

*Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung |  
15. Dezember 2017*

# **Technologiebericht**

## **6.2 Energieeffiziente**

### **Querschnittstechnologien**

#### **innerhalb des Forschungsprojekts**

#### **TF\_Energiewende**

---

Dr. Simon Hirzel

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

**Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:**

Hirzel, S. (2017): Technologiebericht 6.2 Energieeffiziente Querschnittstechnologien. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

**Hinweis:**

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

**Kontakt:**

Dr. Simon Hirzel  
Tel.: +49 721/6809 – 405  
Fax: +49 721/6809 – 272  
E-Mail: [simon.hirzel@isi.fraunhofer.de](mailto:simon.hirzel@isi.fraunhofer.de)

Fraunhofer ISI  
Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe

**Review durch:**

Dietmar Schüwer (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen, Einheiten und Symbole</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung (Steckbrief)</b>	<b>8</b>
<b>1 Beschreibung des Technologiefeldes</b>	<b>10</b>
1.1 Auswahl der betrachteten industriellen Querschnittstechnologien	10
1.2 Fokustechnologie A: Elektromotoren	12
1.3 Fokustechnologie B: Große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen	14
1.4 Fokustechnologie C: Generative Fertigungsverfahren	17
1.5 Ausweisung der Fokustechnologien in Energieszenarien	20
<b>2 Stand F&amp;E in Deutschland</b>	<b>22</b>
2.1 Elektromotoren	22
2.2 Große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen	25
2.3 Generative Fertigungsverfahren	28
<b>3 Relevanz öffentlicher Förderung</b>	<b>31</b>
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	31
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	32
<b>4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes</b>	<b>37</b>
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	37
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen	43
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	45
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	47
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	49
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	53
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	56
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	58
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	58
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	59
<b>5 F&amp;E-Empfehlungen für die öffentliche Hand</b>	<b>62</b>
5.1 Fokustechnologie Elektromotoren	62
5.2 Fokustechnologie Wärmepumpen	63
5.3 Fokustechnologie Generative Fertigungsverfahren	66
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>68</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen, Einheiten und Symbole

### Abkürzungen

BAU	Business-As-Usual
BHKW	Blockheizkraftwerk
CAD	Computer-Aided Design
CAX	Computer-Aided X
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
IE	International Efficiency
IEC	International Electrotechnical Commission
k. A.	keine Angabe
LED	Light-Emitting Diode
Mrd.	Milliarde(n)
Mio.	Million
NdFeB	Neodym-Ferrit-Bor
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
PRODCOM	Production Communautaire
SLS	Selektives Lasersintern
TRL	Technology Readiness Level
UN	United Nations
UV	Ultraviolett
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VO	Verordnung

### Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
CO <sub>2</sub> -äq	Kohlendioxidäquivalent
GW	Gigawatt
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
PJ	Petajoule
t	Tonne
TWh	Terrawattstunde

## Tabellenverzeichnis


Tab. 1-1	Wechselstrommotortechnologien und ihr Potenzial zum Erreichen verschiedener Energieeffizienzklassen (niedrigste Effizienzklasse IE1 bis höchste Effizienzklasse IE5) (eigene Übersetzung nach Doppelbauer 2011, Anmerkungen gekürzt nach Almeida et al. 2014f). -----	13
Tab. 1-2	Kommerziell etablierte generative Fertigungsverfahren und die mit ihnen bearbeitbaren Werkstoffe (mit Änderungen entnommen aus VDI 3405) -----	17
Tab. 1-3	Übersicht ausgewählter Langfristszenarien und Betrachtung der Fokustechnologien in den jeweiligen Studien -----	20
Tab. 2-1	Inkrafttreten von Mindestanforderungen für Elektromotoren gemäß VO 640/2009 -----	24
Tab. 2-2	Techno-ökonomische Kenndaten der Fokustechnologie Elektromotoren -----	25
Tab. 2-3	Techno-ökonomische Kenndaten der Fokustechnologie große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen einschließlich Weiterentwicklungspfade bis 2050 -----	27
Tab. 2-4	Auszug aus den Forschungsempfehlungen für generative Fertigungsverfahren gemäß Allison und Scudamore (2014) für die Bereiche Produktivität, Materialien, Prozess und Stabilität sowie Produktqualität (eigene, gekürzte Übersetzung) -----	29
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Fokustechnologien im Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien -----	32
Tab. 3-2	Einordnung des aktuellen Entwicklungsstadiums der jeweiligen Technologien anhand der dargestellten Entwicklungsziele im Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien -----	33
Tab. 3-3	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken zum Erreichen der Entwicklungsziele im Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien -----	35
Tab. 4-1	Weltweit überschlägig installierte Leistung von Elektromotoren (GW) und auf diese Motoren zurückgehende Energieverbräuche (TWh) in den jeweiligen Jahren -----	37
Tab. 4-2	Weltweite überschlägige Marktpotenziale von Elektromotoren ausgedrückt als installierte Leistung unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz (GW), der jährlichen Energieverbräuche dieser Anlagen (TWh) sowie des für sie notwendigen Investitionsbedarfs (Mrd. Euro) -----	38
Tab. 4-3	Weltweit überschlägig installierte thermische Ausgangsleistung industrieller Wärmepumpen (GW) und durch diese Wärmepumpen bereitgestellte thermische Energiemenge (TWh) in den jeweiligen Jahren (3.500 Volllaststunden pro Jahr) -----	39
Tab. 4-4	Weltweite überschlägige Marktpotenziale industrieller Wärmepumpen ausgedrückt als installierte Leistung unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz (GW), durch diese Anlagen bedingte Änderung der bereitgestellten thermischen Ausgangsleistung (TWh) sowie als Investitionsbedarf (Mrd. Euro) in den jeweiligen Perioden -----	39
Tab. 4-5	Angaben zu deutschlandweit überschlägiger installierter Leistung (GW) und Energieverbrauch (TWh) durch Elektromotoren -----	40
Tab. 4-6	Nationale überschlägige Marktpotenziale von Elektromotoren ausgedrückt als installierte Leistung unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz (GW), des jährlichen Energieverbrauchs dieser Anlagen (TWh) sowie als Investitionsbedarf (Mrd. Euro) in den jeweiligen Perioden -----	40
Tab. 4-7	National überschlägig installierte thermische Ausgangsleistung industrieller Wärmepumpen (GW) und durch diese Wärmepumpen bereitgestellte thermische Energiemenge (TWh) in den jeweiligen Jahren -----	42
Tab. 4-8	Nationale überschlägige Marktpotenziale für industrielle Wärmepumpen unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz in unterschiedlichen Perioden -----	42
Tab. 4-9	Ermittlung der Wachstumsrate für die installierte Leistung im Bestand der Fokustechnologien im Zeitraum 2014-2050 -----	43
Tab. 4-10	Durchdringung der Motorenklassen im deutschen Motorenbestand -----	44

Tab. 4-11	Im jeweiligen Jahr vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Verbesserung von Elektromotoren in Deutschland im Vergleich zur Fortschreibung des Bestands mit der Zusammensetzung von 2014-----	44
Tab. 4-12	Im jeweiligen Jahr vermiedene Treibhausgasemissionen durch den Ersatz konventioneller Brennertechnik durch industrielle Wärmepumpen in Deutschland-----	45
Tab. 4-13	Im jeweiligen Jahr vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Verbesserung von Elektromotoren in Deutschland im Vergleich zur Fortschreibung des Bestands mit der Zusammensetzung von 2014-----	46
Tab. 4-14	Im jeweiligen Jahr vermiedener Primärenergieeinsatz durch den Ersatz konventioneller Brennertechnik durch industrielle Wärmepumpen in Deutschland-----	46
Tab. 4-15	Direkte jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Verbesserung von Elektromotoren in Deutschland im Vergleich zur Fortschreibung des Bestands mit der Zusammensetzung von 2014-----	47
Tab. 4-16	Direkte jährliche Kosteneinsparpotenziale durch den Einsatz von Wärmepumpen (50 % elektrisch / 50 % thermisch angetrieben) in Deutschland im Vergleich zur Referenztechnologie Gaskessel (Anteil zertifikatshandelspflichtiger Anlagen: 50 %)-----	48
Tab. 4-17	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Industrielle Querschnittstechnologien -----	54
Tab. 4-18	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für die Industrie anhand von Angaben der IEA-Datenbank – Input-Orientierung-----	55
Tab. 4-19	Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Industrielle Energieeffizienz zum Status Quo (2015) -----	58
Tab. 4-20	Abhängigkeit des Technologiefeldes Industrielle Querschnittstechnologien von Infrastrukturen aus energiewirtschaftlicher Perspektive -----	59
Tab. 4-21	Kritikalität der Einzelaspekte zur Systemkompatibilität für das Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien aus energiewirtschaftlicher Perspektive -----	61

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Aufschlüsselung des industriellen Endenergieverbrauchs (verarbeitendes Gewerbe und sonstiger Bergbau) in Deutschland 2015 nach Anwendungsbereichen und unterschieden nach Strom (oben; 100 % = 832 PJ) und Brennstoffen (unten; 100 % = 1.743 PJ) (Angaben nach Rohde 2016) -----	11
Abb. 1-2	Aufbauskizze sorptionsbasierter Wärmepumpen (links: Absorptionswärmepumpe; rechts: Adsorptionswärmepumpe) nach Wolf et al. (2012)-----	16
Abb. 1-3	Aufbauskizze eines Pulverbettverfahrens -----	18
Abb. 4-1	Monetäre Angaben zur Produktion, zu Exporten und Importen für Elektromotoren in Deutschland-----	50
Abb. 4-2	Exporteure für elektrische Motoren und Generatoren im Jahr 2015 für Länder mit positiver Gesamtexportbilanz (100 % entsprechen ca. 13,5 Mrd. US-Dollar)-----	51
Abb. 4-3	Zeitliche Entwicklung der Top5-Netto-Exporteure für elektrische Motoren und Generatoren des Jahres 2015-----	51
Abb. 4-4	Monetäre Angaben zur Produktion, zu Exporten und Importen für Wärmepumpen in Deutschland-----	52
Abb. 4-5	Durchschnittlicher Anteil Deutschlands, Schwedens und Frankreichs in den Perioden 2013 bis 2015 am Produktionswert für Wärmepumpen (ohne Klimageräte) in den EU-28 -----	52

## Zusammenfassung (Steckbrief)

<b>Technologiefeld Nr. 6.2</b> <b>Energieeffiziente</b> <b>Querschnittstechnologien</b>	
<b>A) Technologiefeld und F&amp;E-Bedarf</b>	
<b>Beschreibung des Technologiefelds</b>	
<p>Konzentration auf drei für Energienachfrage/Entwicklungspotenzial wichtige Technologien:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren (Schwerpunkt: Dauerläufer)</li> <li>– B: Große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen (Schwerpunkt: ab 100 kW<sub>th</sub>)</li> <li>– C: Generative Fertigungsverfahren (Schwerpunkt: Metallische Verfahren)</li> </ul>	
<p>Technologische Reife:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren (IE 5+): Grundsätzlicher Funktionsnachweis (TRL=4)</li> <li>– B: Wärmepumpen (bis 200 °C): Grundsätzlicher Funktionsnachweis (TRL=4)</li> <li>– C: Generative Verfahren (seriennah): Funktionsnachweis Labor/Anwendung (TRL=5)</li> </ul>	
<p>Kritische Komponenten/Aspekte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren: magnetische Materialien; Design; Systemintegration</li> <li>– B: Wärmepumpen: Kältemittel; Verdichter; Wärmetauscher</li> <li>– C: Generative Verfahren: Systemdesign; Einzelkomponenten; Prozesssteuerung; Planungstools</li> </ul>	
<b>Entwicklungsziele &amp; Technologie-Entwicklung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren: Effizienzverbesserung (IE5+); verbesserte Kleinmotoren; Systemintegration (Entwicklung nationale Stromnachfrage: 2010: ca. 159 TWh; 2050: ca. 107 TWh)</li> <li>– B: Wärmepumpen: Temperaturbereiche bis 200 °C bei hoher Temperaturspreizung (100 K)</li> <li>– C: Generative Verfahren: Steigerung Materialaufbaurrate; Kostensenkung; Prozesssteuerung</li> </ul>	
<b>F&amp;E-Bedarf</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren:             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Komponenten: Hochtemperatursupraleitung (Leiter, Kühlung); günstige hochdichte magnetisch Materialien (wenig seltene Erden); Komponentendesign (bzgl. Lager, Kühlung)</li> <li>– Systemintegration: Optimierung nachgelagerter Anwendungen, bedarfsgerechte Motorsteuerung, „Intelligente“ Integration ins Gesamtsystem</li> </ul> </li> <li>– B: Wärmepumpen:             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Komponenten: neue Kältemittel; verbesserte Verdichter; optimiertes Design (Kühltechniken, Wärmetauscher, Anlagenkonstruktion)</li> <li>– Systemintegration: Regelungskonzepte und Integration in Lastmanagementsysteme; Automatisierung Einbindung in den Systemverbund (Bindeglied Wärmequelle, Wärmesenke)</li> </ul> </li> <li>– C: Generative Verfahren:             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Komponenten: erweitertes Materialspektrum; Leistungsfähigkeit (Geschwindigkeit, Material- und Oberflächeneigenschaften, Prozessführung); Kostensenkungen (Anlagen, Materialien)</li> <li>– Systemintegration: verbesserte CAX-Instrumente (komplexe Geometrien/Materialwechsel); Prozessautomatisierung; Prozesskettenintegration (Einbindung in Industrie 4.0-Umgebung); Untersuchungsverfahren</li> </ul> </li> </ul>	



<b>B) Multikriterielle Bewertung</b>
<b>Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen</b> (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren: infolge hoher Energienachfrage (ca. 70 % industrieller Strombedarf) hohe Potenziale</li> <li>– B: Wärmepumpen: zusätzliche Deckung von Teilen der Wärmenachfrage im Bereich 100 bis 200 °C (u. a. Abwärmenutzung als Ersatz für konventionelle thermische Anlagen)</li> <li>– C: Generative Verfahren: Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale (Material, Gewicht)</li> </ul>
<b>Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz</b> (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren: erhebliches Energieeinsparpotenzial (Verlustminimierung, Systemintegration), aber teilweise kritische Rohstoffe für Permanentmagnete (u. a. Neodym, Dysprosium) notwendig</li> <li>– B: Wärmepumpen: Potenziale rechnerisch vorhanden, bislang sehr begrenzt in Praxis eingesetzt</li> <li>– C: Generative Verfahren: insbesondere durch Leichtbau für Ressourceneffizienz von Interesse; energetische Vorteilhaftigkeit variiert mit Produkt/Einsatzgebiet/Prozesskette</li> </ul>
<b>Kosteneffizienz</b> (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> <li>– A: Elektromotoren: aktuelle hocheffiziente Standardmotoren bei Bestandserneuerung wirtschaftlich, Perspektiven für weiterentwickelte Motoren von künftiger Kostendegression abhängig</li> <li>– B: Wärmepumpen: vergleichsweise hohe Investitionen und Konkurrenz durch konvent. thermische Technik</li> <li>– C: Generative Verfahren: Wirtschaftlichkeit stark abhängig von den Produkten und Menge, Generalisierung schwierig; bereits attraktiv für Direkt Manufacturing in speziellen Bereichen</li> </ul>
<b>Inländische Wertschöpfung</b>
Gute Gesamtaufstellung; bei Elektromotoren steigender Druck durch asiatische Marktteilnehmer; hohes Wachstum bei generativen Verfahren (Metall)
<b>Stand und Trends von F&amp;E im internationalen Vergleich</b>
Gute Aufstellung insbesondere bei Elektromotoren und generativen Verfahren (Metall)
<b>Gesellschaftliche Akzeptanz</b>
Überwiegend hoch, aber geringe Relevanz (da vergleichsweise kleinskalige und unauffällige Interventionen); insbesondere Markt- bzw. Nutzerakzeptanz für Technologiefeld ausschlaggebend
<b>Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit</b>
Bestandsumwälzung (Nutzungsdauer) prägt Reaktionsfähigkeit; bei Wärmepumpen ist potentielle Verstetigung von Abwärmequellen zu beachten (zuerst Abwärmevermeidung, dann -verwertung)
<b>Abhängigkeit von Infrastrukturen</b>
Insgesamt kaum Abhängigkeiten; Wärmepumpen: Erschließbarkeit der Wärmequelle Voraussetzung
<b>Systemkompatibilität</b>
Generell hoch; ggf. auf einzeltechnologischer Ebene relevant (z. B. Platzbedarfe), ggf. Wärmepumpen einsetzbar als flexible (steuerbare) Verbraucher (in Verbindung mit Speicher)

## 1 Beschreibung des Technologiefeldes

Als industrielle Querschnittstechnologien werden verschiedene Technologien zusammengefasst, die sich von den in *Technologiefeld 6.1: Energieeffiziente Prozesstechnologien* betrachteten Technologien dahingehend unterscheiden, dass sie über die Grenzen einzelner Branchen hinweg eingesetzt werden, während Prozesstechnologien branchenspezifisch sind. Ein Vorteil dieser „querliegenden“ Betrachtung in Form von Querschnittstechnologien besteht darin, dass ähnliche und in mehreren Branchen nutzbare Technologien in einer gemeinsamen Analyse untersucht werden können, ohne eine Vielzahl von Einzelbetrachtungen erforderlich zu machen.

Während die Unterscheidung in Querschnittstechnologien und Prozesstechnologien auf den ersten Blick unproblematisch erscheint, zeigt sich mitunter bei Detailbetrachtungen, dass eine eindeutige Abgrenzung schwierig sein kann, da die Grenzen zwischen beiden Technologiearten fließend sind und Prozesstechnologien auch Querschnittstechnologien beinhalten (Fleiter et al. 2013).

Insgesamt umfassen die industriellen Querschnittstechnologien vielfältige Technologien, die unterschiedlich gegliedert werden können. Rohde (2016) unterscheidet beispielsweise anhand der Anwendungsbereiche Querschnittstechnologien zur Bereitstellung von:

- Raumwärme,
- Warmwasser,
- Prozesswärme,
- Klima- und Prozesskälte,
- mechanischer Energie,
- Beleuchtung sowie zur
- Information und Kommunikation.

Um eine fundierte Analyse im Rahmen dieser Studie durchführen zu können, ist eine Fokussierung auf besonders wesentliche Technologien innerhalb des Technologiefeldes erforderlich.

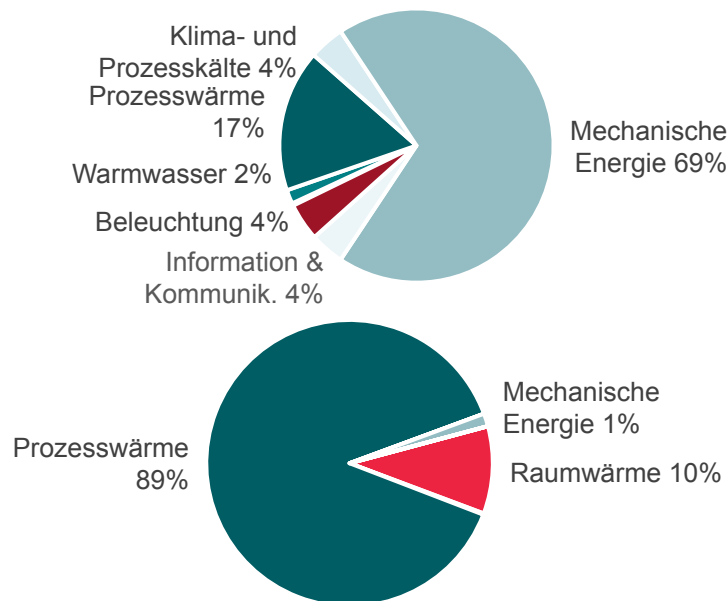
### 1.1 Auswahl der betrachteten industriellen Querschnittstechnologien

Für diese Auswahl der zu betrachtenden Technologien kann ihre Relevanz für den Energieverbrauch sowie ihr potentieller Beitrag zum Erreichen der energie- und klimapolitischen Zielsetzungen herangezogen werden. Eine einführende Aufschlüsselung der industriellen Energienachfrage hilft, wesentliche Technologien mit Blick auf den Energieverbrauch zu identifizieren.

In Deutschland belief sich der Endenergieverbrauch 2015 im verarbeitenden Gewerbe (einschließlich übriger Bergbau) in Summe auf 2.576 PJ (Abb. 1-1). Davon entfallen rund zwei Drittel auf den Einsatz von Brennstoffen und ein Drittel auf den Einsatz von elektrischer Energie.

Im Bereich der elektrischen Energie ist aus Sicht des Gesamtverbrauchs die Bereitstellung mechanischer Energie ein sehr bedeutender Bereich: Knapp 70 % des Energieeinsatzes entfallen auf dieses Anwendungsfeld. Dem folgen in anteilmäßig absteigender Reihenfolge Prozesswärme, Beleuchtung, Klima- und Prozesskälte und Informations- und Kommunikationstechnologien. Im Bereich des Brennstoffeinsatz-

zes dominiert die Bereitstellung von Prozesswärme, gefolgt von der Raumwärmebereitstellung.



**Abb. 1-1** Aufschlüsselung des industriellen Endenergieverbrauchs (verarbeitendes Gewerbe und sonstiger Bergbau) in Deutschland 2015 nach Anwendungsbereichen und unterschieden nach Strom (oben; 100 % = 832 PJ) und Brennstoffen (unten; 100 % = 1.743 PJ)

Quelle: Angaben nach Rohde (2016)

Aus stromseitiger Sicht ist besonders die Bereitstellung mechanischer Energie, d. h. die Umwandlung elektrischer in mechanische Energie durch *Elektromotoren* interessant, da sie mehr als zwei Drittel der Stromnachfrage verursacht. Da Elektromotoren gleichzeitig ein bedeutendes wirtschaftliches Energieeinsparpotenzial zugeschrieben wird, ist diese Technologie als Fokustechnologie für eine weitergehende Betrachtung von besonderem Interesse.

Ferner zeigt sich, dass die Bereitstellung von Prozesswärme aus energetischer Sicht sowohl strom- als auch brennstoffseitig sehr wichtig ist. Generell wird die Prozesswärmebereitstellung im Rahmen der Studie unter anderem im Kontext von *Technologiefeld 1.4: Solare Wärme und Kälte*, für ausgewählte Prozesse im Rahmen der Prozesstechnologien (*Technologiefeld 6.1: Energieeffiziente Prozesstechnologien*) sowie im Rahmen des *Technologiefelds 6.3: Stromerzeugungstechnologien zur Abwärmenutzung* behandelt. Um die Verwertbarkeit von Wärmequellen weiter zu verbessern und aufgrund des hohen Wärmebedarfs in der Industrie ist ergänzend zu den Betrachtungen in diesen Feldern die Untersuchung *großer industrieller Hochtemperaturwärmepumpen* als weitere Technologie besonders interessant. Dies begründet sich damit, dass sich durch Wärmepumpen die Nutzung von Wärmeströmen, insbesondere Abwärme, weiter verbessern lässt, deren Temperaturniveau für eine unmittelbare Verwertung ansonsten zu niedrig ist.

Ein dritter Bereich, der sich in den vergangenen Jahren besonders dynamisch entwickelt hat, ist die *Nutzung generativer Fertigungsverfahren*. Zwar lässt sich dieser

Bereich nicht innerhalb der obigen Aufschlüsselung der Energienachfrage verorten und er wird bisher hauptsächlich aus produktionstechnischer Sicht beleuchtet. Perspektivisch erscheint eine Betrachtung dieses Bereichs aus energiewirtschaftlicher Sicht jedoch interessant, da er in der Breite Potenziale für eine Verbesserung der Energieeffizienz bieten könnte, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Wärmebedarf steht: Einerseits könnten dadurch aufwändige und teilweise energieintensive Bearbeitungsprozesse reduziert werden, andererseits wird den Verfahren die Möglichkeit zugesprochen, durch einen zielgerichteten Materialeinsatz (Leichtbau) die Ressourceneffizienz zu steigern, wodurch sich indirekt Energie für die Bereitstellung von Ausgangsmaterialien einsparen ließe.

Im Folgenden werden die drei genannten Fokustechnologien näher untersucht. Legt man die Energienachfrage zugrunde, ist anzumerken, dass in dieser Studie einige in Abb. 1-1 dargestellte Bereiche nicht näher betrachtet werden. Hierzu zählt die Beleuchtung, da in den vergangenen Jahren durch den Übergang auf LED-basierte Leuchtmittel ein deutlicher Effizienzsprung erreicht werden konnte; die Rolle von Informations- und Kommunikationstechnologien wird – wenn auch nicht mit einem spezifischen Fokus auf künftige Einsparpotenziale – im querliegenden *Technologiefeld B.2: Informations- und Kommunikationstechnologien* aufgegriffen; Anlagen für die Bereitstellung von Warmwasser, Raumwärme und Kälte für Gebäude sind hingegen Bestandteil des *Technologiefelds 5.1: Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik*. Nachstehend wird einleitend eine kurze Grundlagenbeschreibung der drei Fokustechnologien gegeben.

## 1.2 Fokustechnologie A: Elektromotoren

Elektromotoren werden zur Umwandlung elektrischer in mechanische Energie für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen eingesetzt. Typische Beispiele dafür umfassen Druckluftkompressoren, Ventilatoren, Pumpen, Förderzeuge, Werkzeuge, Kräne, Mischwerke, Zentrifugen, Brecher u. ä. (z. B. Ferreira 2008).

Im Rahmen dieser Studie werden die Elektromotoren in der Regel „an sich“ betrachtet, d. h. die Peripherie der Motoren (Frequenzumrichter, Getriebe) sowie deren nachgelagerten Anwendungen werden insbesondere für die abschließenden Forschungsempfehlungen aufgegriffen. Die Ausführungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf die industriell überwiegend dauerhaft betriebenen rotierenden Elektromotoren. Linearmotoren oder Motoren im Start-Stopp-Betrieb werden nicht erfasst.

Rotierende Elektromotoren bestehen generell aus einem fest stehenden Stator und einem beweglich gelagerten Rotor. Wenn elektrischer Strom durch den Motor fließt, werden abstoßende bzw. anziehende Kräfte zwischen Stator und Rotor so gestaltet, dass sie den Rotor in eine Drehbewegung versetzen und eine damit verbundene Welle antreiben, die mechanische Energie bereitstellt.

Abhängig von Kriterien wie Stromversorgung, Bauart oder Synchronizität von Feld und Rotor lassen sich verschiedene Arten von Elektromotoren unterscheiden. Bei der Motorenwahl spielen auch viele technologische Parameter wie beispielsweise Drehmomente, Rotationsgeschwindigkeiten oder Baugrößen eine Rolle.

Rund 96 % der in Europa verkauften Elektromotoren sind Wechselstrommotoren (Plötz und Eichhammer 2011). Tab. 1-1 zeigt verschiedene Technologien für Wechsel-

strommotoren, die mit einer sinusförmigen Spannung betrieben werden können, sowie die mit ihnen erreichbaren Energieeffizienzklassen.

Eine wichtige Gruppe bei den Wechselstrommotoren sind die Induktionsmotoren. Ihre Bezeichnung ist darauf zurückzuführen, dass infolge des Stromflusses durch den Stator in den Wicklungen des Rotors eine Spannung bzw. ein Strom induziert wird. Dadurch bildet sich um den Rotor ein elektromagnetisches Feld aus, das sich vom Feld des Stators abstößt und den Rotor in eine Drehbewegung versetzt. Da der Rotor langsamer als das Feld dreht und ihm nachläuft, werden Induktionsmotoren auch als Asynchronmotoren bezeichnet.

**Tab. 1-1 Wechselstrommotortechnologien und ihr Potenzial zum Erreichen verschiedener Energieeffizienzklassen (niedrigste Effizienzklasse IE1 bis höchste Effizienzklasse IE5)<sup>1</sup>.**

	Netzanlauf	IE1	IE2	IE3	IE4	IE5
Asynchronmotoren						
(1) Dreiphasen-Kurzschlussläufermotoren	Ja	Ja	Ja	Ja	Schwer	Nein
(2) Dreiphasen-Schleifringläufermotoren	Ja	Ja	Ja	Ja	Schwer	Nein
(3) Einphasen-Induktionsmotoren (ein Kondensator)	Ja	Ja	Schwer	Nein	Nein	Nein
(4) Einphasen-Induktionsmotoren (zwei schaltbare Kondensatoren)	Ja	Ja	Ja	Schwer	Nein	Nein
Synchronmotoren						
(5) Permanentmagnet-Synchronmotoren	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Schwer
(6) Netzanlauffähige Permanentmagnet-Synchronmotoren	Manche	Ja	Ja	Ja	Ja	Schwer
(7) Stromerregte Synchronmaschinen	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Schwer
(8) Sinusfeld-Reluktanzmotoren	Manche	Ja	Ja	Ja	Schwer	Nein
Ja:	Mit kommerziell verfügbarer Technologie erreichbar, ggf. in einigen Fällen nicht wirtschaftlich					
Schwer:	Mit kommerziell verfügbarer Technologie zum Teil erreichbar, aber nicht für alle Leistungsklassen oder nicht innerhalb der Baugrößenvorgaben					
Nein:	Mit kommerziell verfügbarer Technologie nicht erreichbar					
Netzanlauf:	Motor läuft ohne Frequenzumrichter am Netz an					

Quelle: eigene Übersetzung nach Doppelbauer 2011, Anmerkungen gekürzt nach Almeida et al. 2014f

Zur Gruppe der Induktionsmotoren zählen als Bauformen der Kurzschlussläufermotor sowie der Schleifringläufermotor. Beim Dreiphasen-Kurzschlussläufermotor (1) besteht der Rotor aus aneinander gereihten Blechpaketen mit längslaufenden Nuten. In diese Nuten werden in der Regel Aluminiumlegierungen gegossen und diese Leiter an den Seiten miteinander kurzgeschlossen. Die daraus resultierende Form des

<sup>1</sup> Für Details zu den Effizienzklassen, siehe Abschnitt 2.1.

Rotors (vorgestellt als Variante ohne Blechpakete) gibt diesen Motoren ihre Bezeichnung als Käfigläufermotor. Beim Dreiphasen-Schleifringläufermotor (2) besteht die Rotorwicklung hingegen aus Drähten, die im Vergleich zum Kurzschlussläufer nicht kurzgeschlossen, sondern in Sternschaltung verkettet sind und auf drei Schleifringen nach außen geführt werden. Im Gegensatz zum Kurzschlussläufer kann der Schleifringmotor durch eine Verschaltung der Schleifringanschlüsse mit Widerständen hohe Anlaufmomente bei niedrigem Anlaufstrom erreichen. Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern können die Vorteile des Schleifringmotors ohne die nachteiligen Schleifringe heute auch bei Kurzschlussläufern erreicht werden. Daher besitzen die Schleifringmotoren heute eine geringe Relevanz.

Neben den beiden dreiphasigen Induktionsmotoren gibt es auch einphasige Varianten. Hier besteht die Statorwicklung aus zwei zueinander versetzt stehenden Wicklungen: eine Hauptwicklung und eine Hilfswicklung. Um eine Drehbewegung zu erreichen, ist im Einphasenbetrieb eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Wicklungen notwendig. Dazu wird ein Kondensator in Reihe mit einer Wicklung geschaltet (3) oder es werden zwei schaltbare Kondensatoren (4) eingesetzt.

Neben den Induktions- bzw. Asynchronmaschinen kommen auch Synchronmotoren zum Einsatz, bei denen Rotor und Drehfeld die gleiche Geschwindigkeit besitzen. Eine aus Effizienzgesichtspunkten wichtige Gruppe sind hier die Permanentmagnetmotoren (5). Bei ihnen werden statt einer Rotorwicklung im Rotor Dauermagnete eingesetzt. Im Gegensatz zu den Induktionsmotoren wird also kein Magnetfeld für den Rotor induziert. Varianten dieser Motoren (6) verfügen über einen zusätzlichen Käfig für den Netzanlauf und können dadurch unmittelbar aus dem Netz gestartet werden. Bei stromerregten Synchronmaschinen (7) besitzt der Rotor eine stromdurchflossene Rotorwicklung. Bei Synchron-Reluktanzmotoren (8) hat der Stator eine Wicklung wie eine Asynchronmaschine, der Rotor weist jedoch ausgeprägte Pole auf. Durch die Konstruktionsweise des Motors muss er mit einem Frequenzumrichter betrieben werden.

### **1.3 Fokustechnologie B: Große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen**

Wärmepumpen können unter Einsatz von Antriebsenergie thermische Energie von einer Wärmequelle mit einem niedrigen Temperaturniveau auf eine Wärmesenke mit einem höheren Temperaturniveau übertragen. Ziel dieser Temperaturerhöhung ist es, die thermische Energie besser für den jeweiligen Nutzungszweck zu erschließen bzw. sie überhaupt erst dafür einsetzbar zu machen. Dadurch kann beispielsweise Abwärme besser genutzt werden.

In der Industrie sind Wärmesenken typischerweise Industrieprozesse, die ein bestimmtes Temperaturniveau erfordern. Wärmequellen sind hier neben Luft, Erdreich oder Grundwasser insbesondere Abwärmeströme aus anderen Prozessen, z. B. in Form von Kühlmedien-, Abluft- oder Abgasströmen.

Spezielle Anforderungen für den industriellen Bereich umfassen insbesondere a) die Nutzung von Abwärmeströmen als Wärmequelle, b) ein zumeist hohes Temperaturniveau beim Wärmebedarf und c) die häufig größere Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf (Wolf et al. 2014).

Die im Rahmen dieser Studie betrachteten großen industriellen Wärmepumpen werden hinsichtlich Leistung und Temperaturniveau folgendermaßen näher eingegrenzt: In Anlehnung an Lambauer et al. (2008) wird als Größenklasse eine Leistungsuntergrenze von  $100 \text{ kW}_{\text{th}}$  festgelegt. Ferner wird hinsichtlich des Temperaturbereichs von einer Vorlauftemperatur über  $100 \text{ °C}$  ausgegangen.

Technisch gesehen können Wärmepumpen unterschiedlich realisiert werden. Im Folgenden werden in Anlehnung an Wolf et al. (2014) als wichtige Wärmepumpentechnologien

- Kompressionswärmepumpen,
- Absorptionswärmepumpen,
- Adsorptionswärmepumpen sowie
- Brüdenverdichter

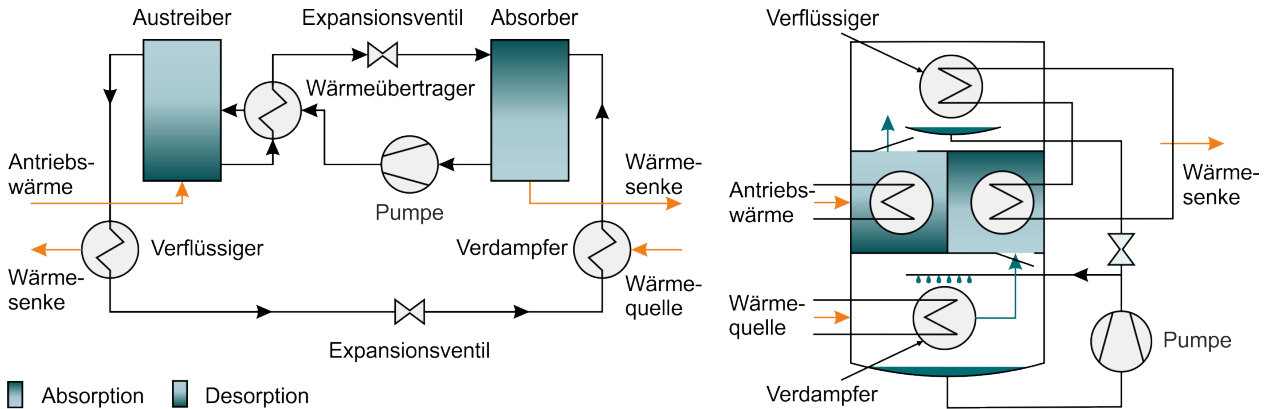
kurz beschrieben.

Bei *Kompressionswärmepumpen* wird ein Kältemittel in einem geschlossenen Kreisprozess geführt. Auf der Seite der Wärmequelle nimmt das Kältemittel in einem Verdampfer thermische Energie auf und geht in einen gasförmigen Zustand über. Das nun gasförmige Kältemittel durchläuft danach einen mechanischen Verdichter, der es komprimiert und dadurch den Druck und die Temperatur des Gases erhöht. Auf der Seite der Wärmesenke kondensiert das Gas in einem Verflüssiger und gibt dabei Wärme an die Senke ab. Im Anschluss daran durchläuft das Kältemittel ein Expansionsventil, gelangt zum Verdampfer und durchläuft erneut den Kreisprozess. Neben der thermischen Energie aus der Wärmequelle benötigt eine Kompressionswärmepumpe mechanische Energie für den Verdichter. Diese mechanische Energie kann über elektrische oder thermische Motoren bereitgestellt werden.

Ein anderes Funktionsprinzip nutzen die *Sorptionswärmepumpen* (Abb. 1-2). Statt einer einzelnen Wärmequelle sind für den Betrieb der sorptionsbasierten Wärmepumpen zwei Wärmeströme notwendig: Eine Wärmequelle auf niedrigerem Temperaturniveau, deren Temperaturniveau angehoben werden soll und eine Quelle für Antriebswärme auf höherem Niveau, die die notwendige Antriebsenergie bereitstellt. Insoweit verfügbar können beide Wärmequellen aus Abwärme gedeckt oder die Antriebswärme kann auch durch Zufeuerung bereitgestellt werden.

Bei *Absorptionswärmepumpen* handelt es sich wie bei Kompressionswärmepumpen zwar um Systeme mit einem geschlossenen Kältemittelkreislauf, jedoch unterscheiden sie sich von ihnen in ihrem Verdichtungsprozess. Das gasförmige Kältemittel wird in einem Absorber in einer Flüssigkeit gelöst. Kältemittel und Flüssigkeit bilden dabei ein Stoffpaar mit einer leicht und einer schwer siedenden Komponente. Im Absorber wird durch die Lösung Wärme frei, die sich auf eine Wärmesenke übertragen lässt. Um die Lösung wieder in ihre Bestandteile zu trennen, wird sie über einen Wärmeübertrager geleitet und in einen Austreiber gepumpt, in dem unter Zufuhr von Antriebswärme die leichtsiedende Komponente verdampft. Die verbleibende schwersiedende Komponente wird über den Wärmeübertrager zurück in den Absorber geleitet, die leichtsiedende Komponente wird einem Verflüssiger zugeführt. Dort gibt sie Wärme ab, durchläuft wie bei der Kompressionskältemaschine ein Expansionsventil und geht dann erneut in den Kreisprozess ein. Bei Absorptionswärmepum-

pen verbreitete Stoffpaare sind Lithiumbromid/Wasser und Wasser/Ammoniak. Der thermische Verdichter kann durch Wärmeenergie aus Verbrennungsprozessen oder mittels Abwärme angetrieben werden.



**Abb. 1-2** Aufbauski­ze sorptionsbasierter Wärmepumpen (links: Absorptionswärmepumpe; rechts: Adsorptionswärmepumpe)

Quelle: Wolf et al. (2012)

Bei Adsorptionswärmepumpen wird verdampftes Kältemittel hingegen in einer Sorptionskammer an einen Feststoff angelagert. Bei diesem Vorgang wird Wärmeenergie abgegeben, die an eine Wärmesenke geleitet werden kann. Da die Anlagerungsfähigkeit des Feststoffs nach einiger Zeit erschöpft ist, werden zwei Sorptionskammern im Wechsel genutzt, um einen kontinuierlichen Betrieb sicher zu stellen. Dabei wird stets in einer Kammer das Kältemittel adsorbiert und in einer zweiten Kammer parallel das Kältemittel unter Wärmezufuhr wieder ausgetrieben. Das ausgetriebene Kältemittel kondensiert in einem Verflüssiger und gibt dabei ebenfalls Wärme ab, die einer Wärmesenke zugeführt werden kann. Bei Adsorptionskältemaschinen häufig genutzte Kombinationen aus Feststoff und Kältemittel sind Zeolith/Wasser, Silicagel/Wasser und Aktivkohle/Methanol. Wie bei den Absorptionswärmepumpen können auch hier Wärmeströme aus unterschiedlichen Quellen genutzt werden.

*Brüdenverdichter* sind analog zu Kompressionswärmepumpen aufgebaut, basieren allerdings auf einem offenen Kreisprozess. Hierbei sind das Medium der Wärmequelle und das im Kreis geführte Medium identisch. Das Medium der Wärmequelle muss als Gas vorliegen. Das Gas wird dabei über einen mechanischen oder einen Dampfstrahlverdichter komprimiert. Die Wärme des verdichteten Gases kann danach abgeleitet werden.

Neben diesen Hauptformen gibt es weitere Spezialformen und Funktionsprinzipien. Beispielsweise wird in Rotationswärmepumpen statt durch einen Verdichter der Hoch- und Niederdruckbereich durch zentrifugale Kräfte erreicht (Wolf et al. 2014). Bei chemischen Wärmepumpen wird eine reversible chemische Reaktion genutzt, bei der bei niedrigen Temperaturen eine endotherme und bei hohen Temperaturen eine exotherme Reaktion stattfindet (z. B. Zhang et al. 2016). Daneben lassen sich alternative Verdichtungsprinzipien wie thermoakustische Systeme auf Basis akustischer Schwingungen (z. B. Spoelstra und Tijani 2005; Kleefkens und Spoelstra 2014), elektrothermische und magnetokalorische Wärmepumpen nennen.



## 1.4 Fokustechnologie C: Generative Fertigungsverfahren

Generative Fertigungsverfahren sind Fertigungsverfahren, bei denen ein Bauteil auf der Grundlage eines Computermodells durch Anfertigen und Verbinden einzelner Materialmengen, häufig in Form einzelner Schichten, schrittweise aufgebaut wird. Da bei diesen gegenüber abtragenden Verfahren Material hinzugefügt wird, werden sie auch als additive Verfahren bezeichnet. Im Sprachgebrauch werden generative Verfahren häufig auch als 3D-Druck bezeichnet. Generell ist anzumerken, dass die Begrifflichkeiten im Bereich der generativen Verfahren nicht einheitlich abgegrenzt und verwendet werden (VDI 2014b). Ferner werden einzelne Verfahren auch unter verschiedenen Begrifflichkeiten geführt.

**Tab. 1-2 Kommerziell etablierte generative Fertigungsverfahren und die mit ihnen bearbeitbaren Werkstoffe**

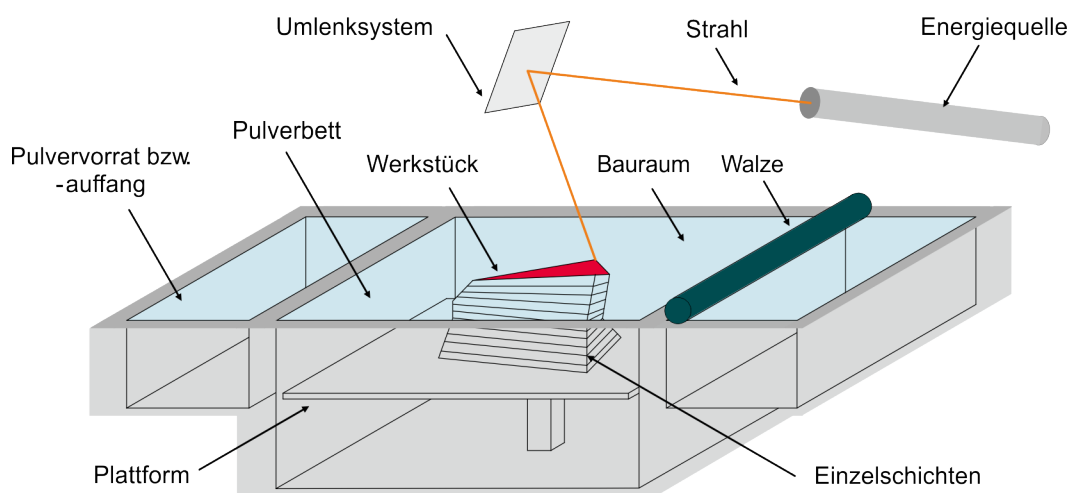
Verfahren	Metalle	Kunststoff	Keramik	Formsand	Papier
(1) Laser-Sintern	X	X	X	X	
(2) Laser-Strahlschmelzen	X				
(3) Elektronen-Strahlschmelzen	X				
(4) 3D-Drucken	X	X	X	X	
(5) Layer Laminated Manufacturing	X	X	X		X
(6) Stereolithographie		X	X		
(7) Digital Light Processing		X			
(8) Thermotransfer-Sintern		X			
(9) Fused Layer Modelling		X			
(10) Multi-Jet-Modelling		X			
(11) Poly-Jet-Modelling		X			

Quelle: mit Änderungen entnommen aus VDI 3405

Gegenüber den klassischen materialabtragenden Verfahren werden den generativen Verfahren verschiedene Vorteile zugeschrieben wie größere konstruktive Freiheiten, hohe Flexibilität bei der individuellen Anpassung der Produkte, ein weitgehender Verzicht auf Werkzeuge, die Möglichkeit der dezentralen Produktion, eine kürzere Prozesskette, eine kürzere Zeitspanne vom Design zum gefertigten Produkt, aber auch höhere Effizienz durch Einsparungen an Material und Gewicht. Im Vergleich zu traditionell in Serie oder in Masse gefertigten Produkten sind die Fertigungszeiten für den reinen Fertigungsprozess jedoch vergleichsweise langwierig, die erreichbaren Geometrien sind auf die häufig beschränkten Bauraumvolumina begrenzt, die Produkte unterliegen materialtechnischen Beschränkungen und Maschinen und Material sind vergleichsweise teuer.

Mit generativen Fertigungsverfahren lassen sich verschiedene Werkstoffe wie Metalle, Kunststoffe, Keramiken oder auch Papier bearbeiten. Tab. 1-2 zeigt eine Reihe unterschiedlicher kommerziell etablierter Verfahren.

In Anlehnung an Gebhardt (2013) und VDI (2014b) lassen sich die Verfahren wie folgt beschreiben: Ausgangspunkt zahlreicher generativer Verfahren ist ein Bett pulverförmiger Werkstoffe (Abb. 1-3). Beim Laser-Sintern (1) handelt es sich dabei um ein geringfügig vorverdichtetes Pulverbett aus Körnchen mit einem typischen Durchmesser von 20 bis 50  $\mu\text{m}$ , dessen oberste Schicht durch einen über ein Umlenkensystem gezielt geführten Laserstrahl angeschmolzen wird. Dadurch verschmelzen die einzelnen Pulverkörnchen im oberen Bereich des Pulverbetts miteinander und bilden durch die Wärmeleitung an den so erhitzten Stellen rasch eine feste, dünne Materialschicht. Das Pulverbett wird geringfügig abgesenkt und mit einer neuen Schicht Pulver überstrichen. Diese neue Schicht wird wiederum an ausgewählten Stellen dem Laserstrahl ausgesetzt, schmilzt an und verbindet sich dabei auch mit der vorherigen Materialschicht. Durch Wiederholen dieses Vorgangs bildet sich bei geänderter Führung des Lasers nach und nach schichtweise im Pulverbett ein vollständiges Bauteil. Zum Ausgleich von Spannungen und zur Positionierung des Bauteils werden bei Metallen häufig Stützstrukturen eingebracht. Während des Gesamtprozesses wird der Bauraum beispielsweise bei Kunststoffen möglichst bis knapp unter der Schmelztemperatur des Pulvers aufgeheizt, sodass nur wenig zusätzliche Schmelzenergie durch den Laser eingebracht werden muss. Eine Schutzatmosphäre kann hier zur Vermeidung der Oxidation des Pulvers eingebracht werden. Das nicht aufgeschmolzene Pulver verbleibt während des Prozesses im Pulverbett und kann – abhängig von der Geometrie des Körpers – nach dem Abkühlen des Gesamtkörpers und der Entnahme aus dem Pulverbett entfernt werden. Nach Abschluss des Prozesses müssen etwaige Stützstrukturen entfernt und je nach Anforderungen an das Bauteil Nachbearbeitungsschritte wie Schleifen oder Sandstrahlen erfolgen.



**Abb. 1-3 Aufbauskinne eines Pulverbettverfahrens**

Zum Laser-Sintern gibt es eine Reihe eng verwandter Verfahrensvarianten. Beim Laser-Strahlschmelzen (2) wird bei der Herstellung metallischer Bauteile das Pulver vollständig aufgeschmolzen. Beim Elektronen-Strahlschmelzen (3) wird statt eines Lasers ein gelenkter Elektronenstrahl als Energiequelle genutzt. Auch das 3D-

Drucken (4) als Verfahren funktioniert grundsätzlich ähnlich. Ausgangspunkt ist auch hier ein Pulverbett. Statt das Material schichtweise zu schmelzen, wird jedoch hier über einen Druckkopf gezielt eine Binderflüssigkeit hinzugegeben, die das Pulvermaterial an den entsprechenden Stellen verfestigt und analog zu den bisherigen Verfahren einen schichtweisen Aufbau des Bauteils erlaubt. Beim Layer Laminated Manufacturing (5) wird ein anderer Weg eingeschlagen. Hier werden vorgefertigte Schichten eines Ausgangsmaterials wie Folien eingesetzt, übereinander gefügt und schichtweise mittels eines Werkzeugs, Wasserstrahls oder Lasers in die gewünschte Form geschnitten. Die einzelnen Schichten werden dabei durch Prozesse wie Kleben oder Schweißen miteinander verbunden.

Neben den zuvor genannten Verfahren, die sich generell für metallische Werkstoffe eignen, gibt es im Bereich der generativen Verfahren diverse Ansätze, mit denen sich insbesondere Kunststoffe verarbeiten lassen. Die Stereolithographie (6) beruht darauf, dass flüssige Harze wie Acryl- oder Epoxidharze unter Einfluss von UV-Licht zu einem festen Kunststoff aushärten. Um dies für die generativen Verfahren zu nutzen, wird Licht oder ein Laserstrahl auf die Oberfläche eines Harzbades geleitet und prinzipiell analog zu den obigen Verfahren vorgegangen, indem schichtweise neues Harz aufgebracht und verfestigt wird und sich dadurch sukzessive ein gesamter Körper samt Stützstrukturen bildet. Das Digital Light Processing (7) funktioniert analog, allerdings wird als Lichtquelle eine Lampe verwendet, deren Licht durch eine Maske so gesteuert wird, dass die relevanten Teile einer gesamten Materialschicht auf einmal belichtet werden. Beim Thermotransfer-Sintern (8) kommt hingegen wiederum ein Pulverbett zum Einsatz, bei dem über einen beheizten Druckkopf einzelne Schichten gesintert werden. Beim Fused Layer Modelling (9) handelt es sich um ein Verfahren, bei dem statt der Bearbeitung eines „vorbereiteten“ Materialvolumens das Material durch einen beheizten Druckkopf oder eine beheizte Düse extrudiert wird und durch eine Positionsänderung der Düse zu einer Schicht einschließlich Stützstrukturen geformt wird. Folgeschichten werden auf den jeweiligen Vorgängerschichten abgelegt. Beim Multi-Jet Modelling (10) wird das Material über eine Reihe von Düsen linienweise zu einer Schicht geformt, beim Poly-Jet Modelling (11) wird ein UV-sensitives Flüssigharz über Düsen ausgetragen und unmittelbar über UV-Strahler gehärtet.

Neben der beschriebenen Verarbeitung der Materialien umfasst die Fertigungskette für generative Verfahren weitere Prozessschritte. Da die Erstellung der Produkte auf digitalen Daten beruht, ist vorgelagert eine Aufbereitung des zugrundeliegenden Computermodells erforderlich. Hierbei müssen Material- und Prozessspezifika (z. B. Abkühlverhalten, Geometrieausrichtung, Stützen) berücksichtigt werden. Im Anschluss an die Fertigung folgen Reinigungs-, Nachbehandlungs- und Qualitätssicherungsprozesse.

Für die industrielle Produktion als Querschnittstechnologie besonders interessant erscheinen besonders die für metallische Werkstoffe geeigneten Verfahren, da metallische Werkstoffe einerseits in der Herstellung und andererseits in der Bearbeitung besonders viel Energie benötigen.

## 1.5 Ausweisung der Fokustechnologien in Energieszenarien

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden an verschiedenen Stellen die in *Teilbericht 1* vorgegebenen nationalen und internationalen Energieszenarien als Grundlage für die Bewertung herangezogen. Im Folgenden wird eingehender dargestellt, inwieweit die betrachteten Fokustechnologien in den jeweiligen Szenarien explizit quantitativ untersucht werden.

Tab. 1-3 zeigt, dass bei den auf erneuerbare Energien, Entwicklungskorridore oder Zielerreichung fokussierten Studien nachfrageseitige Technologien nur zum Teil detaillierter analysiert und ausgewiesen werden. Zum Beispiel werden nachfrageseitige Technologien in der Stromnachfrageentwicklung subsumiert oder große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen gehen in eine allgemeine Gruppe Wärmepumpen (einschließlich Umweltwärme als Wärmequelle und Anwendungen im Haushaltssektor) ein.

**Tab. 1-3 Übersicht ausgewählter Langfristszenarien und Betrachtung der Fokustechnologien in den jeweiligen Studien**

Autoren (Jahr)	Kurztitel	FF A	FF B	FF C
Deutschland				
DLR et al. 2012	BMU Leitstudie 2011	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
UBA 2014	Treibhausgasneutrales Deutschland	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prognos et al. 2014	Entwicklung der Energiemärkte	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fraunhofer IWES et al. 2015	Interaktion EE-Strom, Wärme, Verkehr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015	Klimaschutzszenario 2050: 2. Endbericht	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fraunhofer ISE 2013	Energiesystem Deutschland 2050	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
50Hertz Transmission GmbH et al. 2016	Netzentwicklungsplan Strom / Gas 2030	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
International				
IEA 2016c	World Energy Outlook 2016	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IEA 2016a	Energy Technology Perspectives 2016	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Greenpeace International et al. 2015	Energy [R]evolution	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
World Energy Council 2016	World Energy Scenarios 2016	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fokusfelder FF A: Elektromotoren, FF B: HT-Wärmepumpen, FF C: Fertigungsverfahren				

Mit Blick auf eine Aufschlüsselung der Fokustechnologien wird hinsichtlich der *Elektromotoren* im nationalen Bereich in Prognos et al. (2014) für das Zielszenario die Entwicklung der mechanischen Energie als Teil der industriellen Endenergienachfrage ausgewiesen. Da mechanische Energie gemäß der oben gezeigten Statistik nur zu einem Bruchteil durch den Einsatz von Brennstoffen bereitgestellt wird, kann dieser Energiebedarf näherungsweise als Energienachfrageentwicklung für Elektro-

motoren angesetzt werden. Auf internationaler Ebene wird in IEA (2016c) das Thema elektromotorische Antriebssysteme als Fokusbereich dezidiert mit internationalen Potenzialen analysiert. *Große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen* werden mittelbar in Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) behandelt, indem das technische Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpen in der Industrie anhand unterschiedlicher Temperaturniveaus ausgewiesen wird. Ferner werden Annahmen getroffen, inwieweit dieses Potenzial in den Szenarien ausgeschöpft wird. Der Bereich der *generativen Verfahren* wird in keiner Studie näher betrachtet. Dies ist nicht überraschend, da es sich um eine relativ junge Technologie mit relativ geringer Verbreitung und mittelbarem Bezug zur Energienachfrage handelt.

Insgesamt ist die explizite Ausweisung von Angaben zu den Fokustechnologien in den genannten Szenarien damit relativ begrenzt. Dadurch muss bei quantitativen Darstellungen im Rahmen der Bewertung teilweise auf andere Quellen bzw. Abschätzungen zurückgegriffen werden und es können nur zum Teil Korridore für Maxima und Minima ausgewiesen werden.

## 2 Stand F&E in Deutschland

Im Folgenden wird kurz der Stand der Technologieentwicklung für die Fokustechnologien dargestellt, wobei neben der nationalen Betrachtung auch die internationale Perspektive einbezogen wird.

### 2.1 Elektromotoren

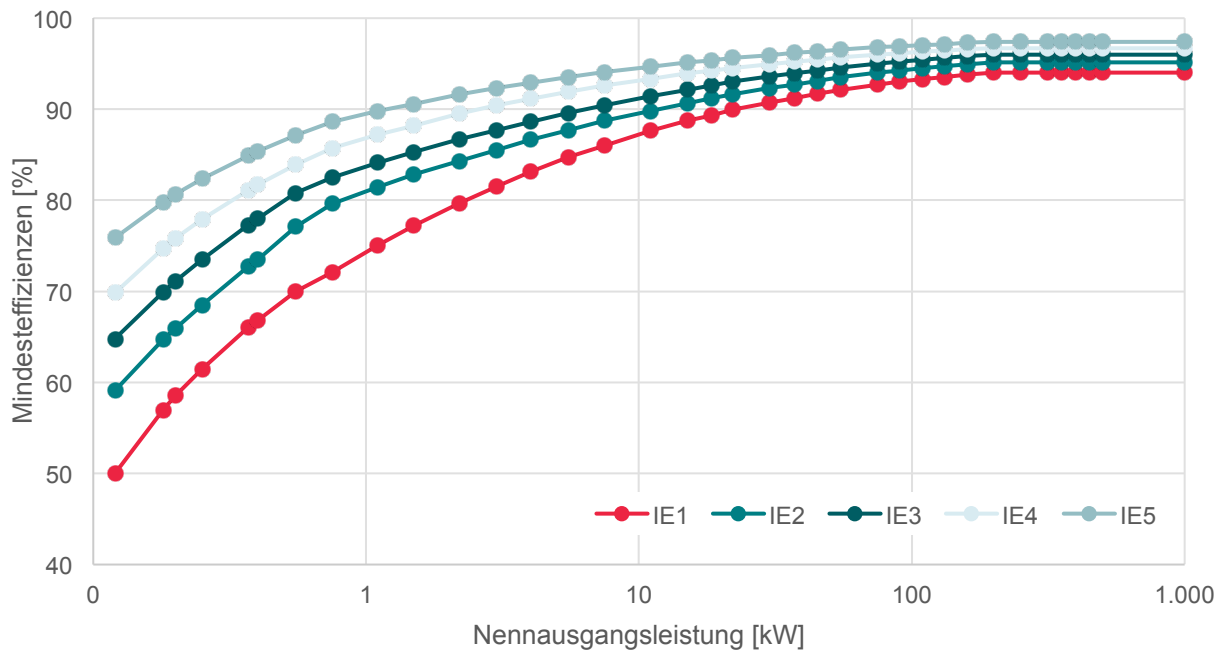
Elektromotoren wurden als Technologie im 19. Jahrhundert erfunden, haben heute breiten Einzug in industrielle Anwendungen gefunden und tragen zu einem erheblichen Teil zur Stromnachfrage in der Industrie bei. Der Rückgriff auf magnetische Felder wie bei den derzeit genutzten Elektromotoren wird zurzeit als einzige auch längerfristig aussichtsreiche Methode zur Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie angesehen. Verwandte Prozesse auf Basis elektrischer Felder oder Ultraschallverfahren sind absehbar nicht kompetitiv (Mecrow und Jack 2008).

In der Vorgängerstudie (Wietschel et al. 2010) wurde der Bereich Elektrischer Antriebssysteme als Teil der Querschnittstechnologien analysiert. Als Forschungsempfehlungen wurde hier festgehalten, dass sich die Förderung auf die Weiterentwicklung in Richtung von Motoren mit der damals höchsten Effizienzklasse IE4 konzentrieren sollte. In diesem Zusammenhang wurden neben Permanentmagnetmotoren insbesondere Motoren auf Basis von Hochtemperatursupraleitung genannt. Als zweiter Bereich wurde die Verbesserung mit Umrichter betriebener Antriebe gesehen, wobei hier insbesondere kompaktere, besser integrierte Systeme mit hocheffizienten Umrichtern und mögliche Direktantriebe im Vordergrund standen. Drittens wurde die weitergehende ganzheitliche Optimierung von elektrischen Antriebssystemen als wichtiges Thema hervorgehoben.

Um die Entwicklungen bei der Verbesserung der Effizienz von Elektromotoren in den letzten Jahren einordnen zu können, ist zunächst eine Betrachtung des normativen und politischen Umfelds hilfreich. Auf der normativen Seite wurden für die verbreitet eingesetzten Induktionsmotoren in verschiedenen Regionen der Welt unterschiedliche lokale Energieeffizienzstandards entwickelt (Almeida et al. 2008b). Um den Aufwand für die Einhaltung, Umsetzung und Nutzung bei weltweit agierenden Herstellern und Nutzern zu minimieren, wurde 2008 mit dem Standard IEC 60034-30 eine international einheitliche Norm zur Bestimmung der Effizienz bestimmter Elektromotorvarianten geschaffen. Im Rahmen dessen wurden drei Energieeffizienzklassen IE1 (Standardeffizienz) bis IE3 (Premiumeffizienz) für verbreitete Motoren im Leistungsbereich von 0,75 bis 375 kW festgelegt. 2014 wurde eine aktualisierte Fassung veröffentlicht, bei der unter anderem der Anwendungsbereich auf Motoren im Bereich von 0,12 bis 1.000 kW erweitert wurde. Zusätzlich wurde als neue Effizienzklasse IE4 (Superpremium-Effizienz) spezifiziert und noch eine weitere IE5-Klasse (Ultrapremium-Effizienz) indikativ mit einer weiteren Reduzierung der Verluste um 20 % gegenüber der IE4-Klasse angegeben (Almeida et al. 2014e).

Abb. 2-1 veranschaulicht die Energieeffizienzklassen für 4-polige und mit 50 Hz betriebene Motoren. Wie erkennbar ist, steigen die Mindesteffizienzwerte bei höherer Leistung deutlich an und sehr hohe Effizienzwerte sind bei kleineren Nennleistungen schwieriger erreichbar. Insbesondere im Bereich kleiner Leistungsklassen gibt es hingegen deutliche Unterschiede zwischen den Effizienzklassen. Beispielsweise be-

trägt der Unterschied in der Effizienz zwischen IE1 und IE4 bei einem 1,1 kW-Motor 12,2 %-Punkte, bei einem 110 kW-Motor hingegen nur 3 %-Punkte. Damit wird auch deutlich, dass die generellen Potenziale zur weiteren Verbesserung von Motoren im großen Leistungsbereich aufgrund der bereits hohen Wirkungsgrade, z. B. 96 % bei IE3, nur sehr wenige Prozentpunkte umfassen können.<sup>2</sup>



**Abb. 2-1 Darstellung der Energieeffizienzklassen für das Beispiel von 4-poligen 50 Hz-Motoren**

Quelle: Werte der Klassen IE1 bis IE4 übernommen aus ABB 2014; IE5 dargestellt als IE4 mit 20 % geminderten Verlusten

Eng an die Norm geknüpft sind die politischen Vorgaben für die Verbesserung bei Elektromotoren in Europa. Insbesondere in den vergangenen zehn Jahren wurde das Thema durch politische Vorgaben stark vorangetrieben, nachdem eine in den Vorjahren währende Selbstverpflichtung der Industrie nur zu einer langsamen Verbreitung hocheffizienter Motoren auf dem Markt geführt hat. Ausgehend von den Regelungen der Ökodesignrichtlinie (Richtlinien 2005/32/EG, 2009/125/EU) wurde das Thema insbesondere mit einer europäischen Durchführungsverordnung zu Elektromotoren (VO 640/2009) vorangetrieben. Deren Vorgaben knüpfen an die erste Fassung der IEC 60034-30 an und legen für bestimmte Motoren im Leistungsbereich zwischen 0,75 und 375 kW Mindestanforderungen an die Effizienz von Motoren fest. Motoren, die diese Mindeststandards nicht erfüllen, dürfen auf dem europäischen und damit auch auf dem deutschen Markt nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Die Umsetzung der Mindestanforderungen folgt einem mehrstufigen Konzept, dessen derzeit letzte Stufe Anfang 2017 in Kraft getreten ist. Daran anschließend wurden

<sup>2</sup> Von dieser Überlegung sind jedoch die Einsparpotenziale durch den flächendeckenden Einsatz dieser Motoren zu unterscheiden, da effiziente Motoren aufgrund der langen Nutzungsdauern nur langsam in den Gesamtbestand vordringen.

im Rahmen der erweiterten Ökodesignvorstudie zu Motoren außerhalb der Verordnung 640/2009 (Lot 30, Almeida et al. 2014a) von den Autoren der Studie verschiedene Vorschläge zur Weiterführung formuliert, darunter unter anderem eine mögliche Anhebung der Mindeststandards auf das Niveau IE4 im Jahr 2022.

**Tab. 2-1 Inkrafttreten von Mindestanforderungen für Elektromotoren gemäß VO 640/2009**

Inkrafttreten	Leistungsbereich	Mindestniveau
16. Juni 2011	0,75 bis 375 kW	IE2
1. Januar 2015	7,5 bis 375 kW	IE3 oder IE2 mit Drehzahlregelung
1. Januar 2017	0,75 bis 375 kW	IE3 oder IE2 mit Drehzahlregelung

Legt man Tab. 1-1 zu Grunde, so zeigt sich, dass perspektivisch mit der derzeitigen Technologieentwicklung nicht mit allen Motortechnologien das Effizienzniveau der IE4-Klasse erreicht werden kann. Ausführungen in Almeida et al. (2014e) unterstreichen jedoch, dass der Übergang zu IE5-Motoren prinzipiell möglich ist.

Trotz der Vielzahl unterschiedlicher Elektromotorarten sind Dreiphasen-Käfigläufermotoren mit deutlichem Abstand am weitesten verbreitet. Seit 2012 ist bekannt, dass auch mit diesen Motoren unter Beibehaltung von Baugrößenrestriktionen und Wirtschaftlichkeit die IE4-Klassifikation realisierbar ist (Almeida et al. 2014e). Daneben wurden auch netzanlauffähige Permanentmagnet-Synchronmotoren, frequenzumrichter-gestützte und geschaltete Reluktanzmotoren im IE4-Segment auf den Markt gebracht (Almeida et al. 2014e). Gerade Permanentmagnet-Synchronmotoren gelten in Verbindung mit einem Frequenzumrichter als reife Technologie zum Erreichen der IE4-Klassifikation, insbesondere wenn für die magnetischen Materialien seltene Erden eingesetzt werden (Almeida et al. 2014e). Mit der Fortentwicklung der Käfigläufermotoren wird allerdings der Einsatz netzanlauffähiger Permanentmagnetmotoren im IE4-Segment aufgrund ihrer höheren Kosten sowie des nachteiligen Anlauf- und Laufverhaltens eher für höchsteffiziente Anwendungen im IE5-Segment und in kleineren Leistungsklassen gesehen (Almeida et al. 2014e).

Mit Blick auf die Weiterentwicklungsbedarfe werden in der Literatur verschiedene Vorschläge formuliert. Bei Käfigläufermotoren wird die bereits in der Vorgängerstudie genannte Möglichkeit gesehen, durch den Einsatz von Kupfer statt Aluminium im Rotor die Gesamtverluste weiter zu reduzieren, wobei hier die dadurch erhöhten Kosten für Material- und Herstellungsprozess durch die Effizienzgewinne kompensiert werden müssten. Ähnliches gilt für die Möglichkeit, eine größere Bauform für den Motor zu wählen und durch mehr aktives, d. h. magnetisierbares Material die Verluste zu reduzieren. Eine weitere Möglichkeit ist es, Eisenverluste durch den Einsatz optimierter Einzelbleche und amorpher Metalle zu reduzieren. Weitere Verbesserungen betreffen die Optimierung des Designs von Rotor und Stator, präziserer Produktionsprozesse zur Verringerung von Spaltmaßen, das Design der Kühlsysteme und der Lager sowie die Verbesserung des Teillastverhaltens (Almeida et al. 2014e).

Daneben bestehen Möglichkeiten in der Verwendung anderer Motortechnologien, u. a. Permanentmagnetmotoren, Synchronmaschinen oder alternative Designs wie Axi-



alflussmotoren auf Permanentmagnet/Ferrit-Basis. Mit einem Frequenzumrichter betriebene Permanentmagnetmotoren und Synchron-Reluktanzmaschinen werden als aussichtsreiche effiziente Motortechnologien in Verbindung mit geschwindigkeitsvariablen Antrieben genannt (Almeida et al. 2014e).

Einige orientierende techno-ökonomische Kenndaten zur Fokustechnologie Elektromotoren mit perspektivischem Ausblick sind in Tab. 2-2 zusammengestellt (Leistung: 75 kW). Hierbei wurde anhand der oben dargestellten Ausführungen angenommen, dass ein Übergang zum IE5-Standard in den kommenden 15 Jahren erreichbar sein sollte und längerfristig insbesondere bei kleineren Motorleistungen weitere Fortschritte erzielbar sein sollen. Almeida et al. (2014e) zufolge liegen die Kosten für IE4-Käfigläufer etwa 15 % über den Werten für IE3-Motoren. Für die Entwicklung der künftigen Investitionen wird angenommen, dass ein ähnlicher Sprung bei IE5 auftreten wird, zuvor aber die Kosten für IE4 auf das IE3-Niveau sinken werden. Als Lebensdauer werden konstant durchschnittliche 15 Jahre für einen Motor mittlerer Größe unterstellt (Almeida et al. 2008a; Almeida et al. 2014b).

**Tab. 2-2 Techno-ökonomische Kenndaten der Fokustechnologie Elektromotoren**

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Mindesteffizienzklasse <sup>1</sup>	Klasse	IE4	IE4	IE5	IE5+	IE5+
Durchschnittliche Effizienz	%	96,0	96,0	96,8	96,8	96,8
Lebensdauer	a	15	15	15	15	15
Investition <sup>2</sup>	€/kW	100-130	95-120	100-130	90-120	85-115

<sup>1</sup> Für die Zeit nach 2030 wird von einer weiteren Steigerung über IE5 ausgegangen, wobei dies insbesondere Motoren kleinerer Leistungsklassen (unter 30 kW) betrifft. Dies wird hier als IE5+ bezeichnet.

<sup>2</sup> Die spezifischen Investitionen für hocheffiziente Motoren fallen mit steigender Motorgröße besonders stark.

Quelle: u. a. Almeida et al. 2014e, eigene Annahmen.

## 2.2 Große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen

Mit Blick auf den Einsatz großer industrieller Wärmepumpen ist die durch die Wärmepumpe erreichbare Vorlauftemperatur ein wesentlicher Parameter für die technisch realisierbaren Einsparpotenziale in der Industrie. Die Vorlauftemperatur von Wärmeverteilungssystemen orientiert sich in industriellen Prozessen typischerweise am Wärmeverbraucher mit der höchsten Betriebstemperatur. Gibt es mehrere Prozesse mit ähnlichen Temperaturbedarfen oder einzelne Prozesse mit sehr hohen Wärmebedarfen, werden zumeist separate Wärmeverteilungssysteme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus betrieben (Wolf et al. 2014).

Wärmepumpen können aktuell bei Vorlauftemperaturen bis 100 °C eingesetzt werden, wobei derzeit im Prototypenbau Temperaturen bis 125 °C erreicht werden. Darüber hinausgehende Vorlauftemperaturen wurden derzeit nur durch einzelne Laboranlagen realisiert und sind derzeit noch Gegenstand der Forschung (Wolf et al. 2014).

In den vergangenen Jahrzehnten konnten deutliche Verbesserungen der Leistungszahlen erreicht werden. Nach Wolf et al. (2014) ließen sich bei den Kleinwärmepumpen für den Haushaltsbereich deutliche Verbesserungen der Leistungszahlen erreichen. Dort werden je nach Messmethode für Sole/Wasser-Wärmepumpen in 2012 Leistungszahlen von 4,4 bzw. 4,8 und für Luft/Wasser-Wärmepumpen von 3,7 bis 4,1 angegeben. Für den Zeitraum ab 2005 wurde ein jährlicher Anstieg der Leistungszahl von 0,5 % für Sole/Wasser-Wärmepumpen bzw. 1,6 % für Luft/Wasser-Wärmepumpen ausgewiesen, die auf spezialisierte Komponenten und ein verbessertes Technikverständnis zurückgeführt werden. Ähnliche Entwicklungen werden dort auch für Großwärmepumpen erwartet, wobei von geringfügig höheren Leistungszahlen ausgegangen wird, da einige Grundverbräuche nicht linear mit der Größe der Anlage anwachsen.

Hinsichtlich des Leistungsbereichs industrieller Großwärmepumpen ist eine deutliche Weiterentwicklung des Marktangebots abzulesen: Während Lambauer et al. (2008) mit der Ausnahme eines Herstellers einen thermischen Leistungsbereich von 100 bis etwa 1.500 kW<sub>th</sub> als Stand der Technik angeben, wird das Leistungsspektrum später bei Wolf et al. (2014) auf 20.000 kW<sub>th</sub> ausgeweitet.

Aktuelle Entwicklungsaktivitäten konzentrieren sich unter anderem auf die Weiterentwicklung im Bereich von Hochtemperaturkältemitteln. Ausschlaggebend für den Einsatz von Kältemitteln sind technische, wirtschaftliche sowie sicherheits- und umwelttechnische Erwägungen. Aus technischer Sicht gilt, dass sich das Kältemittel bei realisierbaren Drücken verflüssigen und auf dem Temperaturniveau der Wärmequelle verdampfen lassen muss und dass typischerweise die aus thermodynamischer Sicht kritischen Bereiche außerhalb der Betriebsbedingungen liegen müssen. Ausnahmen hiervon sind überkritische Kältemittel wie Kohlendioxid. Weitere Erwägungen betreffen unter anderem die erreichbaren Leistungszahlen. Wirtschaftliche Aspekte umfassen die Verfügbarkeit und die Preise der Kältemittel und die volumetrische Kälteleistung als Bestimmungsgröße für den Kältemittelverdichter. Sicherheits- und umwelttechnische Erwägungen beinhalten unter anderem Gesundheitsgefährdungen sowie das Erderwärmungspotenzial oder die Verweildauer in der Atmosphäre (Wolf et al. 2014). Die Ermangelung geeigneter Kältemittel wird als einer der Hauptgründe für die derzeitige Beschränkung der Vorlauftemperaturen auf bis zu 100 °C genannt (Kleefkens und Spoelstra 2014).

Weitere Entwicklungsaktivitäten betreffen den Verdichter, für den neben der Effizienz auch Aspekte wie Lebensdauer, Geräuschemissionen und Abdeckung der technischen Anwendungserfordernisse wie das erreichbare Druckniveau relevant sind.

Weitere Aktivitäten fokussieren sich auf die Gestaltung von Wärmepumpen (vgl. Wolf et al. (2014), S. 36ff.) zur Anpassung an spezifische Anforderungen wie die hohen Temperaturspreizungen, die im industriellen Umfeld angetroffen werden. So konnten anhand von Prototypen bei Vorlauftemperaturen von rund 120 bis 125 °C und Temperaturspreizungen bis 60 K Leistungszahlen über 3 bei zuverlässigem Betrieb nachgewiesen werden. Weiterhin wurden mehrstufige Prototypen entwickelt, die darüber hinausgehende Temperaturspreizungen über 80 K bei einer Temperatur der Wärmesenke über 100 °C erreichen konnten. Weitere vermarktete Konzepte sind Hybridwärmepumpen, die kompressionsbasierte und sorptive Verfahren kombinie-

ren, wodurch hohe Drücke in den Anlagen vermieden und Verluste an Arbeitsfähigkeit minimiert werden.

Einen perspektivischen Ausblick für die Fortentwicklung von Wärmepumpen speziell für den industriellen Bereich in Europa geben Sanner et al. (2013). In kurzfristiger Hinsicht bis 2020 wird dort für Kompressionswärmepumpen Verbesserungsbedarf bei der Entwicklung neuer klimafreundlicher und natürlicher Kältemittel, die Verbesserung von Verdichtern und Schmiermethoden für Temperaturen bis 100 °C sowie Verbesserungsbedarf bei Wärmetauschern zur direkten Nutzung von kondensierenden Abgasen gesehen. Hierbei sollten Vorlauftemperaturen von 150 °C erreichbar werden. Weitere Kurzfristziele betreffen die Prozessintegration, die Optimierung und Steuerung von Wärmepumpen, das hydraulische Design, das dynamische Verhalten sowie die Auswahl geeigneter Komponenten.

**Tab. 2-3 Techno-ökonomische Kenndaten der Fokustechnologie große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen einschließlich Weiterentwicklungspfade bis 2050**

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Maximale Vorlauftemperatur im kommerziellen Produkt	°C	125	160	200	200	200
Temperaturhub	K	60	80	100	100	100
Lebensdauer	Jahre	15	15	15	15	15
Investition Wärmepumpe	€ <sub>2014</sub> /kW <sub>th</sub>	200-250	190-240	180-230	180-220	170-210
Leistungszahl Bestand KS 80/KS 95	-	3,0 / 3,0	3,0 / 3,1	3,2 / 3,4	3,3 / 3,7	3,4 / 4,0

Quelle: u. a. Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015, Wolf et al. 2014, eigene Annahmen

Mittelfristig bis 2030 und langfristig wird darüber hinaus Entwicklungsbedarf in Richtung neuer Wärmepumpenkonzepte gesehen. Hierbei soll einerseits das Anwendungspotenzial verbessert werden, indem Temperaturniveaus erhöht, Kosten gesenkt, Toxizität und Entflammbarkeit von Kältemitteln vermindert und die Zuverlässigkeit der Systeme erhöht werden. Da die Anwendungsbereiche einzelner Technologien begrenzt sind, wird hier die Notwendigkeit gesehen, verschiedene Technologien parallel weiterzuentwickeln. Hier wird insbesondere Bedarf gesehen, das Vorlauf-temperaturniveau auf bis zu 200 °C und die Temperaturspreizung auf über 70 K anzuheben sowie eine Verbesserung der Leistungszahl von über 20 % zu erzielen. Als Variante werden in diesem Zusammenhang auch thermoakustische Wärmepumpen genannt.

Tab. 2-3 zeigt einige techno-ökonomische Kenndaten großer industrieller Hochtemperaturwärmepumpen mit Entwicklungsperspektive. Angaben zu Investitionen und Lebensdauer sind Wolf et al. (2014) entnommen. Für die Integration der Wärmepumpe sind zusätzliche Aufwendungen in Höhe von 60 bis 100 % des Wärmepumpenpreises hinzuzurechnen. Für die Fortschreibung bis 2050 wurde hier von einer moderaten Kostendegression von 0,5 % pro Jahr ausgegangen und der Wert gerundet.

## 2.3 Generative Fertigungsverfahren

Aus historischer Sicht haben sich generative Fertigungsverfahren mit der zunehmenden Verbreitung computergestützter Designsoftware (CAD-Technik) seit den späten 1980er Jahren neben den klassischen subtraktiven Fertigungsverfahren etabliert (z. B. Beyer 2014). Zunächst lag der Schwerpunkt der Verfahren auf der Fertigung von Modellen und Prototypen. In den letzten Jahren haben die Verfahren aber durch immer breitere Anwendungsmöglichkeiten und durch Kostensenkungen bei der technischen Infrastruktur (EFI 2015) auch für die Herstellung industriell gefertigter Endprodukte zunehmend an Bedeutung gewonnen .

Derzeit werden generative Fertigungsverfahren mit variierendem Reifegrad in unterschiedlichen Branchen und Bereichen eingesetzt. Hierzu zählen der Fahrzeugbau, die Luft- und Raumfahrtindustrie, der Maschinenbau, chemische Erzeugnisse, medizinische Geräte und Produkte sowie Instrumente und Messtechnik (EFI 2015). Heutzutage gilt die Verarbeitung von Kunststoff und Metall im industriellen Umfeld generell als Stand der Technik, während die Verarbeitung von Keramiken und anderen Werkstoffen wenig verbreitet ist (VDI 2014a).

Die generativen Fertigungsverfahren gelten insbesondere bei kleinen Stückzahlen gegenüber konventionellen Verfahren als wirtschaftlich, da Kosten für Werkzeugbau und Ähnliches entfallen und neu entwickelte Produkte in kleinen Stückzahlen sehr flexibel gemäß den Kundenwünschen, kurzfristig und weitgehend ortsunabhängig hergestellt werden können. In einigen industriellen Bereichen werden generative Fertigungsverfahren bereits als etablierte Technik eingestuft; dabei werden sie insbesondere für komplexe Einzelteile, Prototypen und Kleinserien genutzt (EFI 2015).

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird als allgemeines, längerfristiges Entwicklungsziel angesehen, dass sich die Anwendungsbereiche der generativen Fertigungsverfahren weiterentwickeln sollten und diese Verfahren „seriennah“ in der Produktion eingesetzt werden sollen. Da im Unterschied zu den anderen betrachteten Energietechnologien neben der technologischen Vielfalt der Verfahren bei allen Betrachtungen die „Anwendungsseite“ der Endprodukte als komplexer Bestimmungsfaktor hinzukommt, wird hier keine weitergehende Eingrenzung von „seriennah“ anhand einzelner Parameter wie beispielsweise Effizienz oder Bauvolumen je Zeit gegeben. Stattdessen werden hier generelle Entwicklungsbereiche dargestellt.

Für die Weiterentwicklung generativer Fertigungsverfahren wurden in Allison und Scudamore (2014) Empfehlungen für unterschiedliche Bereiche formuliert. Ansatzpunkte für die technisch orientierte Weiterentwicklung mit Blick auf Produktivität, Materialien, Prozesse und Stabilität sowie Produktqualität sind in Tab. 2-4 wiedergegeben.

**Tab. 2-4 Auszug aus den Forschungsempfehlungen für generative Fertigungsverfahren gemäß Allison und Scudamore (2014) für die Bereiche Produktivität, Materialien, Prozess und Stabilität sowie Produktqualität (eigene, gekürzte Übersetzung)**

Bereich	Empfehlungen
Produktivität	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Steigerung der Baugeschwindigkeit</li> <li>▪ Reduzierte Schichtherstellungsdauer, reduzierte Zeiten zwischen zwei Schichten und für Start- und Abschluss</li> <li>▪ Unterstützung größerer Produktionsvolumina</li> <li>▪ Entwicklung spezifischer Messverfahren</li> <li>▪ Entwicklung neuer fortschrittlicher Maschinenkonzepte, z. B. Mehrfachlaser-Anlagen</li> </ul>
Materialien	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entwicklung in Richtung von Materialeigenschaften wie bei klassisch gefertigten Guss- und Halbzeugen</li> <li>▪ Entwicklung einheitlicher und gleichförmig nutzbarer Materialien</li> <li>▪ Übertragbarkeit der Prozessparameter zwischen unterschiedlichen Anlagen</li> <li>▪ Analyse- und Prüftechniken für Eigenschaften unterschiedlicher Materialien und Mehrfachmaterialien</li> <li>▪ Entwicklung neuer halb-kristalliner und amorpher Polymere</li> <li>▪ Analyse und Entwicklung neuer Materialien</li> <li>▪ Einsatz maßgeschneiderter Materialien</li> <li>▪ Verbesserung der Materialnutzung</li> </ul>
Prozesse und Stabilität	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserte Verarbeitbarkeit, Qualität und Leistung von Material</li> <li>▪ Methodenentwicklung für unmittelbar richtige Prozessführung</li> <li>▪ Bessere Steuerung von Toleranzen</li> <li>▪ Werkzeuge für bessere Temperatursteuerung im Prozess</li> <li>▪ Verbesserte Oberflächenqualität</li> <li>▪ Verbesserte geometrische Stabilität</li> <li>▪ Verbesserte Prozessüberwachung und Steuerung</li> <li>▪ Methoden zur Überwachung und Reduzierung des Energieverbrauchs</li> <li>▪ Weiterentwicklung von Lasern mit höherer Effizienz und verbesserter Steuerung</li> <li>▪ Entwicklung von Multi-Material-Verfahren</li> <li>▪ Reduzierung von Spannungen</li> <li>▪ Intensivere Softwarenutzung</li> <li>▪ Reduzierung von Abfall und verbesserte Wiederholbarkeit</li> <li>▪ Bessere Handhabung von Material, Teilen und Komponenten</li> <li>▪ Ansätze zur erleichterten Nutzung neuer Pulver und zur Integration der Supply Chain</li> <li>▪ Identifizierung neuer und Ausbau bestehender Supply Chain Potenziale</li> <li>▪ Analyse der Stabilität der Fertigungsverfahren zur Verbesserung der Systeme</li> </ul>
Produktqualität	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prozess-integrierte Überwachungs- und Steuerungssysteme und Reduzierung von Nachbearbeitungsbedarfen</li> <li>▪ Entwicklung von In-Situ-Sensoren für zerstörungsfreie Prüfmethode und zur Fehlerfrüherkennung</li> <li>▪ Entwicklung von Arbeitsabläufen für hybride Herstellmethoden, um Anforderungen an Geometrien und Oberflächen zu erfüllen</li> <li>▪ Verbessertes Verständnis für Interaktion von Energiestrahle (Laser- oder Elektronenstrahl) und Material und die daraus resultierenden Änderungen für Kleinteile und Oberfläche</li> <li>▪ Entwicklung von Materialkatalogen</li> <li>▪ Entwicklung eines Online-Portals mit Materialvergleichsmöglichkeiten</li> </ul>

Ähnlicher Weiterentwicklungsbedarf wird auch in VDI (2014a) hinsichtlich der Werkstoffverfügbarkeit und -eigenschaften (u. a. für Spezialanwendungen, Brandschutz, elektrische Isolation), der Fertigungsmaschinen (Prozessgeschwindigkeit, Temperaturverteilung, Multi-Werkstoff-Einsatz, Bauraum), der Prozessführung (Datenaufbereitung, Rüstzeiten, Kosten, Stabilität, Reproduzierbarkeit, Bedienerfreundlichkeit), der Verbesserung der Oberflächeneigenschaften (reduzierter Nachbearbeitungsbedarf, weiterentwickelte Oberflächenbehandlung) und hinsichtlich der Produktqualität (Oberflächengüte, mechanische Eigenschaften) gesehen. Daneben betrifft der Bedarf aber auch im Umfeld den Bereich der Konstruktion (spezialisierte Softwareumgebungen, Schulung, Wissenstransfer) sowie der Prozessintegration und -automatisierung. In Bundesregierung (2013) genannte weitere Aspekte umfassen unter anderem die Langzeitbeständigkeit der Produkte, die Verbesserung der Prozesssicherheit, die Senkung der Fertigungskosten einschließlich Endbearbeitung, die Einbindung generativer Verfahren in eine durchgängige Datenkette, Verfahren zur angepassten Bauteilauslegung, optimale Partikelgrößenverteilungen für Pulverbettverfahren und optimale Fließeigenschaften.

### 3 Relevanz öffentlicher Förderung

Die nachfolgende Bewertung des Technologiefelds erfolgt anhand von 12 Einzelkriterien. Abhängig von der Art des Kriteriums wird dabei das gesamte Technologiefeld nach Möglichkeit aggregiert betrachtet. Bei vielen Kriterien ist jedoch eine Aufschlüsselung anhand der unterschiedlichen Fokustechnologien naheliegender.

#### 3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Das Kriterium Vorlaufzeiten spiegelt die Dauer bis zur Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlagen für ein Technologiefeld wider (Tab. 3-1).

Bei den hocheffizienten *Elektromotoren* werden mit Blick auf die Vorlaufzeiten in IEA (2016c) Motoren oberhalb der IE3-Klassifizierung im New Policies Scenario erst ab etwa 2030 die Energienachfrage mitbestimmen. Im 450-Szenario wird hingegen davon ausgegangen, dass bereits 2025 zahlreiche OECD-Länder und China den IE4-Standard als Mindeststandard einführen. Da wie oben beschrieben erste IE4-Modelle bereits heute vertrieben werden und da sich die Effizienz der Motoren im davorliegenden Jahrzehnt deutlich verbessert hat, erscheint eine kommerzielle Einführung von IE5-Motoren trotz des Weiterentwicklungsbedarfs bis zum Jahr 2030 umsetzbar. Aufgrund der hohen Bedeutung effizienter Motoren für die Reduzierung der Energienachfrage und der politisch getriebenen Fortentwicklung durch Mindeststandards scheint die Entwicklung in beiden Szenarien zeitlich ähnlich zu verlaufen.

Ein wichtiges Entwicklungsziel im Bereich der *großen industriellen Hochtemperaturwärmepumpen* ist das Erreichen des höheren Temperaturniveaus bis zu 200 °C bei einer möglichst breiten Temperaturspreizung und einer hohen Leistungszahl. Der zeitliche Zielkorridor für diese Entwicklung ist das Jahrzehnt zwischen 2030 und 2040. Aufgrund des Beitrags entsprechender Wärmepumpen zur Reduzierung der Energienachfrage ist für das ambitioniertere Szenario eher von einer Entwicklung im Umfeld von 2030 auszugehen.

*Generative Fertigungsverfahren* werden bereits heute in verschiedenen Industriezweigen insbesondere für die Fertigung komplexer und individualisierter Bauteile eingesetzt. Dennoch besteht in einer Vielzahl von Punkten noch technischer Weiterentwicklungsbedarf, um die Verfahren stärker in der Breite seriennah einzusetzen, auch wenn eine spezifische Angabe aufgrund der Vielfalt verschiedenster Einflussparameter, Verfahren und Anwendungsbereiche sowie vor dem Hintergrund eines rapiden Marktwachstums in den letzten Jahren problematisch erscheint. Indikativ wird in der entsprechenden Tabelle als Vorlaufzeit für den breiten Einsatz eine Entwicklungszeit bis etwa 2030 angegeben. Da produktionstechnische Gründe eher als energiewirtschaftliche Überlegungen den Einsatz bestimmen, ist die Angabe für beide Szenarien identisch.

**Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der Fokustechnologien im Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien**

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

A: Elektromotoren

Szenarienbereich DE\_80 % bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

Szenarienbereich DE\_95 % bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

B: Große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen

Szenarienbereich DE\_80 % bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

Szenarienbereich DE\_95 % bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

C: Generative Fertigungsverfahren

Szenarienbereich DE\_80 % bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

Szenarienbereich DE\_95 % bis 2020  bis 2030  bis 2040  bis 2050  nach 2050

### 3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Die Forschungs- und Entwicklungsrisiken spiegeln wider, inwieweit die künftig erforderliche Weiterentwicklung der Technologien mit Risiken behaftet ist. Um diese Risiken zu bewerten, werden Entwicklungsstadium, technisch-wirtschaftliche F&E-Risiken sowie Rohstoffrisiken betrachtet.

#### Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Das Entwicklungsstadium der unterschiedlichen Fokustechnologien ist in Tab. 3-2 dargestellt.

Mit Blick auf *Elektromotoren* umfasst der Stand der Technik derzeit erste Modelle der IE4-Klassifizierung. Die Realisierung der IE5-Klassifikation gilt übergreifend über die unterschiedlichen Motortechnologien derzeit noch als schwierig zu realisieren. In etwa lässt sich der derzeitige Entwicklungsstand den Stufen 3 bis 4 zuordnen.

Der Entwicklungsstand der unterschiedlichen *großen industriellen Hochtemperaturwärmepumpen* umfasst aufgrund der unterschiedlichen zugrundeliegenden Komponenten und Funktionsprinzipien ein breiteres Spektrum der TRL-Skala. Insbesondere bei vergleichsweise hohen Vorlaufemperaturen über 160 °C kann eher noch von einem komponentenbezogenen Entwicklungsstand (TRL 3 bis 4) ausgegangen werden. Dies wird für die Einordnung zugrunde gelegt. Demgegenüber werden allerdings Hochtemperaturwärmepumpen bis 100 °C und geringfügig darüber hinaus bereits kommerziell vertrieben (TRL 9), auch wenn heute von keiner breiten Diffusion dieser Wärmepumpen ausgegangen werden kann.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Nach Wolf et al. (2014) wird die Verbreitung von Wärmepumpen in der Industrie als eher gering angesehen. Einerseits wird dies auf die Suche nach geeigneten Wärmequellen und -senken zurückgeführt,



**Tab. 3-2 Einordnung des aktuellen Entwicklungsstadiums der jeweiligen Technologien anhand der dargestellten Entwicklungsziele im Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien**

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	FF A	FF B	FF C
Grundlagenforschung				
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung				
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

Fokusfelder FF A: Elektromotoren, FF B: HT-Wärmepumpen, FF C: Fertigungsverfahren

Eine Einordnung *generativer Fertigungsverfahren* kann ebenfalls relativ heterogen ausfallen und hängt auch stark vom Anwendungsfeld ab. So wird beispielsweise in einer der TRL-Klassifikation ähnlichen Untergliederung des Reifegrades mit 10 Stufen in Peters (2015) für die Automobilindustrie von einem Reifegrad von 4 bis 6, für die Luft- und Raumfahrtindustrie von 5 bis 7, für den Werkzeugbau von 7 bis 9 und für die Medizintechnik von 9 bis 10 ausgegangen. In einigen Branchen, z. B. der Medizintechnik, werden generative Verfahren bereits für die seriennahe individualisierte Produktion eingesetzt, für Anwendungen in anderen Branchen ist eine weitere

andererseits auf die hohen Investitionen. In einer detaillierten Untersuchung von in der Praxis eingesetzten konventionellen Wärmepumpen konnten für 14 Wärmepumpen, die Abwärme als Wärmequelle nutzen, Amortisationszeiten von 2 bis 10 Jahren ermittelt werden. Damit liegen diese Zeiten prinzipiell unterhalb der erwarteten Lebensdauer der Anlagen, allerdings auch über der häufig von Unternehmen geforderten Amortisationsdauer bis zu 3 Jahren.

Verbesserung der Prozessparameter erforderlich. Insgesamt wird indikativ hier die TRL-Stufe 5 angegeben.

### **Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko**

Eine Übersicht der technisch-wirtschaftlichen Risiken, die in Verbindung mit den Fokustechnologien bestehen, gibt Tab. 3-3.

Die Verbesserung der Energieeffizienz von *Elektromotoren* konnte in den vergangenen Jahren durch inkrementelle technologische Optimierung deutlich vorangetrieben werden. Weitere Verbesserungen können durch ähnliche Weiterentwicklungen erreicht werden, wobei das Erreichen der IE5-Klasse zwar generell als herausfordernd gilt, das technische Entwicklungsrisiko allerdings als vergleichsweise gering einzuordnen ist. Mit einem höheren Risiko behaftet ist jedoch das Erreichen der Wirtschaftlichkeit der so entwickelten Lösungen, da die Mehrkosten für den Effizienzgewinn die dadurch erzielten Einsparungen überwiegen müssen und diese Mehrkosten auch vom Markt akzeptiert werden müssen.

Bei der Entwicklung von *großen industriellen Hochtemperaturwärmepumpen* ist angesichts der deutlichen Entwicklungsfortschritte in den letzten Jahren ebenfalls von einem geringen technischen F&E-Risiko auszugehen. Demgegenüber ist festzustellen, dass der Einsatz von Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung in der Industrie im Vergleich zu konventionellen Systemen für die Wärmebereitstellung mit vergleichsweise hohen Investitionen einhergeht. Die derzeitige Nachfrage von Wärmepumpen für industrielle Anwendungen ist zumindest in Deutschland eher mäßig einzuordnen. Entsprechend kann das wirtschaftliche Risiko als hoch eingeordnet werden.

Mit Blick auf *generative Fertigungsverfahren* ist festzuhalten, dass diese bereits in verschiedenen Branchen kommerziell eingesetzt werden. Mit Blick auf das technische Risiko bei einer Fortentwicklung ist daher kaum zu erwarten, dass neue entwickelte Verfahren grundsätzlich nicht einsetzbar sind. Daher wird das technische Risiko analog zu Elektromotoren und Wärmepumpen als gering eingestuft. Da bereits Anlagen kommerziell vertrieben werden und sich die Nachfrage sehr stark entwickelt, wird das wirtschaftliche Risiko bei der Technologiefortentwicklung als eher gering eingestuft.

**Tab. 3-3 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken zum Erreichen der Entwicklungsziele im Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
A: Elektromotoren						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
B: Industrielle Großwärmepumpen						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C: Generative Fertigungsverfahren						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Traditionell wurden bei günstigen *Elektromotoren* mit Permanentmagneten Ferritmagnete eingesetzt. Durch den technologischen Fortschritt und ihre hohe Magnetdichte wurden zunehmend Legierungen auf Basis seltener Erden attraktiv, die sich durch ihre hohe Magnetdichte und ein günstiges Gewichts-Volumenverhältnis bzw. höhere Drehmomente bei gleicher Baugröße auszeichnen. Hierzu zählen Samarium-Kobalt-Verbindungen sowie später verstärkt Neodym-Ferrit-Bor-(NdFeB)-Legierungen (Almeida et al. 2014c) (Tabelle 3-1). Letztere wurden auch deshalb intensiver eingesetzt, um eine Knappheit bei Kobalt zu überwinden (Moss et al. 2013). Daneben kommen auch Dysprosium oder Terbium zum Einsatz, die zur Stabilisierung der magnetischen Eigenschaften bei höheren Temperaturen eingesetzt werden (Almeida et al. 2014c; Moss et al. 2013).

Für 2013 wird der Anteil Chinas am weltweiten Bergbau für die Versorgung mit Seltenerdmetallen mit 96 % angegeben; gleichzeitig ist China mit einem Anteil von 93 % das größte der Raffinadeländer für seltene Erden (DERA 2016). Neodym und Dysprosium werden weitestgehend von China auf den Weltmarkt gebracht und es konnten dort zeitweise deutliche Preisanstiege beobachtet werden (Almeida et al. 2014d). Zwischenzeitlich (Februar 2017) hat sich die Preissituation allerdings zumindest zeitweise entspannt und die Preise liegen deutlich unter dem Preishoch von August 2011: Die Kilogrammpreise von Dysprosium fielen von knapp über 3.000 Dollar auf rund 250 Dollar, die Preise von Neodym von rund 500 auf etwa 50 Dollar pro Kilogramm (Müller 2017). Untersuchungen des Rohstoffbedarfs für ausgewählte Zu-

kunftstechnologien unterstreichen jedoch, dass der Bedarf an seltenen Erden zumindest für diese Anwendungen bis 2035 deutlich steigen wird (DERA 2016).

Strategien für die Verringerung eines Einsatzes von Neodym und Dysprosium liegen im reduzierten Einsatz in Permanentmagnetmotoren, in der Verwendung alternativer magnetischer Materialien oder in der Nutzung alternativer Motortechnologien. Zur Vermeidung wird beispielsweise Dysprosium durch neu entwickelte Produktionsprozesse gezielter eingesetzt, ohne die magnetischen Eigenschaften zu verringern, beispielsweise indem Dysprosium gezielt auf der Oberfläche der Legierung und nicht in der Legierung an sich eingesetzt wird. Als Alternative für bestimmte Anwendungen, aber weniger leistungsfähig, ist auch der Rückgriff auf Materialien mit geringeren Preisanstiegen in der Vergangenheit wie z. B. Samarium-Kobalt (Moss et al. 2013). Gerade dort, wo Platzbedarf oder Gewicht nicht entscheidend sind, können statt hochdichter Materialien auch günstigere Ferritmagnete eingesetzt werden (Almeida et al. 2014d). Beispielsweise berichten Moss et al. (2013) über Forschungsansätze zur Verbesserung der Eigenschaften ferritbasierter Materialien für den Einsatz in der Elektromobilität, allerdings mit unklaren Perspektiven. Als dritte Variante kommt der Rückgriff auf andere Motortechnologien ohne Permanentmagnete wie Induktionsmotoren in Frage. Beispielsweise wird berichtet, dass einige Hersteller in der Lage sind, durch den Einsatz innovativer Rotor- und Statorgeometrien auch kostengünstige Ferritlösungen einzusetzen, die ähnliche Leistungsparameter wie teurere Permanentmagnetmotoren aufweisen (Almeida et al. 2014c).

Mit Blick auf den Einsatz kritischer Rohstoffe konnten für *große industrielle Wärmepumpen* an sich keine auffälligen Kritikalitäten identifiziert werden. Zu beachten sind aber etwaige Wirkungen der Komponenten (z. B. die bereits genannte Problematik bei Elektromotoren). Für *generative Fertigungsverfahren* liegen ebenfalls keine spezifischen Erkenntnisse vor.

**Tabelle 3-1 Auswahl kritischer Rohstoffe in Verbindung mit Hochleistungspermanentmagnetmaterialien bei Elektromotoren**

Kritischer Rohstoff	Substitutionsmöglichkeit	Rezyklierbarkeit
Neodym	Entwicklung von Hochleistungs-Permanentmagneten mit vergleichbaren Eigenschaften zu NdFeB-Magneten unter Verzicht auf seltene Erden auf absehbare Zeit als schwierig eingeschätzt (DERA 2016); abhängig von den technologischen Anforderungen ggf. Einsatz alternativer Motortechnologien oder Weiterentwicklung des Motordesigns	Derzeit keine getrennte Sammlung von NdFeB-Magneten in Deutschland, da in Europa Recyclinganlagen nicht vorhanden sind; Weiterentwicklung des Know-hows und Schaffung von Sammelinfrastuktur wird als Voraussetzung für Recycling genannt (DERA 2016).
Dysprosium		
Terbium		

## 4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

### 4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Das Kriterium soll eine Einschätzung vermitteln, wie sich die künftige Nachfrage im betrachteten Technologiefeld entwickeln wird, wenn alle Kunden im Rahmen ihrer Kaufkraft ihren Bedarf decken würden. Es untergliedert sich in das globale und das nationale Potenzial. Beide Größen werden jeweils so quantifiziert, dass der Energieverbrauch sowie die installierte Leistung der jeweiligen Technologien einmal in absoluten Größen dargestellt wird sowie die Veränderungen dieser Größen in einzelnen Zeiträumen unter Berücksichtigung des Ersatzbedarfes.

#### Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

Die Ermittlung des globalen Potenzials für *Elektromotoren* erfolgt ausgehend von Angaben zur Energienachfrage der Motoren. Auf Basis der in Kapitel 1.4 dargestellten Szenarien lassen sich Angaben zur Energienachfrage der Motoren nur auf Basis weniger Szenarien aufschlüsseln. Für die Angaben im internationalen Umfeld werden in Tab. 4-1 Angaben für die weltweite Energienachfrage aus IEA (2016c) für die Referenz sowie das 2 °C-Szenario übernommen und – da nur Angaben aus einer Quelle vorliegen – diese Angaben nicht als Bandbreite ausgewiesen. Zur komplementären Angabe der installierten Leistung wurden gemittelte Angaben zu durchschnittlichen Betriebsstunden nach Plötz und Eichhammer (2011) in Höhe von 3.200 Volllaststunden angenommen und die daraus resultierenden Werte gerundet. Bei der Ausweisung handelt es sich um Angaben aus Sicht einer Bestands- bzw. Energieverbrauchsperspektive.

**Tab. 4-1 Weltweit überschlägig installierte Leistung von Elektromotoren (GW) und auf diese Motoren zurückgehende Energieverbräuche (TWh) in den jeweiligen Jahren**

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C
	GW	TWh	GW	TWh	GW / TWh
2014	1.900	6.000	1.900	6.000	k.A.
2020	2.500	8.000	2.100	6.700	k.A.
2030	2.800	9.000	2.400	7.800	k.A.
2040	3.400	10.800	2.700	8.600	k.A.
2050	3.900	12.600	3.000	9.700	k.A.

Die globalen Marktpotenziale werden in Tab. 4-2 angegeben. Die dort genannte neue installierte Leistung umfasst den Zubau in der jeweiligen Periode, also beispielsweise für die Periode 2014 bis 2020 die Differenz zwischen den Werten von 2020 und 2014, sowie den Ersatzbedarf für Bestandsanlagen. Hier wird also im Gegensatz zu vorher eine absatzorientierte Perspektive für die jeweiligen Perioden angenommen. Hinsicht des Ersatzbedarfes wird näherungsweise die oben genannte durchschnittli-

che Lebensdauer von 15 Jahren zugrunde gelegt und anteilig für die Periodendauer der Ersatzbedarf im mittleren Anlagenbestand der Periode ermittelt. Daneben wird der mit der neu installierten Leistung einhergehende Energiebedarf dargestellt. Hinsichtlich der installierten Leistung wurden wie oben 3.200 Volllaststunden zugrunde gelegt und die Werte auf zwei Vorkommastellen gerundet. Ferner wird auf Basis der in Tab. 2-2 genannten Preise ein überschlägiges Marktpotenzial für die neu installierte Leistung in Euro ausgewiesen.

Da gemäß der methodischen Vorgaben hier auf Basis von Energieverbräuchen bzw. installierten Leistungen gerechnet wird, fällt das globale Potenzial im ambitionierten Szenario kleiner als im Referenzszenario aus. Bei einer Betrachtung in Stückzahlen wird der Unterschied jedoch kleiner ausfallen, da nicht per se weniger, sondern prinzipiell nur effizientere und - sofern Effizienzmaßnahmen der angrenzenden Systeme ausgeschöpft werden - auch leistungsschwächere Motoren installiert werden. Das monetär ausgewiesene Potenzial liegt mit durchschnittlich 28 Mrd. Euro pro Jahr in einer ähnlichen Größenordnung wie die Angaben gemäß Plötz und Eichhammer (2011), die eine Weltmarktgröße von rund 35 Mrd. Dollar für 2010 angeben.

**Tab. 4-2 Weltweite überschlägige Marktpotenziale von Elektromotoren ausgedrückt als installierte Leistung unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz (GW), der jährlichen Energieverbräuche dieser Anlagen (TWh) sowie des für sie notwendigen Investitionsbedarfs (Mrd. Euro)**

Periode	Referenz (BAU)			Szenarienbereich INT_2°C			Szenarienbereich INT_besser_2°C
	GW	TWh	Mrd. Euro	GW	TWh	Mrd. Euro	GW/TWh/Mrd. Euro
2014-2020	1.700	5.300	190	1.200	3.700	130	k.A.
2021-2030	2.100	6.700	230	1.800	5.900	200	k.A.
2031-2040	2.600	8.400	290	2.000	6.300	220	k.A.
2041-2050	3.000	9.600	310	2.300	7.200	240	k.A.

Die Ermittlung der internationalen Potenziale für *industrielle Wärmepumpen* beruht als Näherung auf einer Hochrechnung der später dargestellten nationalen Potenziale Deutschlands, da in den betrachteten internationalen Szenarien keine Detailangaben zur Entwicklung industrieller Wärmepumpen vorliegen. Zur Abschätzung der internationalen Potenziale wurden die Zahlen aus der nationalen Analyse für den internationalen Markt anhand des industriellen Endenergieverbrauchs Deutschlands (industrieller Endenergieverbrauch ca. 707 TWh für 2014 gemäß AGEB 2016) auf das internationale Umfeld (ca. 40.565 TWh gemäß IEA 2016b) hochskaliert. Zu beachten ist, dass unter anderem dadurch vereinfachend implizit eine weltweit zur deutschen Industrie ähnliche Industriestruktur, ein ähnliches Diffusionsverhalten und ähnliche Preise unterstellt werden. Die daraus resultierenden Angaben für industrielle Wärmepumpen sind in Tab. 4-3 und Tab. 4-4 dargestellt.

**Tab. 4-3 Weltweit überschlägig installierte thermische Ausgangsleistung industrieller Wärmepumpen (GW) und durch diese Wärmepumpen bereitgestellte thermische Energiemenge (TWh) in den jeweiligen Jahren (3.500 Volllaststunden pro Jahr)**

Jahr	Referenz (BAU)	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
		GW	TWh	GW	TWh
Einheit	GW / TWh	GW	TWh	GW	TWh
2014	k.A.	20	70	20	70
2020	k.A.	40	130	90	300
2030	k.A.	110	400	370	1.300
2040	k.A.	190	660	770	2.700
2050	k.A.	280	1.000	1.200	4.300

**Tab. 4-4 Weltweite überschlägige Marktpotenziale industrieller Wärmepumpen ausgedrückt als installierte Leistung unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz (GW), durch diese Anlagen bedingte Änderung der bereitgestellten thermischen Ausgangsleistung (TWh) sowie als Investitionsbedarf (Mrd. Euro) in den jeweiligen Perioden**

Periode	Referenz (BAU)	Szenarienbereich INT_2°C			Szenarienbereich INT_besser_2°C		
		GW	TWh	Mrd. Euro	GW	TWh	Mrd. Euro
Einheit	GW / TWh / Mrd. Euro	GW	TWh	Mrd. Euro	GW	TWh	Mrd. Euro
2014-2020	k.A.	20	60	6	60	230	11
2021-2030	k.A.	100	340	23	310	1.090	63
2031-2040	k.A.	130	450	29	600	2.090	120
2041-2050	k.A.	210	730	40	880	3.100	172

Mit Blick auf *generative Fertigungsverfahren* weisen Marktforschungsdaten das weltweite Marktvolumen 2013 anwenderseitig mit schätzungsweise 3 Mrd. US-Dollar aus, wobei davon ungefähr eine Hälfte auf Güter wie Anlagen, Material und Zubehör entfällt und die andere Hälfte auf Dienstleistungen, die sich auf generative Verfahren beziehen. Für den Zehn-Jahres-Zeitraum von 2004 bis 2013 entspricht dies einer mittleren jährlichen Wachstumsrate von 17,7 %. Perspektivisch wird für 2020 ein Umsatz in Höhe von 21 Mrd. US-Dollar prognostiziert; dies entspräche einem mittleren jährlichen Wachstum von 31,6 % im Zeitraum 2013 bis 2020. Kenntnisse zu anwenderseitigen Umsätzen mit additiv gefertigten Produkten liegen nicht vor (EFI 2015).

Durchgängige und umfassende quantitative Analysen zu Marktpotenzialen im Sinne installierter Leistungen oder des Energieverbrauchs, zu Emissionsminderungen und zu Energieeinsparungen für generative Fertigungsverfahren liegen derzeit nicht vor. Auch Untersuchungen für einzelne Branchen bzw. Technologien (z. B. Huang et al.

2016, Hettesheimer et al. 2016) sind bereits komplex, da zahlreiche Einflussfaktoren mit großen Unsicherheiten berücksichtigt werden müssen. Daher werden die Kriterien 3 bis 6 für generative Fertigungsverfahren nicht ausgewiesen.

### Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

Angaben zu nationalen Potenzialen für *Elektromotoren* sind wie bei den internationalen Potenzialen nur in wenigen Quellen verfügbar. Die Angaben zum nationalen Potenzial gemäß Tab. 4-5 erfolgen auf Basis des Zielszenarios von Prognos et al. (2014). Die Werte lassen sich dem 80 %-Treibhausgas-Minderungsziel zuordnen. Darüber hinausgehende Angaben für das 95 %-Ziel sind nicht verfügbar. Die Angaben für das Jahr 2014 sind Rohde (2016) entnommen. Auf Basis dieser Daten wird zur Ermittlung des in Tab. 4-6 dargestellten nationalen Marktpotenzials analog wie beim internationalen Potenzial vorgegangen.

**Tab. 4-5** Angaben zu deutschlandweit überschlägiger installierter Leistung (GW) und Energieverbrauch (TWh) durch Elektromotoren

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %
	GW	TWh	GW / TWh
2014	50	159	k.A.
2020	44	140	k.A.
2030	41	130	k.A.
2040	37	118	k.A.
2050	33	107	k.A.

**Tab. 4-6** Nationale überschlägige Marktpotenziale von Elektromotoren ausgedrückt als installierte Leistung unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz (GW), des jährlichen Energieverbrauchs dieser Anlagen (TWh) sowie als Investitionsbedarf (Mrd. Euro) in den jeweiligen Perioden

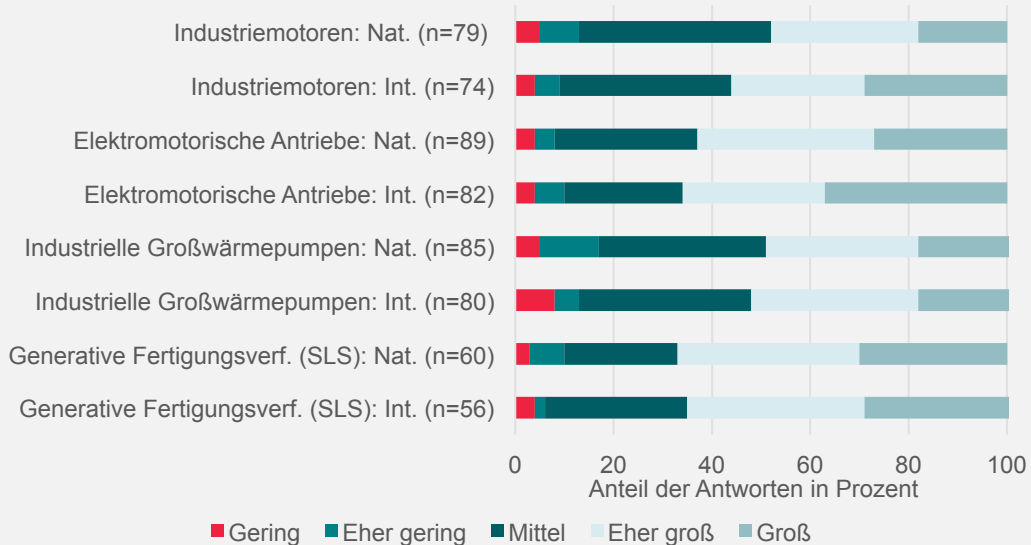
Periode	Szenarienbereich DE_80 %			Szenarienbereich DE_95 %
	GW	TWh	Mrd. Euro	GW / TWh / Mrd. Euro
2014-2020	16	51	1,8	k.A.
2021-2030	25	80	2,8	k.A.
2031-2040	22	71	2,4	k.A.
2041-2050	20	64	2,1	k.A.



**Exkurs: Einschätzung zu den nationalen und internationalen Marktpotenzialen innerhalb der Forschungsnetzwerke Energie**

Im Frühjahr 2017 wurden unabhängig von der vorliegenden Analyse die Teilnehmer der Forschungsnetzwerke Energie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter anderem zu ihrer Einschätzung zu Marktpotenzialen und öffentlichem Förderbedarf befragt (ifo Institut 2017). Abgedeckt wurden diverse Technologien in verschiedenen Technologiebereichen. Im Bereich „Energieeffiziente Querschnittstechnologien in Industrieverfahren“ umfassen die Technologien als eng mit den Fokustechnologien verwandte Bereiche „Industrielle Großwärmepumpen“, „Industriemotoren“, „Elektromotorische Antriebe“ sowie „Generative Fertigungsverfahren (SLS)“.

Die Teilnehmer der Umfrage wurden um Einschätzungen zu nationalen und internationalen Marktpotenzialen („Wie schätzen Sie das künftige nationale und internationale Marktpotenzial der nachfolgenden Technologien ein?“) anhand einer qualitativen Fünf-Punkte-Skala („gering“ bis „hoch“) gebeten. Insgesamt haben an der Befragung 760 Mitglieder der Netzwerke teilgenommen, wobei jeder Teilnehmer nur für einen Teil der Technologien eine Einschätzung abgegeben hat. Die Zahlen schwanken daher zwischen 56 und 89 Antworten je Frage.



Generell ist zu beobachten, dass die Marktpotenziale für die betrachteten Technologien insgesamt als eher groß bzw. groß wahrgenommen werden. Mit Blick auf eine Unterscheidung der Einschätzungen zu den nationalen und internationalen Marktpotenzialen innerhalb der Technologien sind nur relativ geringe Unterschiede zu beobachten. Da eine qualitative Einordnung von Potenzialen für mehrere Technologien vorgenommen wurde, ist weiterhin ein Vergleich der Technologien untereinander naheliegend. Dabei zeigt sich, dass die Potenzialschätzung für elektromotorische Antriebe gegenüber Industriemotoren positiver ausfällt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Teilnehmer ein höheres Potenzial bei den Antrieben in ihrer Gesamtheit als allein bei Motoren sehen. Die Einschätzungen zu den Potenzialen für Wärmepumpen fallen ähnlich zur Einschätzung für Elektromotoren aus. Die Potenzialangaben für generative Fertigungsverfahren spiegeln wiederum ein ähnliches bzw. auch geringfügig höheres Potenzial als bei elektromotorischen Antrieben wider.

Für den Bereich der *industriellen Wärmepumpen* wurde auf Basis der Angaben in Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015) die Mengen an bereitgestellter thermischer Energie durch industrielle Wärmepumpen sowie die dafür notwendige installierte Leistung anhand der methodischen Vorgaben ermittelt. Dabei wurde ergänzend zu den Angaben in der genannten Quelle unterstellt, dass über die dort betrachteten 140 °C hinaus längerfristig auch ein Teil des Temperaturbereichs bis 200 °C durch Wärmepumpen abgedeckt werden kann. Die Zielwerte für das Jahr 2050 für die Durchdringung der Wärmepumpen wurden aus der Quelle übernommen und anteilig auf die Vorjahre umgelegt. Ferner waren zur Ermittlung der installierten Leistung Annahmen zu den Volllaststunden notwendig. Diese werden sich in Abhängigkeit des Anwendungsfalls voraussichtlich deutlich unterscheiden. Für die hier betrachteten großen Wärmepumpen wurden im Schnitt 3.500 Stunden unterstellt. Aus diesen Zahlen lassen sich in Verbindung mit der durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren die in Tab. 4-7 dargestellten Werte für industrielle Wärmepumpen und die in Tab. 4-8 dargestellten Marktpotenziale ableiten.

**Tab. 4-7 National überschlägig installierte thermische Ausgangsleistung industrieller Wärmepumpen (GW) und durch diese Wärmepumpen bereitgestellte thermische Energiemenge (TWh) in den jeweiligen Jahren**

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GW	TWh	GW	TWh
2014	0,3	1,2	0,3	1,2
2020	0,7	2,3	1,5	5,2
2030	2	6,9	6,4	22,4
2040	3,3	11,5	13,4	46,8
2050	4,9	17,3	221,4	74,8

**Tab. 4-8 Nationale überschlägige Marktpotenziale für industrielle Wärmepumpen unter Berücksichtigung von Zubau und Ersatz in unterschiedlichen Perioden**

Periode	Szenarienbereich DE_80 %			Szenarienbereich DE_95 %		
	GW	TWh	Mrd. Euro	GW	TWh	Mrd. Euro
2014-2020	0,3	1,1	0,1	1,1	4	0,2
2021-2030	1,7	5,9	0,4	5,4	19	1,1
2031-2040	2,3	7,9	0,5	10,4	36,4	2,1
2041-2050	3,6	12,7	0,7	15,4	54	3

Aus den zuvor dargestellten Angaben lassen sich die in Tab. 4-9 genannten durchschnittlichen Wachstumsraten für die internationale und nationale Entwicklung er-

mitteln. Da das internationale Potenzial für Wärmepumpen aus dem nationalen Potenzial hochskaliert ist, sind die Wachstumsraten im nationalen und internationalen Bereich identisch. Auffällig ist das besonders hohe Wachstum bei Wärmepumpen, dass insbesondere darauf zurückzuführen ist, dass der Bestand großer industrieller Wärmepumpen zu Beginn der Betrachtung sehr gering ist.

**Tab. 4-9 Ermittlung der Wachstumsrate für die installierte Leistung im Bestand der Fokustechnologien im Zeitraum 2014-2050**

Technologie	Szenario	CAGR
A: Elektromotoren	International / BAU	2,0 % / Jahr
	International / INT_2°C	1,3 % / Jahr
	National / DE_80 %	-0,9 % / Jahr
B: Wärmepumpen	International / INT_2°C bzw. National / DE_80 %	8,1 % / Jahr
	International / INT_besser_2°C bzw. National / DE_95 %	12,6 % / Jahr

## 4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen

Ziel des Kriteriums ist es, Minderungen bei klimawirksamen und sonstigen Emissionen durch den Einsatz der verbesserten Technologien zu ermitteln.

### Teilkriterium 4.1 Vermiedene Treibhausgas-Emissionen

Zur Ermittlung der reduzierten Treibhausgasemissionen durch *hocheffiziente Elektromotoren* liegen in den Szenarien keine Angaben dazu vor, inwieweit der veränderte Energieverbrauch auf Änderungen der Aktivitätsgrößen, sprich der Anzahl und Nutzung der eingesetzten Elektromotoren, zurückzuführen ist, wie stark Effizienzverbesserungen am Motor an sich ausschlaggebend sind und inwieweit Verbesserungen elektromotorischer Gesamtsysteme relevant sind.

Da im vorliegenden Fall nur die Verbesserung der Motoren an sich betrachtet wird, sind weitergehende Annahmen zum Beitrag weiterentwickelter Motoren zu treffen. Der Methodik folgend ist bei Effizienztechnologien die Verbesserung gegenüber dem durchschnittlichen Anlagenbestand anzugeben. Wie Angaben zur Durchdringung effizienter Motoren in CEMEP (2010) zeigen, sind IE1-Motoren insbesondere ab dem Jahr 2000 auf den europäischen Markt gelangt. Gleichmaßen sind die politischen Vorgaben zum Einsatz von IE2 bzw. noch effizienteren Motoren seit einiger Zeit in Kraft. Auf Basis dieser Angaben in Verbindung mit Annahmen zur Lebensdauer sowie unter Zugrundelegung künftiger Mindeststandards bei Elektromotoren lässt sich ein Bestandsmodell entwickeln, dessen Ergebnisse in Tab. 4-10 zusammengefasst sind. Diese Angaben dienen als Grundlage für die Bewertung der Kriterien 4 bis 6. Durch die Bestandsumwälzung verändert sich der durchschnittliche Wirkungsgrad der Motoren im Gesamtbestand unter den genannten Annahmen von durchschnittlich 89,9 im Jahr 2014 auf 95,4 Prozent im Jahr 2050.

**Tab. 4-10 Durchdringung der Motorenklassen im deutschen Motorenbestand**

Klasse	2014	2020	2030	2040	2050
Unter IE1	10 %	1 %	0 %	0 %	0 %
IE1	63 %	36 %	0 %	0 %	0 %
IE2	27 %	40 %	15 %	0 %	0 %
IE3	0 %	23 %	44 %	0 %	0 %
IE4	0 %	0 %	41 %	59 %	0 %
IE5	0 %	0 %	0 %	41 %	100 %

Ermittlung auf Basis eines Bestandsmodells u. a. mit Daten von CEMEP (2010) zur Marktentwicklung zwischen 1998 und 2009, unter Berücksichtigung der Vorgaben der VO 640/2009, unter der Annahme einer Einführung aktualisierter Mindeststandards auf IE4- und IE5-Niveau in den Jahren 2025 bzw. 2035, konstanter Verkaufszahlen sowie einer einheitlichen Lebensdauer von 15 Jahren.

Unter Berücksichtigung der methodisch festgelegten Emissionsfaktoren für konventionellen Strom ergeben sich mit Blick auf die Minderungen von Kohlendioxidemissionen im konventionellen Kraftwerkspark durch Stromeinsparungen von hocheffizienten Elektromotoren gegenüber dem Bestandsdurchschnitt von 2015 als Referenztechnologie die in Tab. 4-11 dargestellten Werte.

**Tab. 4-11 Im jeweiligen Jahr vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Verbesserung von Elektromotoren in Deutschland im Vergleich zur Fortschreibung des Bestands mit der Zusammensetzung von 2014**

Mio. t CO <sub>2</sub> -äq./Jahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	1,62	k.A.
2030	4,21	k.A.
2040	5,32	k.A.
2050	5,38	k.A.

Die breite Nutzung *großer industrieller Wärmepumpen* ist im Vergleich zu Elektromotoren zurzeit noch auf ein relativ kleines Marktsegment beschränkt. Zur Ermittlung der reduzierten Treibhausgasemissionen bietet es sich deshalb an, im Vergleich zu Elektromotoren nicht gegen den Anlagenbestand zu rechnen, sondern gegen konventionelle Technologien der Wärmebereitstellung. Diese können je nach abgedeckter Temperatur der Wärmesenke u. a. Fernwärme, Gaskessel oder Dampferzeuger umfassen. Effizienz und Kosten der Energiebereitstellung vor Ort hängen unter anderem auch davon ab, inwieweit das Heizsystem zentral oder dezentral vor Ort betrieben wird.

Für die Ermittlung der Auswirkungen der Wärmepumpen auf die Emissionsbilanz ist einerseits zu bestimmen, inwieweit durch den Ersatz des konventionellen Systems

eine Emissionsminderung erreicht wird. Dem sind die zusätzlichen Emissionen durch den Einsatz der Wärmepumpe gegenüberzustellen. Zur Bestimmung des Emissionsniveaus wird als Referenz ein Gas-Kessel mit einer thermischen Effizienz von 90 % und Investitionen in Höhe von 120 €/kW<sub>th</sub>, ein Emissionsfaktor von rund 0,2 kg CO<sub>2</sub>/kWh Erdgas (UBA 2017) sowie ein Primärenergiefaktor für Erdgas von 1,1 zu Grunde gelegt. Mit Blick auf das Emissionsniveau der Wärmepumpen wird davon ausgegangen, dass diese je zur Hälfte mit den in Tab. 2-3 genannten Leistungszahlen elektrisch und als thermische Anlagen (z. B. durch Abwärme) ohne nennenswerte elektrische Leistungsaufnahme betrieben werden. Unter diesen Annahmen ergeben sich die in Tab. 4-12 gezeigten Einsparungen.<sup>4</sup>

**Tab. 4-12 Im jeweiligen Jahr vermiedene Treibhausgasemissionen durch den Ersatz konventioneller Brennertechnik durch industrielle Wärmepumpen in Deutschland**

Mio. t CO <sub>2</sub> -äq./Jahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	0,2	0,4
2030	0,6	2,1
2040	1,1	5,2
2050	1,8	9,1

#### Teilkriterium 4.2 Vermiedene oder gestiegene andere Emissionen

Da *Elektromotoren* durch Strom betrieben werden, sind Änderungen bei anderen Schadstoffemissionen nur mittelbar durch Emissionsänderungen im Kraftwerkspark relevant. Ähnliches gilt für die *Wärmepumpen*. Hier ergeben sich die Emissionsminderungen durch die Substitution konventioneller Brennertechnik; entsprechend ändern sich gegebenenfalls auch sonstige am Ort der Energiebereitstellung anfallende Emissionen.

#### 4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Anhand des hier betrachteten Kriteriums sollen die Primärenergieeinsparungen<sup>5</sup> gegenüber den Referenztechnologien sowie weitere wichtige Beiträge zur Ressourceneffizienz angegeben werden.

<sup>4</sup> Mit Blick auf die Einsparungen ist zu beachten, dass im Rahmen der methodischen Vorgaben bei Energieeinsparungen der Emissionsfaktor von konventionellem Strom mit einem Wert im Bereich von 800 bis 900 g CO<sub>2</sub>/kWh anzusetzen ist. Für den Mehrverbrauch durch elektrisch betriebene Wärmepumpen muss aus Konsistenzgründen der gleiche Emissionsfaktor genutzt werden. Legt man weiterhin ein gasbetriebenes Heizsystem mit einem Emissionsfaktor von rund 200 g CO<sub>2</sub>/kWh zugrunde, so erschließt sich, dass elektrisch betriebene Wärmepumpen überhaupt erst zu einer Emissionsminderung führen würden, wenn deren Leistungszahl einen Wert von 4 erreicht. Während der hohe Emissionsfaktor für Strom so zu einer Ausweisung vergleichsweise hoher Emissionsminderungen bei Elektromotoren führt, fallen die Einsparungen bei Wärmepumpen niedrig aus.

<sup>5</sup> Primärenergiefaktor Strom gemäß vorgegebener Methodik (*Teilbericht 1*), Emissionsfaktor Gas ergänzend 1,1.

Die Reduzierung des Primärenergieeinsatzes für *Elektromotoren* auf Basis der im vorhergehenden Kriterium beschriebenen Annahmen zeigt Tab. 4-13. Die analogen Angaben für *industrielle Wärmepumpen* sind in Tab. 4-14 angegeben.

**Tab. 4-13** Im jeweiligen Jahr vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Verbesserung von Elektromotoren in Deutschland im Vergleich zur Fortschreibung des Bestands mit der Zusammensetzung von 2014

PJ/Jahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	18,4	k.A.
2030	47,7	k.A.
2040	60,6	k.A.
2050	61,4	k.A.

**Tab. 4-14** Im jeweiligen Jahr vermiedener Primärenergieeinsatz durch den Ersatz konventioneller Brennertechnik durch industrielle Wärmepumpen in Deutschland

PJ/Jahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	1,7	4
2030	5,5	18,3
2040	9,4	40,4
2050	14,5	67,1

Mit Blick auf eine Änderung der Ressourceneffizienz sind für *Elektromotoren* und *industrielle Wärmepumpen* keine wesentlichen Anmerkungen zu treffen. Für Motoren gelten jedoch mit Blick auf Permanentmagnetmotoren die in Kapitel 3.2 (Teilkriterium 2.3) stehenden Hinweise zum Einsatz seltener Erden.

#### 4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Durch das Kriterium Kosteneffizienz werden die systemanalytischen Kostenersparnisse oder Mehrkosten im Vergleich zur Referenztechnologie ermittelt.

**Tab. 4-15 Direkte jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Verbesserung von Elektromotoren in Deutschland im Vergleich zur Fortschreibung des Bestands mit der Zusammensetzung von 2014**

Mio. Euro <sub>2015</sub> /Jahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	32	k.A.
2030	70	k.A.
2040	104	k.A.
2050	109	k.A.

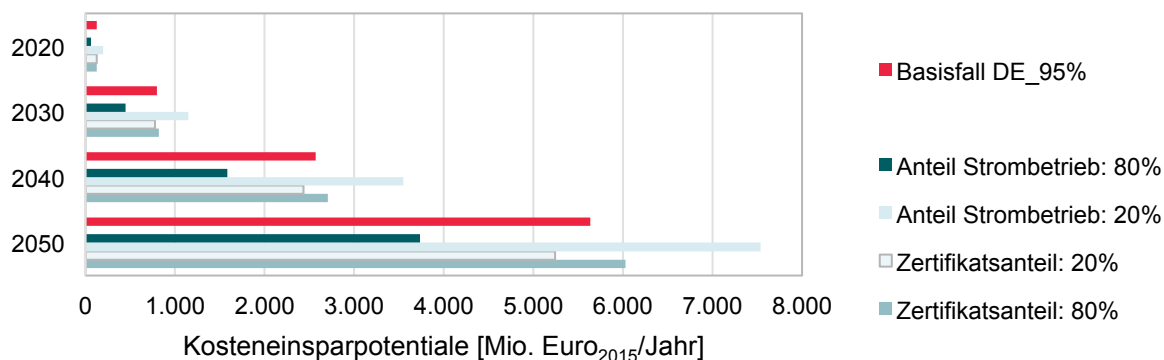
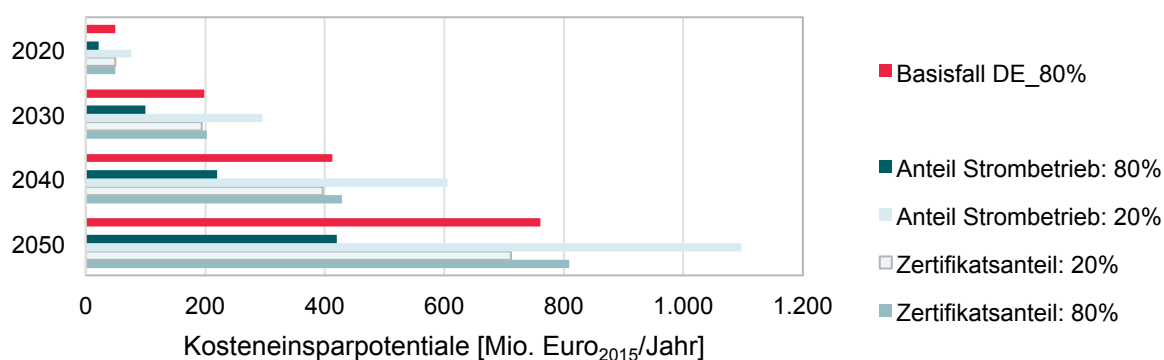
Verallgemeinerte Schätzungen der zusätzlichen Investitionen für Änderungen der Effizienzklassen bei *Elektromotoren* sind generell schwierig und unter anderem auch von der Motortechnologie und der Leistung abhängig (z. B. Almeida et al. 2014e). In der Betrachtung in Almeida et al. (2008b) wird beispielsweise von den Übergang von IE1 zu IE2 bzw. von IE2 zu IE3 für einen 1,1 kW-Motor einer Preiserhöhung von 30 % bzw. 23 % und für einen 110 kW-Motor analog von 20 % bzw. 17 % ausgegangen. Für die Betrachtung der Kosteneffizienz wird hier angenommen, dass mit jedem Klassensprung der Motoren diese im Schnitt 15 % teurer als ein Motor gleicher Leistung der nächsten niedrigeren Klasse ist, da hier auch noch längerfristige Kostensenkungen durch Verbesserungen der Technologie angenommen werden. Weiterhin ist es notwendig, im Referenzfall durch die geringere durchschnittliche Effizienz der Motoren eine höhere Eingangsleistung zu installieren. Dies wird bei der Berechnung der zusätzlichen Investitionen ebenfalls berücksichtigt. Mit Blick auf die jährlichen variablen Kosten sind insbesondere die Energieeinsparungen für die Motoren zu berücksichtigen. Als Industriestrompreise werden hier die Industriestrompreise gemäß KS80-Szenario zuzüglich Netzentgelte für die Mittelspannung zugrunde gelegt. Der Strompreis beträgt damit in 2014 im Schnitt 9,9 ct/kWh und 18,5 ct/kWh in 2050. Die auf dieser Grundlage ermittelten Kosteneinsparungen sind in Tab. 4-15 dargestellt.

Für die Betrachtung der *Wärmepumpen* werden die in Tab. 2-3 dargelegten Annahmen zur Preisentwicklung zugrunde gelegt und die Strompreise von oben übernommen. Für den Vergleich mit der Referenztechnologie wird näherungsweise ein durchschnittlicher Gaspreis in Höhe von ein Drittel des Strompreises unterstellt. Durch den Ersatz konventioneller Brennertechnik können Minderungen des Emissionsniveaus erreicht werden, die je nach Größe der lokal installierten Leistungen der Feuerungsanlagen und der künftigen Entwicklung der Rahmenbedingungen dem Emissionshandel unterliegen. Um dies zu berücksichtigen wird für die Analyse der Kosteneinsparpotenziale angenommen, dass die Hälfte der installierten Wärmepumpenleistung emissionshandelspflichtige Brenneranlagen ersetzt. Die daraus resultierenden Kosteneinsparpotenziale zeigt Tab. 4-16.

**Tab. 4-16 Direkte jährliche Kosteneinsparpotenziale durch den Einsatz von Wärmepumpen (50 % elektrisch / 50 % thermisch angetrieben) in Deutschland im Vergleich zur Referenztechnologie Gaskessel (Anteil zertifikatshandelspflichtiger Anlagen: 50 %)**

Mio. Euro <sub>2015</sub> /Jahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	50	130
2030	190	780
2040	400	2.400
2050	710	5.200

Die genannten Zahlen für Wärmepumpen variieren deutlich mit den jeweils zugrundeliegenden Rahmenannahmen, insbesondere mit Blick auf den Anteil der Wärmepumpen, die elektrisch betrieben werden. Abb. 4-2 zeigt daher neben dem in Tab. 4-16 aufgelisteten Basisfall die bei einer Variation des Anteils strombetriebener Wärmepumpen sowie der durch den Emissionshandel abgedeckten Referenzsysteme resultierenden Kosteneinsparpotenziale.



**Abb. 4-1 Sensitivitätsdarstellung für die jährlichen Kosteneinsparpotenziale durch den Einsatz von Wärmepumpen im DE\_80 %-Szenario (oben) und DE\_95 %-Szenario (unten) bei Variation des Anteils strombetriebener Wärmepumpen sowie des Anteils konventioneller Brenneranlagen, die dem Emissionshandel unterliegen**



Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für *generative Fertigungsverfahren* und daraus abgeleitete Aussagen sind sehr schwierig zu treffen, da im Unterschied zu anderen betrachteten Technologien die Wirtschaftlichkeit nicht von einem relativ homogenen Input bzw. Output abhängt, sondern mit generativen Verfahren eine ganze Palette unterschiedlichster Produkte hergestellt werden kann, die wiederum sehr unterschiedliche Erlöse erzielen können. Dabei hängt die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gegenüber konkurrierenden Verfahren unter anderem von den Stückzahlen ab, in denen die jeweiligen Produkte gefertigt werden (z. B. VDI 2014a).

Hinsichtlich externer Kosten liegen für die drei betrachteten Fokustechnologien keine Erkenntnisse vor.

#### 4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Anhand der inländischen Wertschöpfung soll bewertet werden, inwieweit der Ausbau des betrachteten Technologiefelds zur Entwicklung der inländischen Wertschöpfung beitragen kann.

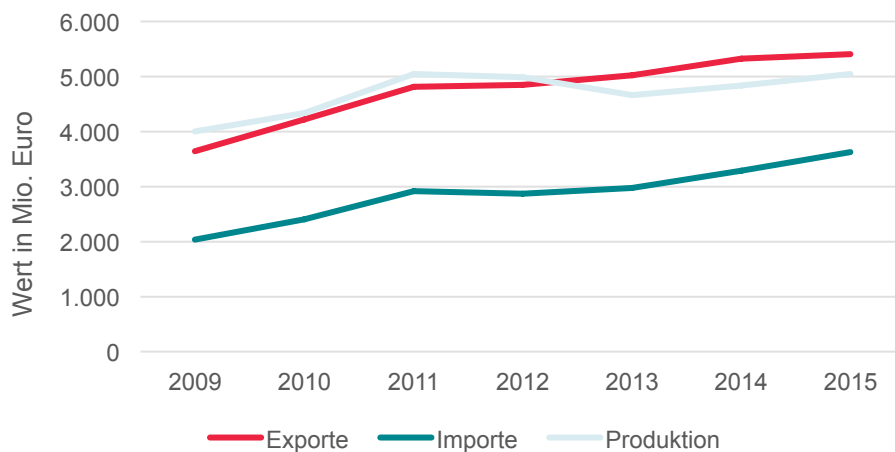
Der Markt für die „Energieeffizienzbranche“ im Allgemeinen wird für Deutschland im Jahr 2015 in DENEFF 2016 grob auf rund 135 Mrd. Euro Umsatz mit 535.000 Beschäftigten beziffert, wobei dem Bereich Energieeffizienz ein überdurchschnittliches Wachstum gegenüber anderen Geschäftsfeldern zugeschrieben wird. Der Anteil des innerhalb des deutschen Bundesgebiets erwirtschafteten Umsatzes der Branche im Zeitraum 2015 bis 2020 beträgt Prognosen zufolge 80 bis 90 % (DENEFF 2016).

Eine eingehende Quantifizierung der inländischen Wertschöpfung durch energieeffiziente Technologien im Allgemeinen und industrielle Querschnittstechnologien im Besonderen ist herausfordernd. Dies ist dadurch begründet, dass energieeffiziente Anwendungstechnologien in der Regel nicht für eine Einsparung an Energie bzw. zur Verbesserung der Energieeffizienz an sich beschafft werden, sondern um bestimmte andere Dienstleistungen zu erbringen, die möglichst energieeffizient bereitgestellt werden sollen. Damit sind sie anders einzuordnen als viele Technologien der Energiebereitstellung, die primär auf die Bereitstellung von Energie ausgerichtet sind. Entsprechend schwierig ist die Differenzierung, inwieweit ein Anteil des Umsatzes auf die Verbesserung der Energieeffizienz an sich zurückzuführen ist und wie viel davon letztlich auf die Technologie entfällt. Bei einer weitergehenden Betrachtung der Wertschöpfung müssen zudem noch Aufwendungen für Vorleistungen berücksichtigt werden. Eine eingehende Analyse hierzu ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

Um eine generelle Orientierung zu bieten, lassen sich der PRODCOM-Datenbank<sup>6</sup> einige Hinweise zu Produktion, Exporten und Importen für Deutschland entnehmen. Abb. 4-2 gibt einen Eindruck zur generellen Struktur der Wertschöpfung für *Elektromotoren*. In Summe über alle Motorklassen<sup>7</sup> hinweg beläuft sich in 2015 den Angaben zufolge wertmäßig die gesamte Produktion auf rund 5 Mrd. Euro bei Exporten von etwa 5,4 Mrd. Euro und Importen in Höhe von circa 3,6 Mrd. Euro.

<sup>6</sup> Die PRODCOM-Datenbank (<http://ec.europa.eu/eurostat/de/web/prodcom>) ist eine europäische Datenbank mit Produktionsdaten für rund 3.900 Kategorien unterschiedlichster Güter.

<sup>7</sup> Im Detail wurden hier die Produktcodes 27111010 bis 27112590 zusammengefasst. Die Produktcodes für Gleichstrommotoren umfassen dabei neben Motoren auch Generatoren.



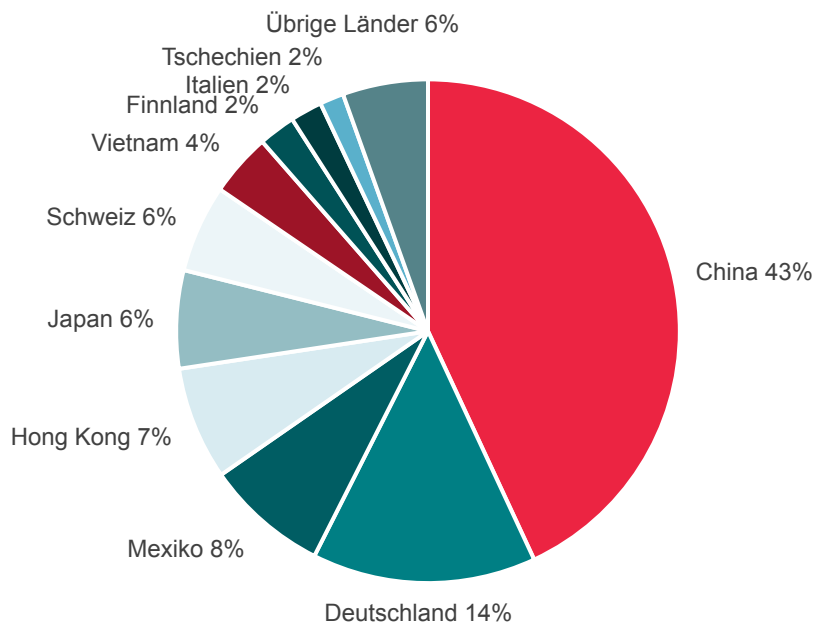
**Abb. 4-2 Monetäre Angaben zur Produktion, zu Exporten und Importen für Elektromotoren in Deutschland**

Quelle: Angaben auf Basis der PRODCOM-Datenbank für verschiedene Arten Elektromotoren, teilweise einschließlich Generatoren (Produktcodes 27111010 bis 27112590). Fehlende Angaben (41 von 378 Angaben) wurden durch Fortschreibung umliegender Werte ergänzt.

Eine darüber hinausgehende Analyse des Welthandels für Elektromotoren und -generatoren zeigt, dass bei einer Betrachtung der Netto-Exporteure<sup>8</sup> Deutschland mit einem Anteil von 14 % auf Rang 2 hinter dem dominierenden China mit 43 % im Welthandel folgt (Abb. 4-3). Dem folgen Mexiko, Hong Kong und Japan.

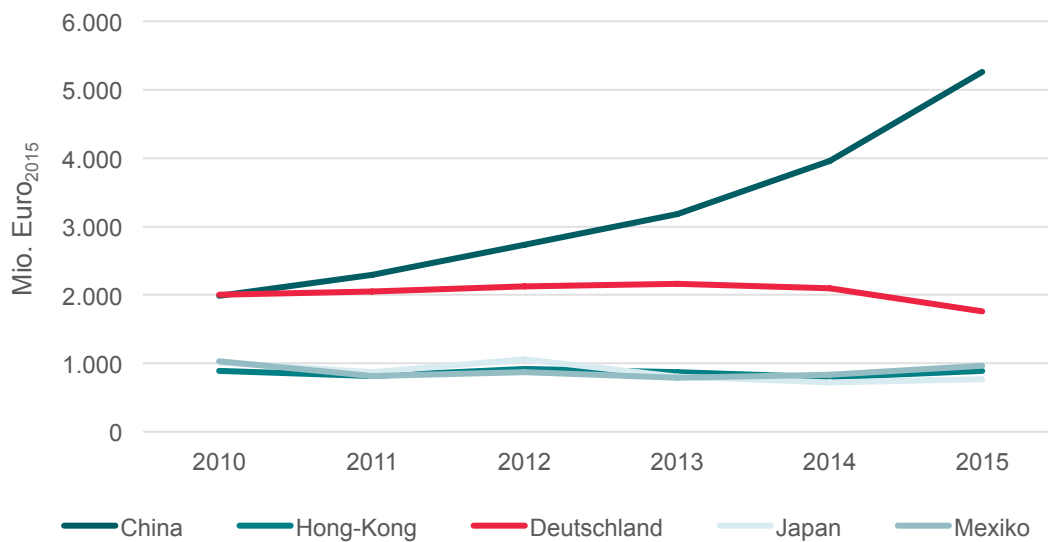
Betrachtet man die genannten Länder genauer (Abb. 4-4), so zeigt sich, dass in den letzten Jahren insbesondere für China ein deutlicher Aufwuchs des Volumens zu verzeichnen ist, während sich die übrigen Länder auf nahezu gleichem Niveau fortentwickeln.

<sup>8</sup> Hier verstanden als alle Länder, die einen positiven Netto-Export besitzen, der sich als Summe aus Exporten und Re-Exporten abzüglich der Importe und Re-Importe ergibt.



**Abb. 4-3 Exporteure für elektrische Motoren und Generatoren im Jahr 2015 für Länder mit positiver Gesamtexportbilanz (100 % entsprechen ca. 13,5 Mrd. US-Dollar)<sup>9</sup>**

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der in der UN Comtrade Database gelisteten Umsätze für den Klassifikationsschlüssel 8501.

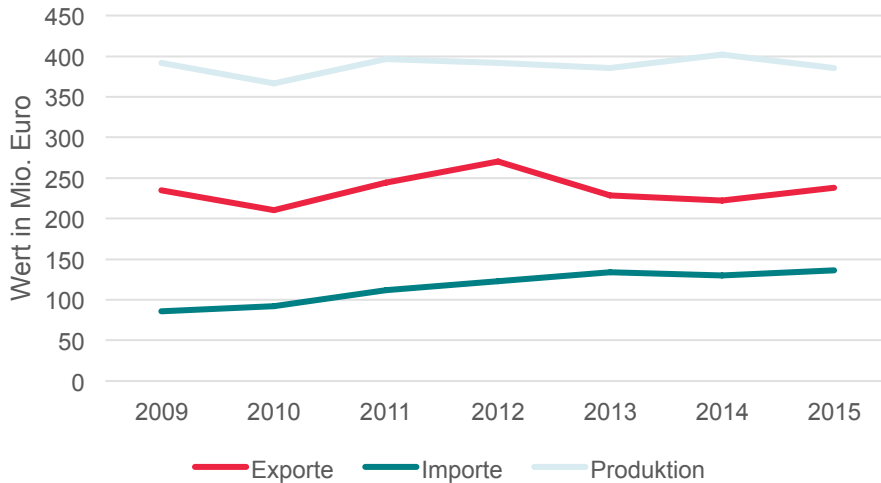


**Abb. 4-4 Zeitliche Entwicklung der Top5-Netto-Exporteure für elektrische Motoren und Generatoren des Jahres 2015**

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der in der UN Comtrade Database gelisteten Umsätze für den Klassifikationsschlüssel 8501.

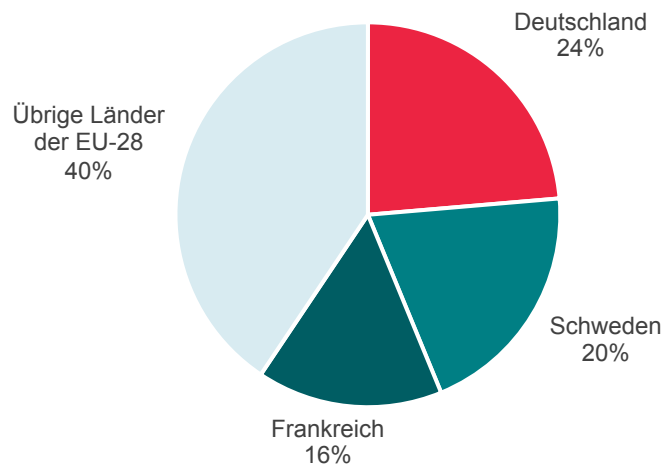
<sup>9</sup> Bei einer Gegenüberstellung mit dem in Abschnitt 0 genannten Angaben ist zu beachten, dass unterschiede in der Abgrenzung des Betrachtungsbereichs vorliegen und hier ausschließlich der Bilanzsaldo der Netto-Export-Nationen unter Berücksichtigung von Exporten, Importen, Re-Exporten und Re-Importen ausgewiesen wird.

Analog zur Aufschlüsselung der nationalen Produktion für Elektromotoren können die Werte für *Wärmepumpen*<sup>10</sup> ausgewiesen werden. Der Produktionswert in 2015 lag für Deutschland demgemäß bei rund 380 Mio. Euro (Abb. 4-5).



**Abb. 4-5 Monetäre Angaben zur Produktion, zu Exporten und Importen für Wärmepumpen in Deutschland**

Quelle: Angaben auf Basis der PRODCOM-Datenbank für Wärmepumpen außerhalb der Kategorie HS 8415 (Produktcodes 28251380)



**Abb. 4-6 Durchschnittlicher Anteil Deutschlands, Schwedens und Frankreichs in den Perioden 2013 bis 2015 am Produktionswert für Wärmepumpen (ohne Klimageräte) in den EU-28**

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der PRODOM-Datenbank für die Kategorie „28251380 - Heat pumps other than air conditioning machines of HS 8415“. Der gesamte Produktionswert für die Betrachtungsperiode in den EU-28 beziffert sich auf rund 1,65 Mrd. Euro.

<sup>10</sup> Hierbei wird auf den Produktcode 28251380 für „Wärmepumpen, die nicht in Klimageräten der Kategorie HS 8415 genutzt werden“ zurückgegriffen.

Um einen Eindruck von der Stellung Deutschlands im europäischen Umfeld zu erhalten, kann ein Blick auf den allgemeinen Wärmepumpenmarkt geworfen werden, dessen Schwerpunkt derzeit insbesondere auf gebäudebezogenen Anwendungen liegt. Eine Aufschlüsselung des Produktionswerts aller Wärmepumpen (ohne Klimageräte) in Europa zeigt, dass Deutschland neben Schweden und Frankreich zu den größten Produzenten zählt.

Für den gesamten Bereich der *generativen Fertigungsverfahren* insgesamt wurde der Anteil deutscher Unternehmen am weltweiten Umsatz mit generativ gefertigten Gütern und Dienstleistungen im Jahr 2010 in Höhe von 1,3 Mrd. US-Dollar auf etwa 15 bis 20 % bzw. ein Volumen von rund 200 bis 250 Mio. US-Dollar geschätzt. Bei einer breiteren Abgrenzung von generativ gefertigten Gütern wird davon ausgegangen, dass zu diesem Zeitpunkt in Deutschland rund 1.000 Unternehmen tätig waren und einen Umsatz von 8,7 Mrd. Euro erzielt haben. In den entsprechenden Untersuchungen wurde bei einem jährlichen Umsatzwachstum von 15 % dieser Wert grob auf rund 35 Mrd. Euro in Deutschland für 2020 ermittelt (EFI 2015).<sup>11</sup> Die Struktur der deutschen Unternehmen zeichnet sich ähnlich zur Größenstruktur der Industrie: Rund 90 % der Unternehmen werden als KMU klassifiziert mit bis zu 250 Mitarbeitern, 50 % der Unternehmen haben weniger als 25 Mitarbeiter (EFI 2015). Mit Blick auf die inländische Wertschöpfung ist anzumerken, dass generativen Fertigungsverfahren das Potenzial zugesprochen wird, arbeits- und personalintensive Herstellungsprozesse zu automatisieren und somit Kosten zu senken; ferner wird darauf hingewiesen, dass durch stärker individualisierte und flexibel anpassbarere Produkte näher an den Märkten der Käufer agiert werden könnte, was mittelfristig zu Rückverlagerungen von Produktionsprozessen nach Deutschland führen könnte (EFI 2015).

#### 4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Anhand von Kriterium 8 soll eine Analyse der internationalen Aufstellung der deutschen Industrie und hinsichtlich der Forschung und Entwicklungsausgaben vorgenommen werden.

##### Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

Eine grobe Einordnung der Aufstellung der deutschen Industrie in den unterschiedlichen Bereichen der Fokustechnologien ist in Tab. 4-17 gegeben.

Mit Blick auf *Elektromotoren* wurde der internationale Handel im Jahr 2010 im Bereich Elektromotoren wertmäßig von China dominiert (vgl. Abb. 4-3), dicht gefolgt von Deutschland auf dem zweiten Handelsplatz (Plötz und Eichhammer 2011). Die in Abb. 4-4 dargestellte Entwicklung bis 2015 zeigt, dass China seitdem seine Umsätze deutlich erhöhen konnte. Währenddessen ist der Netto-Export Deutschlands relativ konstant geblieben. Dennoch ist davon auszugehen, dass Deutschland insgesamt weiterhin zu den Ländern mit technologischer Führerschaft im Bereich von Elektromotoren zählt, insbesondere hinsichtlich Wechselstrommotoren. Zahlreiche große Hersteller im Bereich von Elektromotoren sind in Deutschland ansässig, beispiels-

<sup>11</sup>

Zu beachten ist, dass die eingangs dargestellte, für den Zeitraum 2013 bis 2020 genannte Wachstumsrate sich allerdings auf den engeren Markt bezieht und auf über 30 % geschätzt wird.

weise die Firmen Siemens, Bosch-Rexroth, Lenze, SEW Eurodrive oder ABB (Plötz und Eichhammer 2011).

**Tab. 4-17 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Industrielle Querschnittstechnologien**

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?		
<b>Elektromotoren</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input type="checkbox"/> wettbewerbsfähig
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen
<b>Großindustrielle Wärmepumpen</b>	<input type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen
<b>Additive Fertigungsverfahren</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input type="checkbox"/> wettbewerbsfähig
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen

Mit Blick auf *Wärmepumpen* allgemein gilt Deutschland neben Frankreich und den nordischen Ländern Schweden, Finnland und Norwegen als Early Adopter der Technologie. Bekannte Hersteller in Deutschland im Bereich Wärmepumpen allgemein sind neben anderen Bosch Thermotechnik, Vaillant und Viessmann (Frost & Sullivan 2016). Mit Blick auf die Erlöse auf dem europäischen Wärmepumpenmarkt sind die drei größten Firmen Bosch Thermotechnik (9 % des Volumens), die Vaillant Gruppe (8 %) sowie Stiebel Eltron (7,5 %). Speziell bei industriellen Hochtemperaturwärmepumpen waren im Jahr 2014 insgesamt zehn Hersteller aus unterschiedlichen Ländern mit Vorlauftemperaturen über 80 °C und drei mit Vorlauftemperaturen von 100 °C und darüber hinaus (Wolf et al. 2014) auf dem noch jungen Markt.

Mit Blick auf *generative Fertigungsverfahren* wird darauf hingewiesen, dass sie insbesondere mit Blick auf die Konkurrenz durch Massenfertigung in Asien eine besondere Bedeutung besitzen, um hochwertige Kleinserien zu fertigen, schnelle Produktentwicklungsprozesse zu sichern und Know-how im eigenen Betrieb zu halten (VDI 2014a). Hinsichtlich der Aufstellung deutscher Hersteller für generative Fertigungsverfahren wird deutschen Herstellern insbesondere im industriell wichtigen Bereich metallischer Werkstoffe eine führende Position zugeschrieben (Bundesregierung 2013). Ähnlich wird auch an anderer Stelle (EFI 2015) davon ausgegangen, dass viele weltmarktorientierte Technologieproduzenten mit guter Wettbewerbsposition und Innovationsfähigkeiten aktiv sind. In VDI (2014a) wird ebenfalls auf die gute Position im metallischen Bereich, gleichzeitig aber auch auf den wachsenden internationalen Wettbewerb hingewiesen. Demgegenüber gelten im Bereich von Kunststoffen US-Firmen als führend. Gleichzeitig wird im Umfeld der Anlagenbauer Firmen beispielsweise für Lasertechnik, 3D-Messtechnik und CAx-Software-Entwickler sowie in Deutschland ansässigen Endanwendern eine gute Position zugeschrieben. Als deutsche Anlagenhersteller im Metallbereich werden beispielsweise EOS, SLM Solutions, Concept Laser und Realizer genannt (Bundesregierung 2013).

## Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Hinweise für die Entwicklung der F&E-Budgets für industrielle Querschnittstechnologien sind aufgrund der schwer erreichbaren Abgrenzung zwischen F&E speziell zur Energieeffizienz sowie zur F&E für andere technologische Aspekte schwer zu erlangen.

Um ein allgemeines Bild zu den Budgets für Forschung, Entwicklung und Demonstration zu vermitteln, wird der Methodik folgend wie im *Technologiefeld 6.1 Energieeffiziente Prozesstechnologien* hier die Forschungsleistung Deutschlands im Vergleich zu den Vereinigten Staaten von Amerika ausgewiesen (Tab. 4-18). Analog wird hierbei in der Gruppe 1 „Energieeffizienz“ auf die komplette Untergruppe 1.1 „Industrie“ zurückgegriffen, um die industriellen Anwendungen abzudecken. Entsprechend umfassen die Angaben auch die Aktivitäten in anderen im Rahmen dieser Studie betrachteten Technologiefelder, unter anderem des genannten Technologiefeldes 6.1.

**Tab. 4-18 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für die Industrie anhand von Angaben der IEA-Datenbank – Input-Orientierung**

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene - Deutschland		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	Mio. €	34,1
Durchschnittlicher jährlicher Anstieg (Zeitraum 2011 bis 2015)	+ Mio. €/Jahr	+3,46
Mittlere Wachstumsrate (Zeitraum 2011 bis 2015)	+ %/Jahr	+13,95
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	14.569
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	%	0,23 %
Mittlere Wachstumsrate (Zeitraum 2011 bis 2015)	+ %/Jahr	+16,66
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene - USA		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	Mio. €	159,2
Durchschnittlicher jährlicher Anstieg (Zeitraum 2011 bis 2015)	+ Mio. €/Jahr	+1,53
Mittlere Wachstumsrate (Zeitraum 2011 bis 2015)	+ %/Jahr	+0,98
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	14.569
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	1,09 %
Mittlere Wachstumsrate (Zeitraum 2011 bis 2015)	+ %/Jahr	+3,39

In einer Auswertung der Forschungsaktivitäten zu *Wärmepumpen* allgemein in Deutschland weisen Wolf et al. (2014) darauf hin, dass die Forschungsaktivitäten aus historischer Sicht dem Energiepreisniveau folgen. Dabei ist ein zeitweiser Anstieg von Projekten und Fördervolumina im Zeitraum zwischen 1975 und 1985 zu erkennen. Ein erneuter deutlicher Anstieg zu Wärmepumpen lässt sich seit 2007 beobach-

ten. Dabei ist generell auffällig, dass die Aktivitäten im Bereich der Forschungsförderungen speziell für industrielle Wärmepumpen und Großwärmepumpen bis 2007 mit einem jährlichen Volumen um ein konstantes Niveau von überschlägig 1 Mio. Euro pro Jahr pendelten, während seit 2007 ein besonderer Anstieg zu verzeichnen ist und etwa die Hälfte der Projekte bzw. des Budgets nun auf dieses Segment entfällt.

Im Zusammenhang mit *generativen Fertigungsverfahren* wird in EFI (2015) auf die Förderung dieser Verfahren in den Vereinigten Staaten von Amerika hingewiesen und es wird auch in China eine starke Unterstützung der entsprechenden Industrie vermutet. Als Ziele der US-amerikanischen Bestrebungen werden genannt, durch die Förderung generativer Fertigungsverfahren verlorene Kapazitäten der Industrieproduktion wiederaufzubauen sowie den Transfer der Technologien in den produzierenden Sektor zu beschleunigen, um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Für China wird angenommen, dass dort eine starke private Unternehmenslandschaft für generative Fertigungsverfahren aufgebaut werden soll. In Europa wurden generative Fertigungsverfahren durch Förderung im Rahmen allgemeiner übergeordneter Förderprogramme (z. B. Horizont 2020) bereitgestellt sowie Standardisierungsinitiativen vorangetrieben. In Deutschland basiert die Förderung auf der Finanzierung außer-universitärer Forschungseinrichtungen in diesem Themenfeld sowie durch Projektförderung. Für den Zehnjahreszeitraum bis 2013 wird die Höhe der Projektförderung des Bundes für generative Verfahren mit etwa 21,2 Mio. Euro angegeben (Bundesregierung 2013).

#### **4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz**

Mit Blick auf die gesellschaftliche Akzeptanz ist bei den industriellen Querschnittstechnologien bei einer Unterscheidung von lokaler Akzeptanz, sozio-politischer Akzeptanz und Markt- bzw. Nutzerakzeptanz insbesondere der Aspekt der Markt- und Nutzerakzeptanz von Bedeutung. Dies lässt sich damit begründen, dass der Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien einerseits häufig relativ „kleinskalig“ erfolgt und andererseits deren Einsatz wenige von außen „sichtbare“ Wirkungen entfaltet, welche die Lebensumwelt erheblich beeinflussen oder Risiken für Natur und Mensch bergen.

Die Diskussion zum Einsatz entsprechender Technologien bei Nutzern industrieller Systeme wird im wissenschaftlichen Kontext generell mit dem Thema „Hemmnisse für Energieeffizienz“ verknüpft. Hierbei wird entlang der neoklassischen ökonomischen Theorie als Ausgangspunkt postuliert, dass für den Einsatz energieeffizienter Technologien deren Wirtschaftlichkeit ausschlaggebend sein sollte. Der zögerliche Einsatz der Technologien wird auf sogenannte Hemmnisse zurückgeführt, die definitorisch ein Verhalten behindern, das gleichzeitig energie- und ökonomisch effizient erscheint.<sup>12</sup> Eine Orientierung an den entsprechenden Konzepten scheint bei der Betrachtung der Akzeptanz daher sinnvoll.

---

<sup>12</sup>

In der neueren Literatur wird darüber hinaus verstärkt untersucht, inwieweit umgekehrt auch fördernde Faktoren den Einsatz von Technologien beschleunigen können.



Der Klassifizierung von Sorrell et al. (2011) lassen sich folgende Arten mikroökonomischer Hemmnisse unterscheiden:

- Risiken: Befürchtete negative Konsequenzen infolge des Technologieeinsatzes.
- Versteckte Kosten: Zunächst nicht erkennbare Nutzenminderungen oder Aufwendungen.
- Unvollständige Informationen: Informationsdefizite bei Entscheidungsträgern infolge unbekannter, unzureichender oder unsicherer Informationen.
- Geteilte Anreize: Unterschiede in der Verteilung von Anreizen und Aufwendungen bei der Umsetzung.
- Budgetbeschränkungen: Finanzierungsengpässe in Unternehmen.
- Begrenzte Rationalität: Verhaltensweisen, die sich nicht aus einem Wirtschaftlichkeitskalkül, sondern aus anderen Gründen ergeben.

Bei einer Betrachtung der Nutzerakzeptanz erscheinen insbesondere die drei zuerst genannten Aspekte relevant, da Risiken, Befürchtungen versteckter Kosten und unzureichend bekannte technologische Eigenschaften insbesondere die Markt- bzw. Nutzerakzeptanz beeinflussen können. Geteilte Anreize betreffen demgegenüber die Anreizstrukturen bei Einbindung mehrerer Akteure, Budgetbeschränkungen die Finanzierung und begrenzte Rationalität Verhaltensaspekte. Sie sind damit für die Akzeptanz eher zweitrangig.

Hinsichtlich des Einsatzes *hocheffizienter Elektromotoren* handelt es sich um standardisierte Produkte, deren technologische Parameter durch normierte Festlegungen beschrieben werden. In der Vergangenheit konnten unter Beibehaltung zentraler Technologieparameter deutliche Verbesserungen der Energieeffizienz erreicht und demonstriert werden. Insgesamt ist die Akzeptanz hocheffizienter Elektromotoren daher als hoch einzuschätzen. Mit Blick auf die Verbreitung hocheffizienter Elektromotoren sind statt Akzeptanzfragestellungen älteren Untersuchungen zufolge eher Marktstrukturen (Almeida 1998) und höhere Anfangsinvestitionen ausschlaggebend. Mit Blick auf *große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen* fallen hinsichtlich der Umsetzung die vergleichsweise hohen Investitionen sowie die Problematiken der Identifikation geeigneter Abwärmequellen/-senken ins Gewicht. Bei ihrem Einsatz ist zu beachten, dass durch die Technologien Systeme verkoppelt werden, dass für die Wärmepumpen neben Ersatzsystemen für die Wärmezufuhr und -abfuhr etwaig zusätzlicher Bauraum benötigt wird, dass die Anlagen in bestehende Systeme eingepasst werden müssen und dass vorhandene Wärmepumpentypen bislang nur begrenzt in der Industrie Einzug gehalten haben. Gleichmaßen wird auf Informations- und Erfahrungsdefizite im Bereich von Wärmepumpen in der Industrie hingewiesen (Lambauer et al. 2008; Wolf et al. 2012).

Insgesamt lässt sich bei Interventionen, die auf bewährter Technik wie die Motoren aufbauen, die Marktakzeptanz als hoch einschätzen, soweit deren Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Mit steigender Komplexität und geringerer Erfahrung/höherem Risiko wie bei den Wärmepumpen ist von einer darunter liegenden Akzeptanz auszugehen (Tab. 4-19). Bei *generativen Fertigungsverfahren* werden stärker die produktionstechnischen Überlegungen den Einsatz der Technologien vorantreiben.

**Tab. 4-19 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Industrielle Energieeffizienz zum Status Quo (2015)**

Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
Marktakzeptanz		Soziopolitische Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
Bewertung	Begründung	Bewertung	Begründung	Bewertung	Begründung
Mittlere bis hohe Akzeptanz (2 bis 4)	Soweit wirtschaftlich und nachweislich zuverlässig in der Nutzung	Akzeptanzfrage kaum relevant	Kleinskaligkeit der Technologien sowie geringe Sichtbarkeit auf soziopolitischer Ebene	Akzeptanzfrage kaum relevant	Kleinskaligkeit der Technologien sowie geringe Sichtbarkeit auf lokaler Ebene

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

#### 4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Dieses Kriterium deckt ab, inwieweit durch den Einsatz der Technologien Strukturen in der Energieversorgung festgelegt und wie schnell diese verändert werden können.

Hinsichtlich der Pfadabhängigkeit ist anzumerken, dass es sich bei den Technologien des Technologiefelds zumeist um „verbesserte Basistechnologien“ handelt, die letztlich Energie und Ressourcen besonders effizient verwerten, aber meist keine grundsätzlichen Änderungen von Anbindungen, Schnittstellen oder Funktionalitäten besitzen. Da die entsprechenden Technologien in jedem Fall eingesetzt werden, sind generell keine übergreifenden Pfadabhängigkeiten zu erwarten. Hersteller und Nutzer der Technologien werden ihre Produktion bzw. ihre Anwendungen naheliegenderweise auf entsprechend gestaltete Produktlinien ausrichten. Dies lässt sich jedoch nicht als Pfadabhängigkeit im Sinne des hier betrachteten Kriteriums werten, da eine entsprechende Ausrichtung auch ansonsten erfolgen würde. Mit Blick auf *Wärmepumpen*, die mit Abwärme aus Prozessen betrieben werden, ist allerdings anzumerken, dass Pfadabhängigkeiten vorliegen können, wenn dadurch die Nutzung vorhandener Abwärmequellen verstetigt wird (Hirzel et al. 2013). Planungs- und Bauzeiten als Indikator für die Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit liegen - je nach Rahmenbedingungen - im Bereich von wenigen Tagen bis Monaten und sind im betrachteten Technologiefeld von nachrangiger Bedeutung.

Dominant mit Blick auf die Reaktionsfähigkeit sind insbesondere Lebens- bzw. Nutzungsdauern der Technologien bzw. die damit einhergehende Umwälzung des Technologiebestands. Bei einer exemplarischen und einheitlichen Lebensdauer von 15 Jahren dauert es beispielsweise eben diese Zeitspanne, bis der vollständige Technologiebestand umgewälzt wurde.

#### 4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Anhand dieses Kriteriums soll dargestellt werden, ob das Technologiefeld bei der Marktdurchdringung von externen Infrastrukturen abhängig ist (Tab. 4-20). Insgesamt ist das Technologiefeld als weitgehend unabhängig von Infrastrukturen einzuordnen.

Bei *Elektromotoren* gibt es neben der notwendigen - aber im Referenzfall ohnehin vorhandenen - Stromversorgung keine Abhängigkeit von Infrastrukturen. Mit Blick auf *Wärmepumpen* ist zu beachten, dass deren Einsatz das Vorhandensein von Wärmequellen voraussetzt. Häufig sind diese Wärmequellen bereits auf Betriebsgebäuden in Form von Abwärme vorhanden. Zumindest technisch denkbar wäre auch eine Anbindung an Nah- und Fernwärmenetze als Quelle für Wärmeenergie, sofern sich diese als wirtschaftlich darstellbar erweist. Alternativ könnte auch die Energie solarthermischer Kollektoren genutzt werden. Gegenüber den Elektromotoren ist die Infrastrukturabhängigkeit von Wärmepumpen durch die Notwendigkeit einer im Vergleich zu Strom schwerer zugänglichen Energiequelle geringfügig höher. Der Vollständigkeit halber ist anzumerken, dass die Nutzung insbesondere elektrisch betriebener Wärmepumpen aus gesamtbilanzieller Sicht dann sinnvoll ist, wenn der für die Wärmebereitstellung notwendige Energiebedarf für den Betrieb der Wärmepumpe und die Bereitstellung der Wärme aus der Senke geringer ist als der Energieaufwand, den ein vor Ort eingesetztes konventionelles Wärmebereitstellungssystem hätte. Beim Einsatz *generativer Verfahren* ist zu beachten, dass die Technologie an sich zwar keine außergewöhnlichen infrastrukturellen Anforderungen stellt, dass jedoch die Anwendung der Verfahren die breite und kostengünstige Verfügbarkeit der entsprechenden Pulvermaterialien für die generativen Herstellungsprozesse voraussetzt. Eine derartige Bereitstellung sollte im Sinne des hier betrachteten Kriteriums jedoch keinen gesonderten Infrastrukturausbau im energiewirtschaftlichen Sinne erforderlich machen.

**Tab. 4-20 Abhängigkeit des Technologiefeldes Industrielle Querschnittstechnologien von Infrastrukturen aus energiewirtschaftlicher Perspektive**

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologien ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologien ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologien müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologien müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

#### 4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Anhand des Kriteriums Systemkompatibilität wird betrachtet, inwieweit bei einem Einsatz der Technologien Rückwirkungen, Wechselwirkungen und daraus resultierende Anpassungsbedarfe bei benachbarten Systemen bestehen und daraus Risiken und Anpassungsbedarfe erwachsen.

Rückwirkungen werden als negativ konnotierte Auswirkungen auf benachbarte Systeme verstanden. Generell sind diese bei den industriellen Querschnittstechnologien als nachrangig anzusehen. Abhängig vom konkreten Fall können jedoch vereinzelt Rückwirkungen auftreten. So kann der Betrieb drehzahlvariabler *Elektromotoren* beispielsweise den Einsatz von Netzfiltertechnik erforderlich machen, um Störungen

durch eine Veränderung der Netzqualität zu vermeiden. Hinsichtlich des Einsatzes von *Wärmepumpen* ist zu beachten, dass eine Wärmepumpe als zusätzliches Bindeglied zwischen Wärmesenke und Wärmequelle funktioniert. Durch den Einsatz der Wärmepumpen werden Senke und Quelle miteinander verknüpft. Diese Verzahnung bedingt erst den eigentlichen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz, führt allerdings auch dazu, dass ein Ausfall bei Quelle oder Senke auch den jeweils anderen Teil der Prozesskette betreffen kann. Dies ist allerdings eine generelle Problematik der systemischen Integration und nicht speziell ein Aspekt von Wärmepumpen an sich. Ein Energiespeicher kann beispielsweise helfen, derartige Abhängigkeiten zeitweise zu mindern und auch erlauben, Wärmepumpen als flexibel steuerbare Verbraucher einzusetzen. Bei einem sehr intensiven Einsatz elektrisch betriebener Wärmepumpen können durch den zusätzlichen Strombedarf gegebenenfalls weitere Stromversorgungskapazitäten und dafür notwendige Infrastrukturen erforderlich werden.

Anpassungsbedarfe zeigen auf, in welchem Umfang Änderungen bei angrenzenden Systemen erforderlich sind. Auch diese sind übergreifend von nachrangiger Bedeutung und insbesondere auf einzeltechnologischer Ebene relevant. Beispielhaft kann hier im Bereich von *Elektromotoren* die Problematik des Erreichens bestimmter kleiner Motorbaugrößen bei hocheffizienten Motoren genannt werden. Ein Beispiel für die Betrachtung von *Wärmepumpen* ist, dass neben den Aggregaten an sich noch die entsprechenden Schnittstellen für die Wärmeübertragung, sprich Wärmetauscher, erforderlich sind, die in das Quell- sowie das Senkensystem integriert werden müssen. *Generative Fertigungsverfahren* beruhen im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren auf einem anderen Fertigungsverfahrenparadigma. Entsprechend müssen darauf die jeweiligen Produktionsprozessketten aus produktionstechnologischer Sicht ausgerichtet werden, da Bearbeitungsschritte entfallen und andere hinzukommen können.

Wechselwirkungen umfassen sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf angrenzende Systeme. Wie bei den Rückwirkungen und Anpassungsbedarfen sind auch die Wechselwirkungen im betrachteten Technologiefeld generell als unkritisch einzustufen. In Einzelfällen sind Rückwirkungen denkbar. So ist es beispielsweise vorstellbar, dass sich beim Einsatz von *Wärmepumpen* und der Verwendung von Abwärme aus Abgasen als Wärmequelle beispielsweise als positiver Effekt der Energiebedarf für die Rückkühlung senken lässt, da die Temperatur der Wärmequelle vermindert wird. Andererseits ist es bei entsprechender Anlagenkonfiguration auch denkbar, dass es durch das Absenken des Temperaturniveaus gegebenenfalls zu frühzeitigem Ausfall von korrosivem Kondensat im Abgasstrom kommen könnte.

Insgesamt ist die Systemkompatibilität im Vergleich zu anderen Technologiefeldern generell hoch, da keine erheblichen Phänomene wie Lock-In-Effekte, Ausschluss-effekte oder Irreversibilitäten zu erwarten sind (Tab. 4-21).

**Tab. 4-21 Kritikalität der Einzelaspekte zur Systemkompatibilität für das Technologiefeld Industrielle Querschnittstechnologien aus energiewirtschaftlicher Perspektive**

		Erheblich	Unerheblich
Rückwirkungen:	Negative Auswirkungen auf angrenzende Systeme.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Anpassungsbedarfe:	Umfang der notwendigen Anpassungsbedarfe in angrenzenden Systemen.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Wechselwirkungen:	Positive sowie negative Auswirkungen auf angrenzende Systeme.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## 5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Ausgehend von den vorangehenden Ausführungen können für die einzelnen Technologiebereiche F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand formuliert werden. Im Folgenden werden dabei jeweils Verbesserungen bei *Komponenten, Werkstoffen bzw. Anlagen* sowie hinsichtlich der *Optimierung und Integration* von Gesamtsystemen unterschieden.<sup>13</sup>

### 5.1 Fokustechnologie Elektromotoren

In den vergangenen Jahren konnten im Markt deutliche Verbesserungen der Effizienz von Elektromotoren erreicht werden. Hierbei sind insbesondere im Bereich kleiner Motorleistungen noch vergleichsweise hohe Verbesserungspotenziale erreichbar, während große Motoren nur wenige Prozentpunkte unter dem theoretisch maximal erreichbaren Wirkungsgrad liegen. Ein essentieller Bereich für die künftige Verbesserung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz liegt insgesamt weniger auf Motoren an sich, sondern vielmehr in einer integrativen Sichtweise auf Gesamtsysteme, darunter Druckluft-, Pumpen-, Ventilations- oder Transportsysteme. Hier müssen hocheffiziente Motoren integriert werden, aber es muss auch eine Optimierung und Weiterentwicklung der Systeme an sich erfolgen. Nichtsdestotrotz ist auch die Komponentenforschung für hocheffiziente Elektromotoren ein Bereich, der aufgrund des breiten Einsatzes von Motoren nicht außer Acht gelassen werden sollte. Hierzu lassen sich folgende F&E-Themen nennen:

- **Hochtemperatursupraleitung**  
Die Hochtemperatursupraleitung ist weiterhin eine mögliche Option, um Verlustleistungen in Elektromotoren zu reduzieren. Hierbei stehen insbesondere die Entwicklung von Leitern sowie deren Kühlung bei der Nutzung in Motoren im Vordergrund.<sup>14</sup>
- **Magnetische Materialien**  
Die Permanentmagnettechnik beruht heute insbesondere auf seltenen Erden. Forschungsbedarf besteht dahingehend, den Einsatz von seltenen Erden durch geeignete Designstrategien zu minimieren bzw. durch günstige alternative magnetische Materialien zu ersetzen.
- **Komponentendesign**  
Im Bereich des Komponentendesigns können an unterschiedlichen Stellen Verbesserungen erreicht werden. Dies betrifft beispielsweise die Lager, die Kühlung sowie die Gestaltung von Stator und Rotor.
- **Verbesserte und kostengünstigere Produktionsprozesse**  
Die Weiterentwicklung der Motortechnik bedingt eine Fortentwicklung der dafür

<sup>13</sup> Ein Teilnehmer des Workshops in Berlin (Wuppertal Institut/Wuppertal Institut 2017) merkte an, dass über eine technologiefokussierte Betrachtung hinaus zu prüfen sei, wie die Diffusion und Umsetzung von Effizienzmaßnahmen bzw. neuen Technologien in Unternehmen begünstigt werden könnten. Aufgrund der technologiebezogenen Betrachtungsweise wurden solche instrumentellen Aspekte hier – trotz ihrer Relevanz für die energie- und klimapolitischen Ziele – nicht thematisiert.

<sup>14</sup> Ein Workshopteilnehmer (Wuppertal Institut/Wuppertal Institut 2017) merkte an, dass die Verortung der Hochtemperatursupraleitung im Bereich der Elektromotoren im Rahmen einer potentiellen Forschungsförderung zu prüfen sei, da diese primär in anderen Forschungsfeldern stattfände. Da die Hochtemperatursupraleitung als Maßnahme zur Verbesserung für einige Elektromotoren relevant sein kann, wird sie hier dennoch aufgeführt.

notwendigen Produktionsprozesse (z. B. Verbesserung neuer Verfahren wie Kupferguss, präzisere Fertigungsmethoden) sowie die Senkung der Kosten für aufwändigere Produktionsprozesse bei komplexeren Motoren.

- **Optimierung der Komponenten bei kleinen Leistungsklassen**  
Gerade bei den kleineren Leistungsklassen ist die Effizienz der Motoren vergleichsweise gering. Weiterentwicklungen in diesem Bereich können auf den jeweiligen Motor bezogen zu deutlicheren Effizienzfortschritten führen als bei großen Motoren.
- **Motordesign**  
Neben der Verbesserung der Komponenten ist deren Design bzw. Gesamtzusammenspiel als System ein wichtiger Faktor.

Darüber hinaus ist aber auch Forschungsbedarf bezogen auf die Verbesserung von gesamtmotorischen Systemen erforderlich:

- **Optimierung nachgelagerter Anwendungen**  
Die Systemintegration der Motoren ist ein wichtiger Aspekt. Hier müssen Motorsysteme und Anwendungen so weiterentwickelt werden, dass eine optimalere Auswahl bzw. eine Abstimmung zwischen Motor und Anwendung möglich werden.
- **Bedarfsgerechte Motorsteuerung**  
Gerade bei nicht dauerhaft gleichförmig betriebenen Anwendungen spielt neben der Effizienz des Motors im Nominalfall die Effizienz des Motors im Teillastbetrieb eine wichtige Rolle. Mit dem verstärkten Einzug von Leistungselektronik in Form von Frequenzumrichtern bieten sich Möglichkeiten, deutliche Energieeinsparungen zu erzielen. Hier sind Weiterentwicklungen im Bereich der Kosten, der Effizienz und der Integration dieser Technologien notwendig.
- **Intelligente Integration ins Gesamtsystem**  
Ein weiteres Entwicklungsgebiet betrifft die verstärkte Einbindung IT-basierter Systeme, um den Motor hinreichend intelligent zu machen, dass er weitgehend unabhängig seinen Betrieb optimieren kann. So könnte beispielsweise ein intelligent betriebener Motor wissen, wie sich die Verfügbarkeit von Strom (Demand Side Management) oder die Nachfrage nach mechanischer Leistung (z. B. eine Fördermenge) entwickeln werden und schon im Vorfeld den energieoptimalen Betriebspunkt wählen, um die Energienachfrage auf den besten Zeitpunkt zu legen oder um die gewünschte Menge unter Einhaltung von Restriktionen energieoptimal bereitzustellen.

## 5.2 Fokustechnologie Wärmepumpen

Generell erscheinen unterschiedliche technologische Varianten einsetzbar, um künftig *große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen* zu realisieren. Im Rahmen einer Förderung sollte die technologische Vielfalt in diesem Bereich weitergetragen werden, auch da die Wärmepumpen eine wichtige Rolle spielen können, um Teile des Prozesswärmebedarfs bei geringen Emissionen effizient bereitzustellen. Als generelle Fokusbereiche bietet es sich neben einer Ausweitung der Abdeckungs- bzw. Temperaturbereiche durch technologische Weiterentwicklungen an, bei der Förderung die Verbesserung der Leistungszahlen sowie die Senkung von Kosten im Fokus zu behalten.

Im Bereich der Komponentenforschung lassen sich daran angelehnt folgende F&E-Themen nennen:

- **Neue Kältemittel**  
Um höhere Temperaturniveaus mit den Wärmepumpen abzudecken, ist eine Weiterentwicklung der Kältemittel erforderlich. Hier gilt unter anderem, dass sich Kältemittel auf dem Temperaturniveau der Wärmequelle verdampfen lassen müssen, dass sie bei erreichbaren Drücken verflüssigbar sind und dass von ihnen möglichst keine Gefährdung von Mensch und Umwelt ausgeht. Auch für sorptionsbasierte Systeme bietet sich eine weitergehende Erforschung geeigneter Materialien bzw. Stoffkombinationen an.
- **Verbesserte Verdichter**  
Um höhere Betriebstemperaturen und Betriebsdrücke bei Wärmepumpen erreichen zu können, müssen bestehende Verdichterkonzepte für den Einsatz in den erforderlichen Druck- und Temperaturbereichen weiterentwickelt und optimiert werden. Dies betrifft neben dem Verdichter an sich auch weitere Komponenten, beispielsweise die Ventiltechnik.
- **Optimiertes Design**  
Um höhere Temperaturbereiche und Arbeitszahlen zu erreichen, müssen Kühltechniken, Wärmetauscher optimiert und die Anlagenkonstruktion insgesamt weiterentwickelt werden.

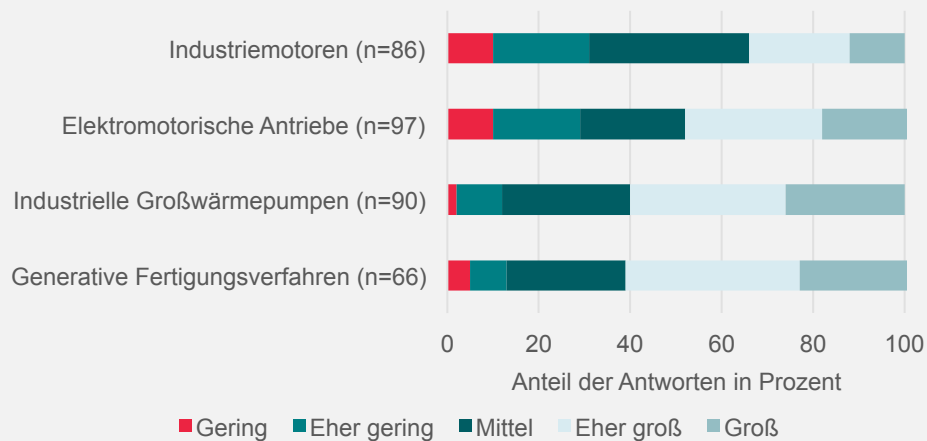
Neben der komponentenbezogenen Weiterentwicklung sind auch systembezogene Fortentwicklungen erforderlich. Hierzu zählen:

- **Regelungskonzepte und Integration in Lastmanagementsysteme**  
Mit Blick auf Verbesserungen ist es ebenfalls notwendig, die Integration von Wärmepumpen ins Lastmanagement zu verbessern. In diesem Zusammenhang ist unter anderem zu untersuchen, inwieweit der Wärmebedarf industrieller Prozesse in Verbindung mit Wärmepumpen flexibilisiert werden kann und ob bzw. wann das Zusammenspiel mit etwaigen Wärmespeichern zur zeitlichen Entkopplung von Wärmebedarf und Wärmebereitstellung eine aussichtsreiche Option darstellt.
- **Automatisierte Systemintegration**  
Mit Blick auf den Betrieb industrieller Wärmepumpen müssen diese Systeme so optimiert werden, dass sie intelligent im Energiesystemverbund agieren können, beispielsweise flexibel auf Laständerungen reagieren oder insbesondere dann eingesetzt werden, wenn die Rahmenbedingungen (z. B. Verfügbarkeit von Strom, Abwärme, solarer Wärme) besonders günstig sind. Mit dem Anstieg der realisierbaren Temperaturbereiche wird sich auch die Aufgabe stellen, automatisch zu steuern, inwieweit Wärmepumpen gegebenenfalls auch mit einer hohen Temperaturpreizung und damit mit einer geringen Leistungszahl betrieben werden sollten, z. B. auch um thermische Speicher optimal zu befüllen.
- **Senkung der Systemkosten**  
Generell erreichen große industrielle Hochtemperaturwärmepumpen im Vergleich zu konventionellen Technologien der Wärmebereitstellung heute nur bedingt die zum Teil in der Industrie geforderten sehr kurzen Amortisationszeiten. Daher ist für die Systeme in ihrer Gesamtheit eine Senkung ihrer Kosten notwendig.



### Exkurs: Einschätzung zum Förderbedarf

Über die im Exkurs zu Kapitel 4.1 dargestellte Fragestellung zum Marktpotenzial hinaus wurden die Teilnehmer der Forschungsnetzwerke gebeten, für ausgewählte Technologien eine Einschätzung zum Förderbedarf („Wie schätzen Sie den öffentlichen Forschungsbedarf der nachfolgenden Technologien ein?“) anhand einer qualitativen Fünf-Punkte-Skala („gering“ bis „hoch“) zu geben (ifo Institut 2017). Die Anzahl der Antworten erreicht auch hier eine Größenordnung von 66 bis 90.



Insgesamt zeigen die Angaben der Teilnehmer, dass der öffentliche Förderbedarf im Bereich von Industriemotoren als eher mittelmäßig eingeschätzt wird: Die Einschätzungen zu geringem und großem Förderbedarf halten sich hier tendenziell die Waage. Diese Einschätzung könnte darauf zurückzuführen sein, dass infolge der Fortentwicklung der Technik in bestimmten Motorsegmenten bereits sehr hohe Effizienzwerte erreicht werden können. Betrachtete man elektromotorische Antriebe, so wird hier ein höherer Förderbedarf gesehen. Geht man hier wiederum davon aus, dass die „elektromotorischen Antriebe“ als Antriebssysteme aufgefasst wurden, so könnte sich dieser höhere Bedarf auf die Notwendigkeit von öffentlicher Forschung für die Effizienzsteigerung gesamter Antriebsstränge beziehen. Sowohl für industrielle Großwärmepumpen als auch für generative Fertigungsverfahren wird den Teilnehmern der Umfrage zufolge der vergleichsweise höchste öffentliche Förderbedarf gesehen. Hier sind die Teilnehmer, die einen eher großen oder großen Förderbedarf sehen, deutlich in der Mehrheit und nur ein kleiner Anteil der Befragten sieht einen geringen öffentlichen Mittelbedarf.

Neben der Befragung fand am 2. Mai 2017 im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie ein Workshop mit ausgewählten Teilnehmern statt (Wuppertal Institut 2017). Dort wurden Technologiesteckbriefe als vorläufige Zusammenfassungen der im Rahmen des Projekts erstellten Technologieberichte diskutiert. Die Teilnehmer des Workshops wurden gebeten, für das gesamte Technologiefeld eine Einschätzung zu geben, wie das Marktpotenzial und die zentrale Forschungsnotwendigkeit mit Bundesmitteln einzuschätzen wäre (graphische Skala von „gering“ bis „hoch“). Neun Teilnehmer haben hier Einschätzungen bereitgestellt: Ihnen zufolge sind sowohl Marktpotenzial als auch Fördernotwendigkeit als jeweils mittel bis hoch zu verorten.

### 5.3 Fokustechnologie Generative Fertigungsverfahren

Die hier als Querschnittstechnologien betrachteten generativen Fertigungsverfahren spielen als Fertigungstechnologien eine Sonderrolle. Prinzipiell ist ihre Weiterentwicklung dem Bereich der industriellen Produktionsforschung zuzuordnen. Demgemäß werden sie häufig bei energiewirtschaftlichen bzw. energietechnologischen Überlegungen nur am Rande betrachtet. Nichtsdestotrotz können die Verfahren bei passender Nutzung durch Einsparungen bei Materialien und Bearbeitungsschritten auf der Nachfrageseite einen wichtigen Beitrag zu den energie- und klimapolitischen Zielen leisten.

Unabhängig von der konkreten Zuordnung zu einer Forschungslinie können im Bereich der Werkstoff- und Prozessforschung für generative Fertigungsverfahren mit Blick auf einen seriennahen Technologieeinsatz folgende F&E-Themen genannt werden:

- **Weiterentwicklung des Materialspektrums**  
Für die Ausweitung der Anwendungsbereiche und einen auf die Anwendung weiter abgestimmten Materialeinsatz ist eine Weiterentwicklung der zur Verfügung stehenden Materialien erforderlich. Ein weiteres damit im Zusammenhang stehendes Thema ist der parallele Einsatz mehrerer unterschiedlicher Materialien in den Fertigungsprozessen.
- **Leistungsfähigkeit der Prozesse, Prozesssteuerung und -überwachung**  
Ein limitierender Faktor für einen seriennahen Einsatz generativer Verfahren ist deren Leistungsfähigkeit, die beispielsweise durch kürzere erreichbare Prozesszeiten oder höhere Oberflächenqualitäten verbessert werden kann. Dabei besteht ein Bedarf, Produkte mit gleichförmig hoher Qualität und gezielt eingebrachten Materialeigenschaften und Materialstrukturen (z. B. Poren) herzustellen. Hierfür sind Verbesserungen an bestehenden Prozessmodellen, der Prozessführung und der Prozessüberwachung notwendig.
- **Kostensenkung**  
Für den breiteren wirtschaftlichen Einsatz generativer Fertigungsanlagen müssen die Kosten für die Anlagen sowie die dafür genutzten Materialien weiter reduziert werden.

Neben einer Fokussierung auf die Werkstoffe sowie die unmittelbaren Prozessanlagen sind Verbesserungen im Bereich der umliegenden Prozessschritte und der Systemintegration notwendig. Diese betreffen die:

- **Weiterentwicklung der Designinstrumente**  
Derzeit verfügbare computergestützte Designtechniken basieren auf Abwandlungen bestehender Instrumente für konventionelle Fertigungsverfahren. Neuentwicklungen für generative Fertigungsverfahren können beispielsweise Prozessspezifika wie die komplexen erreichbaren Geometrien, Multi-Materialprozesse oder die Einarbeitung einzelproduktindividueller Eigenschaften stärker aufgreifen.
- **Prozessautomatisierung**  
Generative Fertigungsverfahren besitzen mit Blick auf ihre Automatisierung im Vergleich zu konventionellen Verfahren einen vergleichsweise hohen Bedarf an manuellen Eingriffen. Hier kann verstärkte Automatisierung ein Ansatzpunkt zur

Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit sein. Eng damit verknüpft ist auch die stärkere Einbettung in die Industrie 4.0-Umgebung.

■ **Prozesskettenintegration**

Sowohl additive wie auch generative Fertigungsverfahren ergänzen sich in Abhängigkeit der jeweiligen Produkte und der Fertigungssituation. Prozessplanungsinstrumente müssen dahingehend unterstützen können, dass die für die jeweilige Zielstellung am besten geeignetsten Bearbeitungsverfahren passend kombiniert werden.

■ **Untersuchungsmethoden**

Durch die Art des Fertigungsprozesses besitzen die hergestellten Güter spezielle Materialeigenschaften. Klassische Untersuchungsmethoden sind häufig auf konventionell gefertigte Güter ausgerichtet und müssen unter anderem mit Blick auf die Untersuchung mechanischer Eigenschaften wie Steifigkeit, Schwingfestigkeit oder Gasdichtheit angepasst werden.

## Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GMBH; Tennet TSO GmbH; TransnetBW GmbH (Hrsg.) (2016): Szenariorahmen für die Netzentwicklungspläne Strom 2050. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber.
- ABB (Hrsg.) (2014): Technical note. IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors.  
[https://library.e.abb.com/public/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/TMO25%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1\\_lowres.pdf](https://library.e.abb.com/public/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/TMO25%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1_lowres.pdf). Letzter Zugriff: 13.04.2017.
- AGEB (Hrsg.) (2016): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014. Stand: 11.05.2016. AGEB.
- Allison, A.; Scudamore, R. (Hrsg.) (2014): 2014 Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda. AM SRA Final Document. AM Platform.
- Almeida, A. T. de; Ferreira, F. J. T. E.; Fong, J.; Fonseca, P. (2008a): EUP Lot 11 Motors. Final. Coimbra.
- Almeida, A. T. de; Ferreira, F. J. T. E.; Fong, J. A. C.; Brunner, C. U. (2008b): Electric motor standards, ecodesign and global market transformation.
- Almeida, A. de; Falkner, H.; Fong, J. A. C. (2014a): EuP Lot 30: Electric Motors and Drives. Task 8: ENER/C3/413-2010.
- Almeida, A. de; Falkner, H.; Fong, J. (2014b): EuP Lot 30: Electric motors and Drives. Task 4: Technical analysis existing products. ENER/C3/413-2010 Final June 2014.
- Almeida, A. de; Falkner, H.; Fong, J. (2014c): EuP Lot 30: Electric Motors and Drives. Task 6: Technical analysis of Best Available Technologies (BAT). ENER/C3/413-2010. Final. ISR - University of Coimbra; Atkins.
- Almeida, A. de; Falkner, H.; Fong, J.; Jugdoyal, K. (2014d): EuP Lot 30: Electric Motors and Drives. Task 2: Economic and Market Analysis. ENER/C3/413-2010. Final. ISR - University of Coimbra; Atkins.
- Almeida, A. T. de; Ferreira, F. J. T. E.; Baoming, G. (2014e): Beyond Induction Motors - Technology Trends to Move Up Efficiency. In: IEEE Transactions on Industry Applications 50 (3) 2103–2114.
- Almeida, A. T. de; Ferreira, F. J. T. E.; Duarte, A. Q. (2014f): Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors. In: IEEE Transactions on Industry Applications 50 (2) 1274–1285.
- Almeida, E. L. F. de (1998): Energy efficiency and the limits of market forces: The example of the electric motor market in France. In: Energy Policy 26 (8) 642–653.
- Beyer, C. (2014): Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufacturing. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering (136).
- Bundesregierung (Hrsg.) (2013): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordnete René Röspel, Andrea Wicklein, Dr. Ernst Dieter Ross-

- mann, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD - Drucksache 17/13586 - Stand und Perspektiven der Erforschung und des Einsatzes von 3D-Druckern.
- CEMEP (Hrsg.) (2010): Market share of EFF-motors in the scope of the Voluntary Agreement of CEMEP. European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics.
- DENEFF (Hrsg.) (2016): Branchenmonitor Energieeffizienz 2016. Berlin.
- DERA (Hrsg.) (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. DERA Rohstoffinformationen 28. [https://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie\\_Zukunftstechnologien-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Letzter Zugriff: 12.06.2017.
- DLR; Fraunhofer IWES; IfnE (Hrsg.) (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146. Stuttgart, Kassel, Teltow.
- Doppelbauer, M. (2011): The new EU-Mandate M/470 EN and IEC 60034-30 Energy Efficiency Classes. In: Proceedings of EEMODS'2011.
- EFI (Hrsg.) (2015): Gutachten 2015. Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands. Expertenkommission Forschung und Innovation. Berlin.
- Ferreira, F. J. T. E. (2008): Strategies To Improve The Performance of Three-Phase Induction Motor Driven Systems. Dissertation submitted for obtainment of the degree of Doctor in Electrical Engineering. Coimbra.
- Fleiter, T.; Schломann, B.; Eichhammer, W. (Hrsg.) (2013): Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Fraunhofer ISE (Hrsg.) (2013): Energiesystem Deutschland 2050. Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien.
- Fraunhofer IWES; Fraunhofer IBP; ifeu; Stiftung Umweltenergierecht (Hrsg.) (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor.
- Frost & Sullivan (Hrsg.) (2016): European Heat Pumps Market. Technology Innovation and Shifting Customer Requirements Drive New Wave of Growth.
- Greenpeace International; Global Wind Energy Council; SolarPowerEurope (Hrsg.) (2015): energy [r]evolution. A Sustainable World Energy Outlook 2015. 100 % Renewable Energy for All.

- Hettesheimer, T.; Roß, H. B.; Hirzel, S. (2016): Quantifying the overall impact of additive manufacturing on energy demand: the case of selective laser-sintering processes for automotive and aircraft components. In: Proceedings of the eceee industrial summer study (2016) 267–279.
- Hirzel, S.; Rohde, C.; Sontag, B. (2013): Industrielle Abwärmenutzung. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.  
<http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-270678.html>. Letzter Zugriff: 06.03.2017.
- Huang, R.; Riddle, M.; Graziano, D.; Warren, J.; Das, S.; Nimbalkar, S. et al. (2016): Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. In: Journal of Cleaner Production 135 (2016) 1559–1570.
- IEA (Hrsg.) (2016a): Energy Technology Perspectives 2016. Towards Sustainable Urban Energy Systems. OECD/IEA.
- IEA (Hrsg.) (2016b): Key World Energy Trends. Excerpt from: World energy balances 2016. IEA.
- IEA (Hrsg.) (2016c): World Energy Outlook 2016. Paris: OECD/IEA.
- ifo Institut (Hrsg.) (2017): Auswertung der online-Umfrage unter den BMWi-Forschungsnetzwerken vom April 2017, Teilbereich TF\_Energiewende. München.
- Kleefkens, O.; Spoelstra, S. (2014): R&D on Industrial Heat Pumps. Energy reserach Center of the Netherlands.  
<https://www.ecn.nl/publicaties/PdfFetch.aspx?nr=ECN-M--14-039>.
- Lambauer, J.; Fahl, U.; Ohl, M.; Blesl, M.; Voß, A. (2008): Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele. In: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart.
- Mecrow, B. C.; Jack, A. G. (2008): Efficiency trends in electric machines and drives. In: Energy Policy 36 (2008) 4336–4341.
- Moss, L.R; Zimas, E.; Willis, P.; Arendorf, J. et al. (2013): Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Report EUR 25994 EN. European Commission - Joint Reserach Centre - Institute for Energy and Transport.
- Müller, B. (2017): Seltene Erden - nicht mehr selten? In: Neue Energie (3) 58–61.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (Hrsg.) (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Peters, S. (Hrsg.) (2015): Additive Fertigung. Der Weg zur individuellen Produktion. Band 25 der Schriftenreihe der Technologieline Hessen-Nanotech des Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung.  
<http://www.hessen->

nanotech.de/mm/mm001/Volume\_025\_Additive\_Manufacturing\_web.pdf-  
Letzter Zugriff: 21.03.2016.

- Plötz, P.; Eichhammer, W. (2011): Zukunftsmarkt Effiziente Elektromotoren. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. FKZ 03KSW016A und B. Karlsruhe.
- Prognos; EWI; GWS (Hrsg.) (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Endbericht. Projekt Nr. 72/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.
- Rohde, C. (2016): Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2015 mit Aktualisierungen der Anwendungsbilanzen der Jahre 2009 bis 2012. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- Sanner, B.; Angelino, L.; De Gregorio, M.; Février, N.; Haslinger, W.; Kujbus, A. et al. (2013): Strategic Research and Innovation Agenda for Renewable Heating & Cooling. European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. Renewable Heating & Cooling - European Technology Platform. Secretariat of the European Technology Platform.  
[https://setis.ec.europa.eu/system/files/RHC\\_SRA\\_epo\\_final\\_lowres.pdf](https://setis.ec.europa.eu/system/files/RHC_SRA_epo_final_lowres.pdf).
- Sorrell, S.; Mallet, A.; Nye, S. (2011): Barriers to industrial energy efficiency: A literature review. Development Policy, Statistics and Research Branch Working Paper 10/2011. United Nations Industrial Development Organization. Wien.
- Spoelstra, S.; Tijani, M.E.H. (2005): Thermoacoustic heat pumps for energy savings. <ftp://130.112.2.101/pub/www/library/report/2005/rx05159.pdf>.
- UBA (Hrsg.) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2015. Umweltbundesamt (Für Mensch & Umwelt).
- UBA (Hrsg.) (2017): Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015. Umweltbundesamt. Dessau.
- VDI (2014a): Statusreport. Additive Fertigungsverfahren. September 2014. Verein Deutscher Ingenieure e. V.
- VDI (2014b): VDI 3405. Additive Fertigungsverfahren. Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Dezember 2014. Verein Deutscher Ingenieure e. V. Berlin.
- Wietschel, M.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Krewitt, W.; Markewitz, P. et al. (Hrsg.) (2010): Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Technologiebericht. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Wolf, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.; Jakobs, R. (2014): Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland. Forschungsbericht. In: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart.
- Wolf, S.; Lambauer, H.; Blesl, M.; Fahl, U.; Voß, A. (2012): Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers. In: Pro-

ceedings of the eceee 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry. 543–550.

World Energy Council (Hrsg.) (2016): World Energy Scenarios 2016. The Grand Transition.

Wuppertal Institut (Hrsg.) (2017): Auswertung des Interaktiven Workshops TF\_Energiewende im Rahmen der BMWi-Konferenz - Zukunft der Energieforschung in Deutschland vom 02. Mai 2017. Wuppertal.

Zhang, J.; Zhang, H.-H.; He, Y.-L.; Tao, W.-Q. (2016): A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China. In: Applied Energy 178 (2016) 800–825.