierherstellung“ nach Prozessschritten 361
Tabelle 6-7: Annahmen zum spezifischen Energiebedarf nach Prozessen im Jahr 2007 363
Tabelle 6-8: Stromverbrauch, Brennstoffbedarf und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007 365
Tabelle 6-9: Möglichkeiten zur Energie- und CO_2-Einsparung durch Nutzung von Niedertemperaturabwärme in der Papierindustrie 370
Tabelle 6-10: Entwicklung der Altpapiereinsatzquoten nach Papiersorte in Deutschland 386
Tabelle 6-11: Resultierender spezifischer Energieverbrauch je Prozess und Szenario 391

Tabelle 6-12: Resultierender absoluter Energieverbrauch und THG-Emissionen je Prozess nach Szenario 392
Tabelle 6-13: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse 392
Tabelle 6-14: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (technisches Potenzial) 393
Tabelle 7-1: Anzahl der Unternehmen und Werke, Umsatz und Beschäftigte der deutschen Zementindustrie, 2000 bis 2008 406
Tabelle 7-2: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen für verschiedene Ziegelprodukte 419
Tabelle 7-3: Aufteilung des Strombedarfes bei der Zementherstellung 420
Tabelle 7-4: Typischer Strom- und Brennstoffbedarf verschiedener Kalköfen in EU-27 422
Tabelle 7-5: Energiebedarf und Energieverluste beim Brennen von Ziegeln in einem Tunnelofen 423
Tabelle 7-6: Durchschnittlicher elektrischer Energiebedarf in Prozent eines Ziegelwerkes 423
Tabelle 7-7: Stromverbrauch, Wärmeverbrauch und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse im Jahr 2007 425
Tabelle 7-8: Brennstoffeinsatz der Steine-und-Erden-Industrie in Deutschland im Basisjahr 2007 unterteilt nach Energieträgern 426
Tabelle 7-9: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie, 2007 – 2035 444
Tabelle 7-10: Resultierender spezifischer Energiebedarf je Prozess der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie nach Szenario, 2007 – 2035 445
Tabelle 7-11: Absoluter Energiebedarf und THG-Emissionen der vier Subbranchen der Steine- und Erden-Industrie je Prozess bzw. nach Szenario, 2007 – 2035 446
Tabelle 7-12: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale der vier Subbranchen je Einsparoption (technisches Potenzial), 2020 bzw. 2035 449
Tabelle 7-13: In die Untersuchung eingeflossene Maßnahmenbündel zur Energieeffizienz und deren Effizienzpotenziale (Angaben in GJ/t Zement, GJ/t Kalk oder GJ/t Ziegel) 451
Tabelle 8-1: Bruttoproduktionswert, Produktion, Endenergieverbrauch, spezifischer Energiebedarf in GJ/t und Energieintensität MJ/€ der Glas- und Keramikindustrie, 2007 472
Tabelle 8-2: Typischer spezifischer Energiebedarf (Strom und Brennstoffe) nach Produktart des Glases, 2009 474
Tabelle 8-3: Typischer spezifischer Energiebedarf nach Produktarten bei der Keramikherstellung, 2007 475
Tabelle 8-4: Strom- und Brennstoffverbrauch sowie Treibhausgasemissionen der ausgewählten Teilbranchen der Glas- und Keramikindustrie, 2007 484
Tabelle 8-5: Mögliche Energie-Effizienzoptionen nach Produktionsprozess und Produktart in der Glasindustrie für Strom und Brennstoffe 486

Tabelle 8-6: Wirtschaftlichkeit bedeutender Effizienzoptionen bei der Glasherstellung, 2009 489

Tabelle 8-7: Mögliche Energie-Effizienzoptionen nach Prozessen und Produktart in der Keramikherstellung, 2009 490

Tabelle 8-8: Wirtschaftlichkeit bedeutender Effizienzoptionen bei der Keramikherstellung 493

Tabelle 8-9: Strom- und Brennstoffbedarf der Diffusions-Szenarien in den Branchen Glas und Keramik in den untersuchten Prozessen, 2007 bis 2035 in PJ 495

Tabelle 8-10: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse und Teilbranchen (für alle Szenarien gleiche Mengen) 1000 t, 2007 – 2035 496

Tabelle 8-11: Resultierender absoluter Energiebedarf und THG-Emissionen je Produktgruppe nach Diffusions-Szenario – Teil I Glas, 2007 bis 2035 497

Tabelle 8-12: Resultierender absoluter Energiebedarf und THG-Emissionen je Produktgruppe nach Diffusions-Szenario – Teil II Keramik, 2007 bis 2035 498

Tabelle 8-13: Resultierender spezifischer Energiebedarf je Produktgruppe nach Szenarien – Teil I Glas, 2007 bis 2035 499

Tabelle 8-14: Resultierender spezifischer Energiebedarf je Produktgruppe nach Szenarien – Teil II – Keramikindustrie, 2007 bis 2035 499

Tabelle 8-15: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (Technisches Potenzial) – Teil I Glas, 2020 und 2035 500

Tabelle 8-16: Resultierende Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption (Technisches Potenzial) – Teil II Keramik, 2020 und 2035 501

Tabelle 9-1: Energiekosten in Mrd. € und deren Anteil am Bruttoproduktionswert für ausgewählten Branchen nach WZ 2003 und WZ 2008 Klassifizierung 513

Tabelle 9-2: Absoluter und spezifischer Energiebedarf* – Brennstoffe und Strom – und Produktion der ausgewählten Produkte der Ernährungsindustrie, Basisjahr 2007 528

Tabelle 9-3: Strom- und Wärmebedarf und Treibhausgasemissionen der ausgewählten Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, 2007 530

Tabelle 9-4: Wirtschaftlichkeit ausgewählter Einsparmaßnahmen bei der Ernährungsindustrie 533

Tabelle 9-5: Resultierender absoluter Energiebedarf (Strom und Brennstoffe) und THG-Emissionen je Branche und je Szenario, 2007 bis 2035 536

Tabelle 9-6: Annahmen zur Produktionsentwicklung der untersuchten Prozesse 537

Tabelle 9-7: Resultierender spezifischer Energiebedarf (Strom und Brennstoffe) je Branche und je Szenario, 2007 bis 2035 537

Tabelle 9-8: Resultierende technische Energie- und THG-Einsparpotenziale je Einsparoption 538

Welchen Beitrag kann die Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie zur Energiewende in Deutschland leisten? Um diese Frage zu beantworten wird für die energieintensiven Branchen, welche insgesamt etwa 70 % des Energiebedarfs der Industrie ausmachen, eine modellgestützte Analyse der vorhandenen Energieeffizienzpotenziale durchgeführt. Aufbauend hierauf werden je Branche Instrumente zur Umsetzung der berechneten Potenziale und zur Überwindung der bestehenden Hemmnisse vorgeschlagen.

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI untersucht Marktchancen technischer Entwicklungen und deren Auswirkungen auf Wirtschaft, Staat und Gesellschaft. Die interdisziplinären Forschungsgruppen konzentrieren sich auf die Bereiche Energie, Umwelt, Produktion, Kommunikation und Biotechnologie sowie auf Regionalforschung und Innovationspolitik.

Fraunhofer ISI

FRAUNHOFER VERLAG

ISBN 978-3-8396-0515-8

