

Fraunhofer Institut
Systemtechnik und
Innovationsforschung

Innovationen und Luftschadstoffemissionen

Eine gesamtwirtschaftliche Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Rahmenbedingungen bei expliziter Modellierung der Technologiewahl im Industriesektor

Bundesministerium für Bildung und Forschung
unter dem Programm:

*Rahmenbedingungen für Innovationen
zum nachhaltigen Wirtschaften (riw)*

Zwischenbericht - Dokumentation Stahlindustrie

**Fraunhofer Institut für Systemtechnik
und Innovationsforschung**

Dr. rer. pol. Joachim Schleich
(Projektleitung)
Dipl. Wirtsch.-Ing. Carsten Nathani
Dipl. Volksw. Katrin Ostertag
Dipl. Ing. Michael Schön
Dr. rer. pol. Rainer Walz

Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe
Tel.: 0721/6809-203
Fax. 0721/6809-272
Email: schleich@isi.fhg.de

**Gesellschaft für Wirtschaftliche
Strukturforschung mbH (GWS)**

Prof. Dr. rer. pol. Bernd Meyer
Dr. rer. pol. Christian Lutz
Dipl. Volksw. Martin Distelkamp
Dipl. Volksw. Marc-Ingo Wolter
Dipl. Kfm. Frank Hohmann

Weissenburger Str. 4
49076 Osnabrück
Tel.: 0541/409-3312
Fax. 0541/409-3311
Email: meyer@gws-os.de

Karlsruhe, April 2002

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Zielsetzung und Hintergrund	1
2 Modellierung des technischen Fortschritts und der Technologiewahl	5
3 Implementierung des neuen Modellierungsansatzes für die Stahlindustrie.....	9
3.1 Hintergrund und technische Entwicklungen im Betrachtungszeitraum	9
3.2 Dokumentation und Vorgehen bei der Datengenerierung	13
3.3 Modellierung für die Stahlindustrie.....	15
3.4 Simulationen und erste Ergebnisse	23
3.1 CO ₂ -Steuer	23
3.2 Senkung des Schrottpreises	28
3.5 Zusammenfassung und Ausblick.....	29
4 Literatur	33
Anhang: Schätzergebnisse für die Stahlindustrie	39

1 Zielsetzung und Hintergrund

Ziel des Projekts ist eine methodisch verbesserte Modellierung des technischen Fortschritts. Dazu werden für ausgewählte energieintensive Branchen des ökonomischen Input-Output Modells PANTA RHEI die zugrunde liegenden technologischen Prozesse in einer modellkonsistenten Systematik abgebildet. Ein weiteres innovatives Element besteht darin, dass technischer Fortschritt auf das modellierte Entscheidungsverhalten bei der Technikwahl zurückgeführt werden kann. Die gewählte Modellierung erlaubt nicht nur eine verbesserte Abschätzung der durch Politikmaßnahmen ausgelösten gesamtwirtschaftlichen und der umweltrelevanten Wirkungen, sondern auch eine Bewertung der Innovationseffekte. Außerdem lässt sich politik-induzierter, technischer Fortschritt explizit auf Technologien zurückführen.

Modellgestützte empirische Analysen der Wirkungen von umweltpolitischen Instrumenten existieren insbesondere für den Bereich Klimaschutz, wobei sich die Modellierung von Rahmenbedingungen in der Regel auf preisliche Instrumente konzentriert. In der Regel vollzieht sich in diesen Modellen technischer Fortschritt autonom, d. h., endogener, politik-induzierter technischer Fortschritt nach Hicks (1932) wird nicht abgebildet.¹ Selbst in Modellen, die technischen Fortschritt preisinduziert ermöglichen, erfolgt dies ohne Anbindung an Technologien, die für die technische Weiterentwicklung verantwortlich sind. Die Wirkungen der Instrumente auf Innovationen hängen allerdings entscheidend von der Modellierung der Technologie und des technischen Fortschritts ab. Dabei werden in den neoklassisch geprägten allgemeinen Gleichgewichtsmodellen explizit CES-Produktionsfunktionen für die einzelnen Branchen unterstellt und daraus kostenminimierende Faktornachfragefunktionen abgeleitet (z. B. Welsch 1996, Böhringer 1999). Die durch steuerliche oder andere Maßnahmen ausgelösten Änderungen der Faktorpreisrelationen bewirken hier Substitutionsprozesse. Der technische Fortschritt bleibt bei dieser Modellierung meist exogen und spiegelt sich in Form eines autonomen trendmäßigen Zuwachses wider.² Im Gegensatz dazu führt die Berücksichtigung

¹ Ausnahmen bilden hier Carraro 1998, Nordhaus 1999, Goulder/Mathai 2000 oder Buonananno/Carraro/Galeotti 2001. Siehe Löschel (2001) für eine neuere Übersicht zur Abbildung von technischem Fortschritt in umweltökonomischen Modellen.

² Bei Politiksimulationen spielt dieser autonome technische Fortschritt eine wichtige Rolle, insbesondere bei der Bestimmung der „Baseline-Szenarien“. Beispielsweise sind in Modellen zur Berechnung der Kosten des Klimaschutzes unterschiedliche Modellergebnisse zu einem Großteil auf unterschiedliche Annahmen über die Entwicklung des autonomen technischen Fortschritts zurückzuführen (Weyant 1993, Jaffe/Newell/Stavins 2000).

von politik-induziertem technischem Fortschritt in Modellrechnungen zu niedrigeren Vermeidungskosten.³

Auch die Versuche, über technisches Wissen, das durch akkumulierte Forschungs- und Entwicklungsausgaben gebildet wird, eine Endogenisierung des technischen Fortschritts zu erreichen, scheitern daran, dass die Auswirkungen auf die komplexen Inputstrukturen unbekannt sind. In jüngeren empirischen Arbeiten wird allenfalls untersucht, welchen Einfluss FuE-Aktivitäten, die beispielsweise durch Patentbestand oder Lizenzgebühren erfasst werden, auf die langfristige Produktionsfunktion haben (Jungmittag/Blind/Grupp 1999). Im neoklassischen Ansatz tritt das technische Wissen neben die üblichen Variablen in Form akkumulierter FuE-Ausgaben in die substitutionale Produktionsfunktion (so z. B. Goulder/Schneider 1999). Über das aus der Optimierung ableitbare System von Faktornachfragefunktionen lassen sich dann auch die FuE-Aktivitäten endogenisieren.

Weitere Kritik in Bezug auf die Abbildung von technischem Fortschritt in allgemeinen Gleichgewichtsmodellen entzündet sich am postulierten Typ der neoklassischer Produktionsfunktionen, die unbegrenzte Faktorsubstitutionsmöglichkeiten bedingen. Realistischerweise sind die Substitutionsmöglichkeiten aber begrenzt. Insbesondere die großen industriellen „Energieverbraucher“ wie die Elektrizitätswirtschaft, die Stahlerzeugung, die Produzenten von NE-Metallen, die Zementindustrie oder die Papierherstellung lassen sich durch begrenzte Produktionsverhältnisse vom Typ „putty-clay“ charakterisieren.⁴ Bei Produktionsfunktionen diesen Typs besteht bei der Investitionsentscheidung eine Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen in sich limitationalen Prozessen, während die Inputstruktur der bestehenden Anlagen nicht mehr verändert werden kann.

Allein Vögele (2000) hat für die Elektrizitätswirtschaft Baden-Württembergs eine detaillierte prozessorientierte Modellierung vorgestellt, die in ein einfaches makroökonomisches Modell integriert ist. Die Ergebnisse seiner Simulationsrechnungen unterstreichen die Sinnhaftigkeit des Ansatzes. Zusammenfassend lässt sich aber festhalten, dass zum einen Innovation und technischer Fortschritt in den vorherrschenden Modellen nur oberflächlich abgebildet werden (Frohn et al. 1999, Hemmelskamp 1999, FIU Clearingstudie 1996, S. 65), und dass zum anderen die Annahme vollkommener Faktorsubstitution die tatsächlichen Produktionsprozesse in vielen Produktionsbereichen nicht korrekt widerspiegelt.

³ Eine andere Form endogenen technischen Fortschritts ergibt sich aus sogenannten learning-by-doing Effekten, die ceteris paribus frühzeitige Investitionen in Minderungsmaßnahmen hervorgerufen (van der Zwaan et al. 2002, Goulder/Matthai 2000).

⁴ Gilchrist/Williams (2000) schätzen den Anteil der putty-clay Technologien an der gesamten industriellen Produktion auf 50 % and 70 %, wobei der Anteil in energieintensiven Sektoren noch größer ist.

Der im Rahmen dieses Projekts implementierte Modellierungsansatz greift diese Kritikpunkte in zweifacher Weise auf:

- technischer Fortschritt wird prozessbezogen und politik-induziert abgebildet;
- die Technologiewahl zwischen limitationalen Prozessen wird explizit modelliert.

Zusätzlich wird untersucht inwiefern Hemmnisse, die die Implementierung energie- und kosteneffizienter Technologien behindern können, die Technologiewahl beeinflussen.⁵ Eine Einbindung dieser Hemmnisse in quantitativen Modellen scheitert in der Regel auch daran, dass Variablen, die die jeweiligen Hemmnisse adäquat widerspiegeln sich nur schwer definieren lassen. Im gewählten ökonomischen Input-Output Modell müssten diese Variablen zudem als Zeitreihe vorliegen. In einem ersten Ansatz wird auf der Basis mikroökonomischer Überlegungen die Hypothese getestet, ob X-Ineffizienzen auf der Seite potenzieller Anwender einer energiesparenden Technologie den technischen Fortschritt behinderten. X-Ineffizienzen entstehen verstärkt bei mangelndem Wettbewerbsdruck.⁶ Unter solchen Umständen können Unternehmen vom Einsatz der kosteneffizientesten Produktionstechnologie absehen, ohne auf Dauer vom Markt gedrängt zu werden. Als Indikator der Wettbewerbsstärke kann zum einen die Konzentration in einem Sektor gelten. Dabei wird unterstellt, dass die Wettbewerbsintensität mit steigender Konzentration abnimmt. Als Konzentrationsmaß wurde der Herfindahl-Hirschmann-Index. Da allerdings der Zusammenhang zwischen Konzentration und Wettbewerbsintensität in der Theorie nicht ganz eindeutig ist – verwiesen sei hier z. B. auf Oligopolmodelle mit sehr starkem Wettbewerb – wurde alternativ ein zweiter Indikator für die Wettbewerbsintensität verwendet, nämlich das Verhältnis von Importen zur heimischen Erzeugung.

Durch modellgestützte Simulationsrechnungen werden dann die Wirkungen veränderter Rahmenbedingungen abgeschätzt. Dabei werden nicht nur die Auswirkungen auf das Sozialprodukt und die Umwelt betrachtet, sondern auch quantitative und qualitative Arbeitsplatzeffekte in einem konsistenten Modellrahmen untersucht. Bei der Analyse der qualitativen Arbeitsplatzeffekte geht es vor allem darum, die Auswirkungen der staatlichen Interventionen auf Qualifikations- und Ausbildungsniveau oder Tätigkeitsmerkmale zu untersuchen. Gleichzeitig wird eine modellgestützte, frühzeitige Wahrnehmung der durch die Innovationen ausgelösten Anpassungserfordernisse, z. B. im Hinblick auf die sektorale Verteilung der Produktion

⁵ Zu diesen Hemmnissen, die in zahlreichen Fallstudien dokumentiert sind und die eine sogenannte „Effizienzlücke“ zur Folge haben können, zählen beispielsweise auch Informationskosten und andere Transaktionskosten, begrenzte Rationalität oder asymmetrische Information (z. B. de Almeida 1998; DeCanio 1993, 1997; Eyre 1997; Jaffe/Stavins 1994a, 1994b, Jochem/Gruber 1990) sowie zahlreiche Faktoren, die unter dem Schlagwort „weiche Kontextfaktoren im FIU-Programm diskutiert wurden (Klemmer et al. 1999).

⁶ Siehe auch Ostertag, K. (2002).

oder das Bildungssystem erreicht. Das heißt, einem Verständnis umfassender Nachhaltigkeit entsprechend, werden nicht nur Umweltaspekte, sondern auch die wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen berücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst in allgemeiner Form dargestellt, wie die methodisch verbesserte Modellierung des technischen Fortschritts und der Technologiewahl im Rahmen des Projekts erfolgt. Danach wird der Stand der Implementierung des neuen Modellierungsansatzes am Beispiel der Rohstahlerzeugung exemplarisch vorgestellt. Dazu werden zum einen die für den Betrachtungszeitraum relevanten Produktionsverfahren erläutert und zum anderen die Vorgehensweise bei der Datenerhebung beschrieben.

2 Modellierung des technischen Fortschritts und der Technologiewahl

Das ökonometrische Input-Output-Modell PANTA RHEI, das im Rahmen dieses Projekts verwendet wird, unterstellt - im Gegensatz zu Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen auf Basis von CES-Funktionen - Limitationalität in den einzelnen Branchen. Allerdings werden die Inputkoeffizienten preisabhängig modelliert, was dann nicht als das Ergebnis von Substitution sondern von kosteninduziertem technischem Fortschritt, der zu Änderungen in der Prozesswahl führt, interpretiert wird (Meyer et al. 1999). Die realen technologischen Gegebenheiten der einzelnen Prozesse werden bisher aber nicht sichtbar. Um in der verbesserten Modellierung die zugrundeliegenden Technologien abzubilden, werden im Rahmen des Projekts für die verschiedenen technologischen Paradigmen (vgl. z .B. Dosi 1982, 1988, S. 224) zunächst für den historischen Beobachtungszeitraum die detaillierten Inputstrukturen sowie der prozessspezifische Energiebedarf der jeweiligen best-practice Technologien - die sogenannten Trajektorien - abgeschätzt. Für Projektionen wird auf Basis von Tiefeninterviews mit Technikexperten davon ausgegangen, dass für den Analysezeitraum (bis 2030) die naturwissenschaftlichen Grundlagen zur Lösung der technologischen Probleme bei den betrachteten Produktionsprozessen prinzipiell heute schon bekannt sind.

Die Taxonomie Pavitts (1984) und die Analysen von Pavitt/Robson/Townsend (1986) haben gezeigt, dass die Bedingungen des Entstehens des technischen Fortschritts sowie seine Auswirkungen in den einzelnen Sektoren der Volkswirtschaft höchst unterschiedlich sind (Rahmeyer 1993). Der empirische Befund bei den genannten energieintensiven Sektoren legt nahe, dass die Unternehmen hinsichtlich der Charakterisierung des technischen Wandels im Sinne Pavitts (1984) eindeutig als „supplier dominated firms“ anzusprechen: Die Unternehmen leisten selbst nur einen geringen Beitrag zur Innovation. Stattdessen realisieren sie technischen Fortschritt, der vor allem in Prozessinnovationen besteht, durch den Einsatz neuer Kapitalgüter. Zur Überprüfung dieser These wird im Rahmen dieses Projekts auch untersucht, ob ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen F&E-Aufwendungen der Branche und der beobachteten Energieeffizienz besteht. Dosi (1988, S.232) betont, dass in diesen supplier dominated Branchen der Innovationsprozess in erster Linie ein Prozess der Diffusion von best-practice Kapitalgütern ist, der sich somit durch die Investitionstätigkeit in der Branche vollzieht. In Anlehnung an Silverberg (1988, S. 543f) wird bei der Modellierung der Investitionsentscheidung im Prinzip davon ausgegangen, dass bei Vorliegen einer putty-clay Technologie die Unternehmen mit ihrer Technologiewahl im Rahmen ihrer Investitionsentscheidung nicht sehr weit hinter der best-practice Technologie zurück bleiben.

Für die Modellimplementierung wurden daher auch paradigmenspezifische Zeitreihen für die Input-Vektoren der jeweiligen best-practice Technologien der verschiedenen technologischen Paradigmen berechnet, die als Basis für die Technologiewahl dienen. Die Fortschreibung der Inputstrukturen der ausgewählten energieintensiven Sektoren geschieht wie folgt: In jedem Jahr ergibt sich der Vektor der Inputkoeffizienten als gewogenes Mittel der Inputkoeffizienten des Vorjahres und der Inputkoeffizienten der Technologie, die bei der Investitionsentscheidung ausgewählt abzüglich der Inputkoeffizienten der Technologien, die als Abgänge den Kapitalbestand verlassen. Gewichte sind dabei der Anteil des Kapitalstocks der Vorperiode und der aktuellen Investitionen bzw. der Abgänge am Kapitalstock des laufenden Jahres.

Die Technologiewahl findet im Rahmen der Investitionsentscheidung des betrachteten Sektors statt, deren Modellierung die Erfassung der jeweiligen sektorspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen hat. Grundsätzlich wird von beschränkter Rationalität der Agenten ausgegangen. Dabei wird auch untersucht, inwiefern Hemmnisse, die die Implementierung energie- und kosteneffizienter Technologien behindern können, eine Rolle spielen. Konkret wird die Hypothese getestet, ob mangelnder Wettbewerbsdruck in einer Branche einen statistisch signifikanten negativen Einfluss auf den technischen Fortschritt hat.

Die Sektoren Maschinenbau und Elektrotechnik zählen in der Taxonomie Pavitts zu den „specialized suppliers“, deren Innovationsaktivitäten vornehmlich aus Produktinnovationen bestehen, die in den Abnehmersektoren als Kapitalinputs eingesetzt werden. Die Modellierung der Innovationsaktivitäten der Sektoren Maschinenbau und Elektrotechnik richtet sich auf die Abbildung der Trajektorien (Nelson und Winter 1982), die innerhalb der technologischen Paradigmen möglich sind. Man bezeichnet diesen Zusammenhang auch als inkrementale Innovationen im Gegensatz zu den Basisinnovationen. Die Fortschreibung dieser Trajektorien in die Zukunft erfolgt im gewählten Modellierungsansatz endogen auf Basis der ökonometrischen Schätzgleichungen für die Inputkoeffizienten der best-practice-Technologien.⁷

Die akkumulierten FuE-Ausgaben der Investitionsgüterhersteller sind ein Maß für die Innovationsaktivitäten dieser Branchen. Bei der Modellierung der Innovationsentscheidungen der Sektoren Maschinenbau und Elektrotechnik in F&E wird nicht davon ausgegangen, dass diese das Ergebnis eines gewinnmaximalen vollkommen rationalen Entscheidungsprozesses sind. Stattdessen wird, wie bei Nelson/Winter (1982,) angenommen, dass infolge begrenzter Rationalität (Simon 1947) einfache Faustregeln und Entscheidungsroutrinen (z. B. Abhängigkeit des F&E-Volumens vom Umsatz) die F&E-Ausgaben der Investitionsgüterhersteller bestimmen. Empi-

⁷ Eine alternative Vorgehensweise bestünde darin, die Fortschreibung der technologischen Paradigmen exogen auf der Basis von Expertenbefragungen vorzugeben.

rische Arbeiten (Meyer/Keuter/Voßkamp 1993, Keuter 1994, Vogt 1997) belegen, dass das Satisficing-Verhalten besonders gute Erklärungen für die Innovationsaktivitäten der Unternehmen liefert.

Da die FuE-Ausgaben, die nur auf aggregiertem Niveau vorliegen, nicht direkt den verschiedenen technologischen Paradigmen zugerechnet werden können, ist eine direkte Endogenisierung der Trajektorien der verschiedenen technologischen Paradigmen allein über die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Maschinenbaus und der Elektrotechnik allerdings nicht möglich. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die Produzenten der Investitionsgüter ihre Forschungsanstrengungen darauf richten, im Rahmen des jeweils gegebenen Paradigmas möglichst solche Investitionsgüter anzubieten, die die Produktionskosten bei den abnehmenden Branchen (z. B. Stahlerzeugung.) minimieren (Erdmann 1993, S. 69ff).⁸

Ausgehend von den best-practice Trajektorien der verschiedenen technologischen Paradigmen, die durch eine Zeitreihe politikabhängiger (preisabhängige) paradigmenpezifischer Inputkoeffizienten modelliert werden, lässt sich der Zusammenhang zwischen dem Kostendruck und der Innovation ökonometrisch schätzen und für die Endogenisierung des technischen Fortschritts im Modell einsetzen. Das Niveau der Innovationsaktivitäten wird in diesen Regressionen dann durch die FuE-Ausgaben der Investitionsgüterhersteller erfasst. Die geschilderten Preismechanismen geben die Richtung ihrer Wirkungen auf die konkrete Ausgestaltung der best-practice Technologien an.

⁸ Diese Annahme wird beispielsweise durch die Ergebnisse der empirischen Arbeit von Grupp (1999), wonach Entwicklung der relativen Preise einen signifikanten Einfluss auf die Patentanmeldungen zur Ressourcen- und Energieeinsparung hat, unterstützt. Neuere empirische Untersuchungen zeigen weiterhin, dass Absatzmärkte und „direkte Kundenbeziehungen für den Innovationsprozess bei weitem bedeutender sind als die systematische Erforschung des anonymen Marktes“ (Czarnitzki et al. 2000, S. 6). Dies gilt insbesondere für den Sektor Elektrotechnik, wo 76 % der Unternehmen Absatzmärkte als Innovationsquelle nutzen. Was umweltrelevante Innovationen betrifft, so ist außerdem davon auszugehen, dass Emissionsstandards, die von der Politik gesetzt werden, die Richtung der Forschung und Entwicklung leiten.

3 Implementierung des neuen Modellierungsansatzes für die Stahlindustrie

Als erste von insgesamt drei im Rahmen des Forschungsprojekts zu untersuchenden Anwendungsbereichen wird der im vorangegangenen Abschnitt dargelegte Modellierungsansatz für die Erzeugung von Rohstahl implementiert. Zunächst erfolgt eine kurze Beschreibung der wichtigsten Technologien und im Anschluss werden die Methoden zur Erstellung der im Rahmen des Projekts benötigten Zeitreihen an Daten vorgestellt. Es folgt die Dokumentation der bereits erfolgten Implementierung für die Stahlindustrie im Modell PANTA RHEI. Darauf aufbauend werden erste Simulationsergebnisse auf der Basis des zur Zeit noch vorläufigen Datenstandes vorgestellt. Die Möglichkeiten des erweiterten Modells werden beispielhaft demonstriert, indem die Wirkungen einer Änderung des für die Technologiewahl in der Stahlindustrie wichtigen Schrottpreises simuliert werden.

Abschließend werden Wege aufgezeigt, wie die Modellierung für die Stahlerzeugung im Rahmen des geschilderten Ansatzes weiter verbessert werden kann und welche zusätzlichen Datenerfordernisse damit einhergehen.

3.1 Hintergrund und technische Entwicklungen im Betrachtungszeitraum

Die beiden wichtigsten Verfahrenslinien zur Rohstahlerzeugung in Deutschland sind die

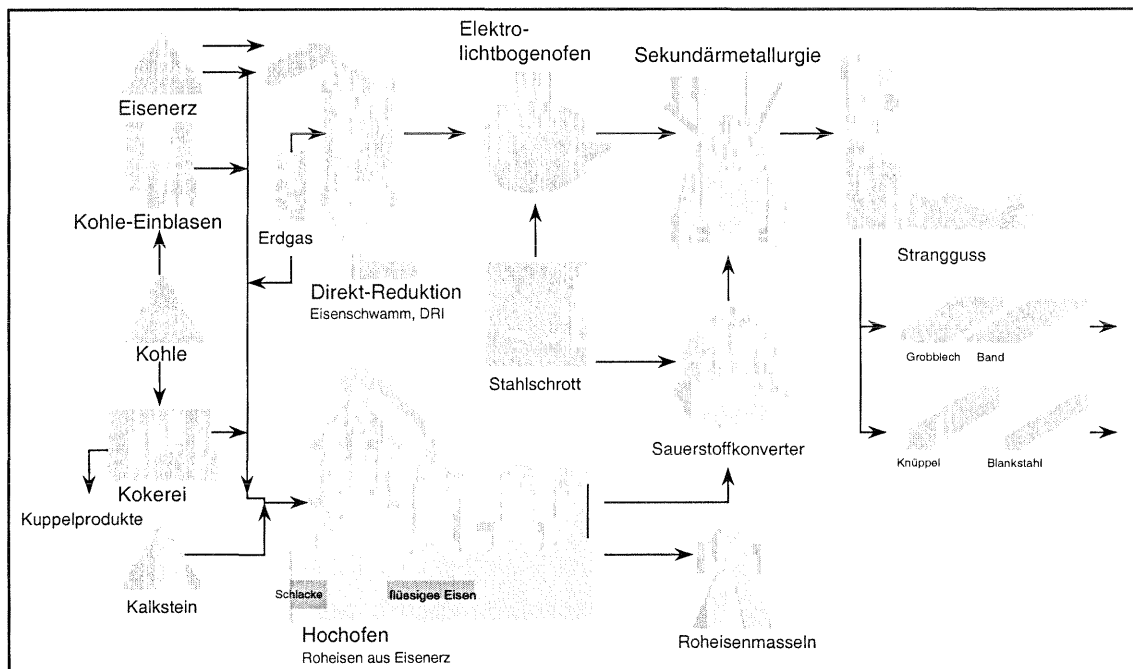
- **Oxygenstahlerzeugung**, i. e., der Verfahrensweg zur Erzeugung von Primärmaterial auf der Linie Sinteranlage (Erzaufbereitung) / Kokerei – Hochofen (Roheisenerzeugung) – Konverter (Stahlerzeugung), sowie
- **Elektrostahlerzeugung**, i. e. der Verfahrensweg zur Erzeugung von Sekundärmaterial in erster Linie im Elektrolichtbogenofen (in geringerem Umfang in Induktionsöfen) auf Basis von eingeschmolzenem Schrott.

Schrott wird auch (in geringeren Mengen) bei der Oxygenstahlerzeugung zur Temperaturregelung des exothermen Konversionsprozesses im Konverter eingesetzt. Auch bei der Elektrostahlerzeugung kann Primärmaterial eingesetzt werden. Ein Beispiel ist die in Deutschland an nur einem Standort praktizierte *Direktreduktion* von Eisenerz mittels Erdgas zu *Eisenschwamm*, der im Elektrostahlprozess eingesetzt wird.

Anschließende Verfahrensschritte bestehen in der *Pfannenmetallurgie* zur Nachbehandlung des flüssigen Rohstahls (Einstellung der Materialeigenschaften und Legierungszusammensetzung) sowie dem Gieß- und Walzprozess. Diese Verfahrensschritte werden in der hier vorgenommenen modellmäßigen Betrachtung ausgeklammert, da hier keine gravierenden Unterschiede zwischen Oxygen- und Elektrostahlerzeugung bestehen. Bei diesen Verfahrensschritten wurden aber in den letzten 30 Jahren enorme energetische Verbesserungen erzielt.

Eine vereinfachte Übersicht über mögliche Wege der Stahlerzeugung gibt Abbildung 3.1-1

Abbildung 3.1-1: Übersicht Stahlerzeugungsverfahren

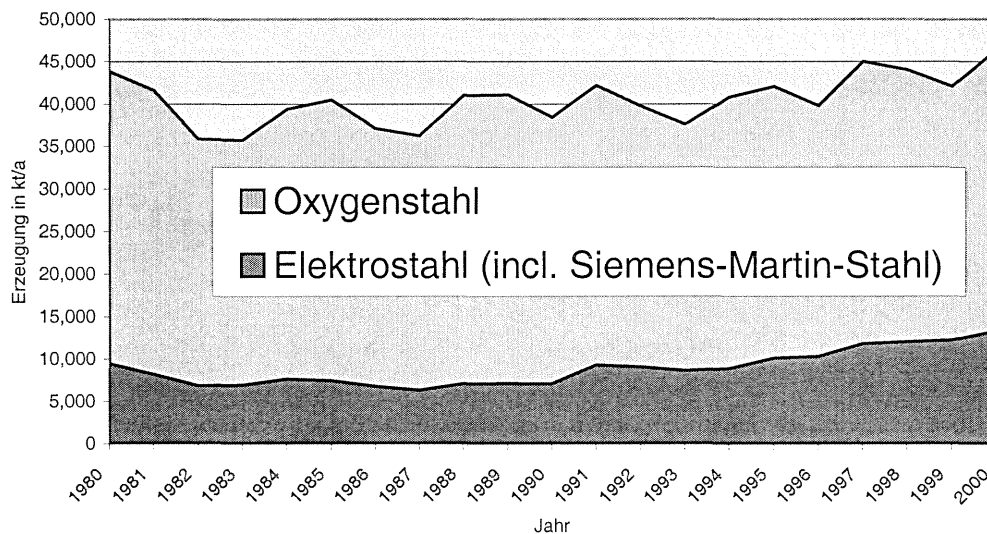


In Deutschland seit der zweiten Hälfte der 70er Jahre nicht mehr betrieben ist das **Thomasstahlverfahren**. Das **Siemens-Martin-Verfahren** wurde Anfang der 80er-Jahre eingestellt, Produktionskapazitäten in der ehemaligen DDR wurden kurz nach der Wende stillgelegt.

Weltweit sind eine Reihe von Verfahrensalternativen in der Entwicklung bzw. bereits in Anwendung. Vor allem verschiedene Varianten des **Schmelzreduktionsverfahrens**, wozu z. B. in Japan Erfahrungen vorliegen, sind in diesem Zusammenhang zu erwähnen. Für den Standort Deutschland dürfte diesen Verfahren mittelfristig aber keine große Bedeutung beizumessen sein.

Die Entwicklung der Produktionsmengen in Deutschland, differenziert nach Verfahren, zeigt Abbildung 3.1-2. Während die Produktion von Oxygenstahl in den letzten 20 Jahren stets um die 30 Mio. t/a schwankte, nahm die Elektrostaahlproduktion kontinuierlich von rund 6,5 Mio. t im Jahr 1980 auf mittlerweile über 13 Mio. t zu.

Abbildung 3.1-2: Rohstahlerzeugung nach Verfahren



Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl / VDEH, div. Jahrgänge

Eine umfassende energetische Bewertung der Oxygenstahlerzeugung bzw. ihrer CO₂-Emissionen geben Aichinger et al. (2001). Eine ausführliche Betrachtung des elektrischen Energieverbrauchs der Elektrostaahlherzeugung (Lichtbogenöfen) ist Köhle (1992) zu entnehmen.

Die technische Entwicklung in der Stahlindustrie war in der Vergangenheit durch eine Konzentration auf wenige und leistungsfähigere Produktionsanlagen gekennzeichnet. Gab es im Jahr 1970 noch 104 Hochofenanlagen in der Bundesrepublik, sank diese Zahl auf 80 im Jahr 1980, bzw. auf 42 in 1990. Im Jahr 2000 waren es nur noch 22, wovon allerdings nur 16 tatsächlich betrieben wurden. Die Anzahl von Oxygenstahl-Konvertern sank im Zeitraum zwischen 1980 und 2000 von 47 auf 26, die der Elektro-Lichtbogenöfen von 71 auf 29 (WV Stahl/VDEH, div. Jahrgänge; VDEH 2002).

Technische Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, die sich in der zeitlichen Veränderung der Trajektorien widerspiegeln, betrafen unter anderen:

- die Verringerung des Reduktionsmittelverbrauchs bei der Roheisenerzeugung, z. B. die Teil-Substitution von Koks (gleichzeitig Reduktionsmittel, Energielieferant und „Stützgerüst“ für die Gasströmung im Hochofen und als solches nur begrenzt zu ersetzen; vgl. Ameling 2001) durch eingeblasene Steinkohle, Schweröl oder Altkunststoffe,
- Maßnahmen im Bereich der Kuppelenergiewirtschaft integrierter Hüttenwerke, wie verstärkte Konvertergasnutzung,
- diverse Maßnahmen im Bereich der Kokereien und der Sinteranlagen,
- regelungstechnische Maßnahmen und Optimierung der Energieversorgung in Elektrostahlwerken,
- weitgehende Einführung des Stranggussverfahrens (im Rahmen der modellmäßigen Betrachtungen ausgeklammert) und Weiterentwicklung zu endabmessungsnahen Gießverfahren bzw. Gießwalzen.

Indirekt energiesparende Maßnahmen bestehen in der werkstofftechnischen Entwicklung von Stählen für den Einsatz im Leichtbau, z. B. im Automobilssektor (vgl. z. B. Prange/Schneider 2001) oder in der Verwendung des Nebenproduktes Hütten-sand für die Zementherstellung. Die Maßnahmen der Stahlindustrie zur Verminderung des Energieverbrauchs und damit zum Klimaschutz werden regelmäßig in den Monitoring-Berichten zur Klimaschutzzerklärung der deutschen Industrie dokumentiert, zuletzt in Buttermann und Hillebrand (2000). Auch künftig setzt die Branche auf derartige Maßnahmen. In ihrer erweiterten Erklärung zur Klimavorsorge werden als beabsichtigte Maßnahmen genannt (vgl. Ameling/Aichinger 2001):

- *Prozessinnovationen, Verfahrens- und Strukturwandel*
 - Konzentration und Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Roheisen- und Oxygenstahlerzeugung,
 - Prozessinnovationen in der Hochofen- und Oxygenstahltechnologie sowie Sekundärmetallurgie,
 - Modernisierung und Neubau von Elektrostahlwerken mit Zunahme des Elektrostahlanteils,
 - Prozessinnovationen in der Elektrostahltechnologie einschließlich Sekundärmetallurgie,
 - Einführung von neuen ressourcenschonenden Gießwalzverfahren für Flachprodukte und Profile,
 - Verstärkter Software-Einsatz zur Steuerung, Regelung und Überwachung von Prozessen und Anlagen,
 - Verkettung von bisher getrennt arbeitenden Erzeugungsanlagen (Multi-Processing-Line).

- *Energetische und energie- und stoffwirtschaftliche Maßnahmen*
 - ständige energetische Prozessoptimierung,
 - Optimierung der Kuppelenergiewirtschaft und des Energieverbundes,
 - Ausführung von Energierückgewinnungsmaßnahmen,
 - Ausführung von Abwärmeprojekten,
 - CO₂-mindernde Energieträgersubstitution,
 - metallurgische und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Erhöhung des Stoffausbringens in allen Produktionsprozessen,
 - Erhöhung des Aufbereitungsanteils des Nebenproduktes Hochofenschlacke als Rohstoffsubstitut Hüttensand/Granulat zur Zementherstellung.

Die dargestellte technologische Entwicklung bedeutet für die modellgerechte Umsetzung des vorgestellten Modellierungskonzepts, dass die beiden Rohstahlerzeugungslinien Oxygenstahl – und Elektrostahl abzubilden sind. Zur Darstellung der Trajektorien dieser beiden technologischen Paradigmen sind Zeitreihen der Inputstrukturen der jeweiligen best-practice Technologien des Beobachtungszeitraums anzulegen. Außerdem werden paradigmen-spezifische Angaben zu Produktionsmengen, Produktionswerten, Investition, Anlagevermögen und Kapazitätsentwicklung benötigt. Um den Einfluss von Wettbewerbsdruck auf die Technologiewahl zu untersuchen, werden Daten zur industriellen Konzentration und zum Importdruck erhoben.

3.2 Dokumentation und Vorgehen bei der Datengenerierung

Für die Modellierung der beiden Rohstahlerzeugungslinien wurden physische Inputfaktoren und ihre zeitliche Entwicklung zwischen 1980 und 2000 geschätzt. Hierzu waren eine Reihe von Annahmen erforderlich, denn die Energieverbrauchswerte werden statistisch nicht getrennt nach diesen beiden Paradigmen ausgewiesen. Folgende Annahmen wurden getroffen.

- Der hauptsächlich in Nebeneinrichtungen anfallende elektrische Stromverbrauch der Oxygenstahlerzeugung (Rohstahl) einschließlich der vorgelagerten Prozessschritte wurde vernachlässigt.
- Der elektrische Stromverbrauch der Walzwerke wurde in erster Näherung als unabhängig von der Art der Rohstahlerzeugung angesehen und deshalb bei der Modellierung nicht berücksichtigt.
- Der betrachtete Verbrauch fossiler Energieträger der Oxygenstahlerzeugung umfasst den Verbrauch von Kokereien und Sinteranlagen, der Hochofenbetriebe und der Stahlwerke. Die statistisch verfügbaren Angaben zum Verbrauch fossiler Energieträger (WV Stahl/VDEH, mehrere Jahrgänge) beinhalten außerdem den

Verbrauch von Walzwerken (z. B. Walzwerksöfen) und den der Elektrostahlwerke. Die letztgenannten Anteile mussten technologisch geschätzt und die Zeitreihen um diese bereinigt werden.

- Der Stromverbrauch der Elektrostahlerzeugung wurde aus Literaturangaben zum Schmelzstromverbrauch von Elektro-Lichtbogenöfen (Köhle 1992) abgeleitet, der Verbrauch von Nebeneinrichtungen wurde dabei wie im Bereich der Oxygenstahlerzeugung nicht berücksichtigt. Grundlage waren Messergebnisse aus dem Jahr 1991, die an 14 repräsentativen Öfen ermittelt worden waren. In Anlehnung an Berechnungen des RWI (Buttermann 1991) und unterstützt durch Experteneinschätzungen wurde eine jährliche Effizienzsteigerung von 1 % unterstellt, womit sich Zeitreihen von 1980 bis 2000 ergaben.
- Angesichts des Konkurrenzdruckes, unter dem die deutsche Stahlindustrie steht, sowie der hohen Energiekostenanteile an den Produktionskosten kann nach Aussage von Branchenvertretern (VDEH 2001) davon ausgegangen werden, dass in den deutschen Stahlwerken ein vergleichsweise hohes Maß an Energieeffizienz bereits erreicht und die Effizienzunterschiede zur sog. „best-practice“ nur gering sein dürften. Da der tatsächliche Energieverbrauch stark von standortspezifischen Gegebenheiten abhängt, sind quantitative Angaben jedoch nicht möglich. Das geschätzte Energieeinsparpotential durch Anwendung von „best-practice“-Technologie kann daher nur grob eingegrenzt werden. Im Bereich der Oxygenstahlerzeugung wird von einem Potential von 3 % ausgegangen. Bei Elektrolichtbogenöfen hängt der tatsächliche Energieverbrauch von einer Vielzahl von Einzelfaktoren ab, weswegen die Abweichungen der erwähnten Messwerte an 14 Öfen von über 20 % nach oben und nach unten keine Aussage über die Güte dieser Anlagen zulassen. Gleichwohl lässt die Bandbreite des tatsächlichen Energieverbrauchs zwischen rund 370 kWh/t und 600 kWh/t (Köhle, 1992) auf ein etwas höheres Optimierungspotential – hier werden 5 % angenommen – schließen.
- Die Arbeitsintensität der Rohstahlerzeugung wurde bestimmt, indem die statistisch ausgewiesenen Beschäftigten der Hochofenbetriebe (WV Stahl, VDEH 2002) sowie ein über Gewichtungsfaktoren bestimmter Anteil der Beschäftigten in Stahlwerken, die statistisch nicht nach Verfahren differenziert aufgeführt sind, der Oxygenstahlerzeugung zugewiesen wurden. Das Residuum der Beschäftigtenzahl der Stahlwerke konnte dann der Elektrostahlerzeugung zugeordnet werden. Berücksichtigt wurden hierbei nur Arbeiter. Die Aufteilung der Stahlwerksbeschäftigten wurde in zwei Varianten vorgenommen. In *Variante 1* wurden die Anteile proportional zur Rohstahlerzeugung bestimmt, in *Variante 2* wurden die entsprechenden Produktionskapazitäten als Bemessungsgrundlage herangezogen. Im Ergebnis erwiesen sich die Unterschiede der beiden Varianten als gering.
- Die Angaben zur Kapazitätsentwicklung und zu den Bruttoinvestitionen in der Eisenschaffenden Industrie zwischen 1980 und 1996, aufgeteilt nach Produktionsprozessen, wurden von der Wirtschaftsvereinigung Stahl zur Verfügung

gestellt. Sie basieren auf den von der EU-Kommission veröffentlichten Jahresberichten zu den „Investitionen in den Kohle- und Stahlindustrien der Gemeinschaft“.

- Primärstatistische Daten zur Entwicklung der Nettoinvestitionen und des Bruttoanlagevermögens für die einzelnen Paradigmen standen nicht zur Verfügung. Zur Durchführung der Schätzung wurde auf Informationen der Wirtschaftsvereinigung Stahl zur durchschnittlichen Lebensdauer der verschiedenen Anlagen zurückgegriffen. Unter Berücksichtigung der Entwicklung der Produktionskapazitäten ließ sich dann die zeitliche Entwicklung des Bruttoanlagevermögens, der Abschreibungen und der Nettoinvestitionen abschätzen.
- Für die Berechnung der Produktionswerte wird zunächst angenommen, dass Oxygenstahl und Elektro Stahl vollkommene Substitute sind und daher gleiche Preise aufweisen. Zur Ermittlung der Produktionswerte wurden Angaben des Statistischen Bundesamtes zur Entwicklung der durchschnittlichen Preise für Roheisen und Stahl mit den bekannten Produktionsmengen für Roheisen und Stahl kombiniert.
- Die Aufwendungen für F&E im Sektor Stahl wurden den Schriftenreihen des Deutschen Stifterverbandes Essen entnommen.
- Der Herfindahl-Hirschmann-Index wurde der Fachserie 4, Reihe 4.2.3 des Statistischen Bundesamtes entnommen.
- Der verwendete Index für den Importdruck wurden auf Basis der Relation von Stahlimporten zur heimischen Erzeugung errechnet. Die Quoten wurden auf das Jahr 1977 indiziert Als Datenquelle diente hier das Statistische Jahrbuch der Stahlindustrie herausgegeben von der Wirtschaftsvereinigung Eisen- und Stahlindustrie.

3.3 Modellierung für die Stahlindustrie

Für die erste Implementierung des neuen Modellierungskonzepts wurde zunächst angenommen, dass der von den beiden Technologien produzierte Stahl ein homogenes Produkt darstellt. Wie weiter oben bereits dargelegt, ist dies insofern nicht korrekt, weil bestimmte Verwendungen den Einsatz von Spezialstählen erfordern, die nur mit der Oxygen-Technologie erzeugt werden können. Die Homogenitätsannahme ist aber weniger problematisch, solange in den Simulationsrechnungen eine bestimmte Mindestproduktionsmenge für Oxygenstahl, die nach Auskunft der Branchenexperten deutlich unterhalb der aktuell erzeugten liegt, nicht unterschritten wird.

Der folgende Text gibt einen Überblick über die Modellspezifikation für die Stahlbranche in allgemeiner Form. Die für den Zeitraum 1980 bis 1996 ökonomische

metrisch geschätzten Gleichungen sind mit ihren statistischen Prüfmaßen im Anhang wiedergegeben.

Die Produktion Rohstahl (GRS) in Millionen Tonnen wird durch den Bruttoproduktionswert der Stahlindustrie in konstanten Preisen $xg16$ und einen Zeittrend erklärt.

$$GRS(t) = GRS(xg16(t), \text{Zeit}) \quad (1)$$

Der Zeittrend erfasst die Unterschiede zwischen der reinen Mengenentwicklung und der des Volumens der Rohstahlnachfrage. Der Bruttoproduktionswert der Stahlindustrie wird im Modell PANTA RHEI – wie bereits angesprochen - durch die Nachfrage der 58 Branchen erklärt.

Die Aufteilung der Produktion erfolgt proportional zur Kapazitätsentwicklung EPK (Kapazität Elektrostahl) und OSPK (Kapazität Oxygenstahl) in beiden Verfahren. Solange Kapazitätsreserven bestehen, hat das Verhältnis zwischen dem Strom- und dem Kokspreis PSTK Einfluss auf die Aufteilung der Produktion.⁹ Wir schätzen den Anteil QERS der Elektrostahlerzeugung an der Gesamtproduktion mit der Gleichung:

$$QERS(t) = QERS(EPK(t)/OSPK(t), PSTK) \quad (2)$$

Die Produktion ERS des Elektrostahlverfahrens in Tonnen und die Produktion ORS des Oxygenstahlverfahrens ergeben sich dann definitorisch als:

$$ERS(t) = QERS(t) * GRS(t) \quad (3)$$

$$ORS(t) = GRS(t) - ERS(t) \quad (4)$$

Der Preis für Eisenerz PERZ wird durch den Importpreis $pmg07$ der Gütergruppe Erze des Modells PANTA RHEI bestimmt:

$$PERZ(t) = PERZ(pmg07(t)) \quad (5)$$

Der Stahlpreis in DM/t PSTAHL ist eine Funktion des Preisindex der Bruttoproduktion der Stahlindustrie $pg16$:

$$PSTAHL(t) = PSTAHL(pg16(t)) \quad (6)$$

⁹ In einer im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Regression des Anteils Elektrostahl an der gesamten Rohstahlerzeugung für den Zeitraum 1970 bis 1994 für die alten Bundesländer kommt Schleich (2001) ebenfalls zu der Schlussfolgerung, dass der Strompreis einen statistisch signifikanten negativen Einfluss auf den Anteil Elektrostahl ausübt.

Die realen Bruttoinvestitionen EIB der Elektrostahl – Technologie hängen von der Entwicklung des Realzinses (gemessen als Differenz zwischen der Umlaufrendite festverzinslicher Wertpapiere RUML und der Inflationsrate INFL), vom Verhältnis des Schrottpreises PSCH zum Erzpreis PERZ, sowie von der Relation zwischen der Elektrostahlnachfrage ERS und der Produktionskapazität EPK in dieser Technologie ab.

$$EIB(t) = EIB(RUML(t)-INFL(t), PSCH(t)/PERZ(t), ERS/EPK, D90[4]+D90[5]) \quad (7)$$

Eine durch den Zusammenhang nicht erklärbare Sonderbewegung in den Jahren 1994 und 1995 wird durch die Dummyvariable D90[4]+D90[5] erfasst. Bis auf den Schrottpreis sind alle erklärenden Variablen endogen. Der Schrottpreis schwankt kurzfristig um einen langfristig stabilen Wert. Wir geben ihn deshalb als exogen vor. Nach Auskunft der Branchenexperten wird er durch das Schrottangebot aus den GUS Ländern auf diesem Niveau gehalten.

Alle bisherigen Versuche, die beschriebene Spezifikation um einen weiteren wichtigen Inputpreis der Elektrostahltechnologie – den Elektrizitätspreis – zu erweitern waren nicht erfolgreich. Ebenso erwiesen sich der Herfindahl-Index zur Messung des Einflusses der Marktkonzentration sowie die Importdruckvariable als nicht signifikant. Das heißt, Variationen in der wirtschaftlichen Konzentration oder im Anteil Importe an der Produktion hatten in der gewählten Spezifikation keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Investitionen in Elektrostahl. Die Hypothese, wonach X-Ineffizienzen auf der Seite potenzieller Anwender einer energiesparenden Technologie dazu führen, dass diese Technologie in suboptimalem Umfang oder erst verzögert eingesetzt wird, findet für den Stahlsektor in der vorliegenden Form keine Bestätigung. Mögliche Erklärungen liegen beispielsweise in den vergleichsweise hohen Energiekosten in der Stahlbranche, so dass hohe monetäre Anreize bestehen, diese Hemmnisse bei der rationellen Energienutzung zu überwinden. Eine alternative Erklärung kann auch darin gesehen werden, dass andere Gründe, z. B. technologische, dafür sorgen, dass in energieeffiziente Technologien, d. h., Elektrostahltechnologien investiert wird, sodass die erwarteten Effekte in der beobachteten Korrelation zwischen den Indikatoren für Wettbewerbsdruck und Investitionen in Elektrostahl von anderen Einflüssen überlagert werden.

Die realen Bruttoinvestitionen in die Oxygenstahltechnologie OIB sind durch die Relation zwischen der Oxygenstahlnachfrage OSR und ihrer Produktionskapazität OSPK bestimmt. Ein extremer Wert wird im Jahre 1985 durch eine Dummyvariable erfasst.

$$OIB(t) = OIB(OSR(t)/OSPK(t), D80[5]) \quad (8)$$

Die Abschreibungen EIA und OIA lassen sich aus der Kapitalstockentwicklung schätzen

$$EIA(t) = EIA(EKK(t)) \quad (9)$$

$$OIA(t) = OIA(OKK(t)) \quad (10)$$

Die Bruttoinvestitionen EIB und OIB ergeben sich definitorisch aus:

$$EIN(t) = EIB(t) + EIA(t) \quad (11)$$

$$OIN(t) = OIB(t) + OIA(t) \quad (12)$$

Die Kapitalstockdaten (EKK für Elektrostahl, OKK für Oxygenstahl) werden definitorisch bestimmt:

$$EKK(t) = EKK(t-1) + EIN(t) \quad (13)$$

$$OKK(t) = OKK(t-1) + OIN(t) \quad (14)$$

Die Summe der Bruttoinvestitionen in beiden Verfahren erklärt dann als Summe die Bruttoausrüstungsinvestitionen der Stahlindustrie ausr16 in der Abgrenzung des Input-Output-Datensatzes des PANTA RHEI Modells.

$$\text{ausr16}(t) = \text{ausr16}(EIB(t) + OIB(t)) \quad (15)$$

Die Produktionskapazität im Elektrostahlverfahren EPK gemessen in Tonnen wird durch den realen Kapitalstock EKK des Elektrostahlverfahrens bestimmt. Eine Sonderbewegung im Jahr des Übergangs 1990 wird durch die Dummyvariable D90FF erfasst.

$$EPK(t) = EPK(EKK(t), D90FF) \quad (16)$$

Analog ist die Gleichung für die Änderung der Kapazität des Oxygenstahlverfahrens OSPK formuliert. Auch hier ergeben sich in der Übergangsphase während der Wiedervereinigung Sonderbewegungen. Der Zeittrend erfasst eine kontinuierlich verlaufende leichte Effizienzsteigerung.

$$OSPK(t) = OSPK(OKK(t), (D90+D90[1]+D90[2])), ZEIT \quad (17)$$

Die best-practice Technologie im Hinblick auf den Stromverbrauch bei der Elektrostahlerzeugung gemessen in TJ/kt erzeugten Stahls - EBS - ist von der Relation PEST zwischen dem Strompreis und dem Outputpreis für Rohstahl in der aktuellen und in den vergangenen drei Perioden abhängig:

$$\text{EBS}(t) = (\text{PEST}(t), \text{PEST}(t-1), \text{PEST}(t-2), \text{PEST}(t-3)) \quad (18)$$

Die best-practice-Technologie hinsichtlich des Verbrauchs fossiler Energieträger bei der Oxygenstahlerzeugung – RBF – wird durch den Realzins und die Relation PKST zwischen dem Preis für Koks und dem Outputpreis der Stahlindustrie sowie den realen FuE-Ausgaben des Sektors Maschinenbau - FEM/pg21 - bestimmt:

$$\text{RBF}(t) = \text{RBF}(\text{RUML}(t) - \text{INFL}(t), \text{PKST}(t-1), \text{FEM}/\text{pg21}/1000) \quad (19)$$

Es hat sich somit in beiden Fällen eine Kostendruck-Hypothese zur Erklärung des technischen Fortschritts bewährt. Außerdem unterstützen die Ergebnisse die Hypothese, dass die FuE-Ausgaben des Sektors Maschinenbau die Energieproduktivität der Oxygenstahlerzeugung erhöhen. Die FuE-Ausgaben der Stahlindustrie erwiesen sich jedoch als statistisch gesehen insignifikant. Möglicherweise liegt dies daran, dass die brancheninternen FuE-Ausgaben primär auf nachgelagerte - in der Modellbetrachtung ausgeklammerte - Prozesse abzielen. Ein weiterer Grund könnte sein, dass besagte FuE-Ausgaben eine Funktion der Strompreise sind und damit Kollinearität in den „erklärenden Variablen“ vorliegt. Der individuelle Einfluss der FuE-Ausgaben könnte dann gegebenenfalls bei einem größeren Beobachtungszeitraum - für den jedoch keine Daten vorliegen - statistische Signifikanz aufweisen. Die Ergebnisse sind allerdings konsistent mit der Hypothese, dass die Unternehmen hinsichtlich der Charakterisierung des technischen Wandels als „supplier-dominated firms“ anzusehen sind. Der Innovationsprozess besteht in erster Linie in der Diffusion von best-practice Kapitalgütern und vollzieht sich primär durch die Technologiewahl bei der Investitionsentscheidung (vgl. Dosi 1988, S. 232).

Der Herfindahl-Index der Stahlindustrie bzw. das Verhältnis von Importen zur heimischen Erzeugung als Proxies für Wettbewerbsdruck erwiesen sich allerdings als statistisch insignifikant, so dass die hier getestete Hypothese, wonach X-Ineffizienzen auf der Seite potenzieller Anwender einer energiesparenden Technologie den technischen Fortschritt behinderten, empirisch nicht bestätigt werden konnte.

Der über alle Investitionsjahrgänge durchschnittliche spezifische Stromverbrauch in TJ/kt Elektrostahl ESS wird - gemäß dem putty-clay-Ansatz - als gewogenes Mittel des Koeffizienten des Vorjahres und des best-practice Koeffizienten EBS mit dem Kapitalstock EKK des Vorjahres und den aktuellen Investitionen EIB als Gewichten bestimmt:

$$\text{ESS}(t) = \text{ESS}(\text{ESS}(t-1) * (\text{EKK}(t-1) + (\text{EBS}(t) * \text{EIB}(t)) / (\text{EKK}(t-1) + \text{EIB}(t)))) \quad (20)$$

Dieser Ansatz hat sich für den durchschnittlichen spezifischen Verbrauch an fossilen Energieträgern in TJ/kt Oxygenstahl - OSF - nicht bewährt. Ein möglicher

Grund ist darin zu sehen, dass die Investitionstätigkeiten bei der Erzeugung von Oxygenstahl auf Ersatzinvestitionen beschränkt sind. Stattdessen wird dieser Koeffizient nahezu perfekt durch den jeweils aktuellen best-practice-Koeffizienten RBF erklärt. Allerdings weist die Funktion noch erhebliche Autokorrelation der Residuen auf, die durch die Hinzunahme des Realzinses weitgehend abgebaut wird:

$$\text{OSF}(t) = \text{OSF}(\text{RBF}(t), \text{RUML}(t) - \text{INFL}(t)) \quad (21)$$

Der geschätzte Koeffizient für die best-practice-Technologie ist 1,16 und außerordentlich signifikant, was einen konstanten Abstand zwischen der durchschnittlich eingesetzten und der best-practice-Technologie widerspiegelt. Die geschätzte Funktion bietet eine perfekte Anpassung, so dass die best-practice-Technologie unabhängig von den Investitionsjahrgängen mit einem konstanten Effizienzabschlag eingeführt wird. Die Rolle der Investitionen kann nur relativ schwach und sehr indirekt durch den Realzins erfasst werden.

Der Inputkoeffizient für den Einsatz des elektrischen Stroms EAS, der auf das Elektrostahlverfahren entfällt, kann dann definitorisch aus dem spezifischen Stromverbrauch im Elektrostahlverfahren ESS, der Produktionsmenge an Elektrostahl ERS und der realen Bruttoproduktion der Stahlindustrie x_{g16} berechnet werden:

$$\text{EAS}(t) = \text{ESS}(t) * \text{ERS}(t) / x_{g16} \quad (22)$$

Der Inputkoeffizient EEST für den Stromeinsatz insgesamt in der Stahlindustrie wird dann durch den Inputkoeffizienten für das Elektrostahlverfahren erklärt:

$$\text{EEST}(t) = \text{EEST}(\text{EAS}(t)) \quad (23)$$

Das Absolutglied erfasst den Stromverbrauch, der nicht in die Elektrostahlerzeugung geht.

Analog werden zunächst der Inputkoeffizienten OAS für den Einsatz der fossilen Energieträger in der Oxygenstahlerzeugung definitorisch durch den spezifischen Verbrauch fossiler Energieträger in der Oxygenstahlerzeugung OSF, die Produktionsmenge von Oxygenstahl ORS und die reale Bruttoproduktion der Stahlindustrie x_{g16} bestimmt:

$$\text{OAS}(t) = \text{OSF}(t) * \text{ORS}(t) / x_{g16} \quad (24)$$

Der Inputkoeffizient FEST für den Einsatz fossiler Energieträger insgesamt in der Stahlindustrie wird dann durch den Inputkoeffizienten für das Oxygenstahlverfahren und die Dummyvariable D91FF zur Erfassung des mit der Wiedervereinigung einhergehenden Strukturwandels erklärt:

$$\text{FEST}(t) = \text{FEST}(\text{OAS}(t), \text{D91FF}) \quad (25)$$

Wie schon oben diskutiert erfasst das Absolutglied den sonstigen Einsatz fossiler Energieträger in der Stahlindustrie außerhalb des Qxygenstahlverfahrens.

Die Inputkoeffizienten der einzelnen Arten der fossilen Energieträger werden durch die Entwicklung der Gesamtgröße sowie durch relative Preise bestimmt, die etwa vorhandene Substitutionen erfassen:

Der Inputkoeffizient für die verteilten Gase VGST hat einen festen Anteil am Einsatz der fossilen Energieträger in der Stahlindustrie. Lediglich mit der Wiedervereinigung ergab sich ein Strukturbruch, der durch die Dummyvariable D91FF aufgefangen wird.

$$\text{VGST}(t) = \text{VGST}(\text{FEST}(t), \text{D91FF}(t)) \quad (26)$$

Da zwischen Steinkohle und Koks Substitutionsbeziehungen bestehen, werden die Inputkoeffizienten SKST und KOST neben dem Koeffizienten für die fossilen Energieträger insgesamt durch den entsprechenden Relativpreis erklärt:

$$\text{SKST}(t) = \text{SKST}(\text{FEST}(t), \text{pvge05}(t)/\text{pvge06}(t)) \quad (27)$$

$$\text{KOST}(t) = \text{KOST}(\text{FEST}(t), \text{pvge05}(t)/\text{pvge06}(t)) \quad (28)$$

Der Inputkoeffizient für leichtes Heizöl LHST ist trendabhängig und weist einen Strukturbruch auf:

$$\text{LHST}(t) = \text{LHST}(\text{Zeit}, \text{D91FF}[4]) \quad (29)$$

Der Inputkoeffizient für den Einsatz des schweren Heizöls in der Stahlindustrie ergibt sich als Rest:

$$\text{SHST}(t) = \text{FEST}(t) - \text{VGST}(t) - \text{SKST}(t) - \text{KOST}(t) - \text{LHST}(t) \quad (30)$$

Der spezifische Arbeitsinputkoeffizient in der Elektrostahlerzeugung KARES wird in Personen pro Tonne Stahl gemessen. Er hängt von den realen Arbeitskosten pro Stunde in der Stahlindustrie $\text{wsn16}/\text{pg16}$ sowie von den realen Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen in der Elektrotechnik $\text{FEE}/\text{pg26}$ ab:

$$\text{KARES}(t) = \text{KARES}(\text{wsn16}(t)/\text{pg16}(t), \text{FEE}(t)/\text{pg26}(t)) \quad (31)$$

Analog bestimmen wir den spezifischen Arbeitsinput in der Oxygenstahlerzeugung. Allerdings verwenden wir in dieser Spezifikation die realen Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen des Maschinenbaus.

$$\text{KAROS}(t) = \text{KAROS}(\text{wsn16}(t)/\text{pg16}(t), \text{FEM}(t)/\text{pg21}(t)) \quad (32)$$

Durch Multiplikation der spezifischen Arbeitsinputs mit den zugehörigen Produktionsmengen ergibt sich die Anzahl der beschäftigten Arbeiter:

$$\text{ARES}(t) = 1000 * \text{KARES}(t) * \text{ERS}(t) \quad (33)$$

$$\text{AROS}(t) = 1000 * \text{KAROS}(t) * \text{ORS}(t) \quad (34)$$

Die Anzahl der Arbeiter in der Stahlerzeugung ist als Summe gegeben:

$$\text{AROES}(t) = \text{ARES}(t) + \text{AROS}(t) \quad (35)$$

Die Anzahl sonstigen Arbeiter in der Stahlindustrie RARST, die nicht unmittelbar mit der Stahlerzeugung beschäftigt sind, erklären wir durch die Entwicklung der realen Arbeitskosten pro Stunde in der Stahlindustrie $\text{wsn16}/\text{pg16}$, die realen Forschungs- und Entwicklungsausgaben des Maschinenbaus $\text{FEM}/\text{pg21}$ sowie die Bruttoinvestition der Stahlindustrie xg16 :

$$\text{RARST}(t) = \text{RARST}(\text{wsn16}(t)/\text{pg16}(t), \text{FEM}(t)/\text{pg21}(t), \text{xg16}(t)) \quad (36)$$

Die Anzahl der Arbeiter insgesamt in der Stahlindustrie kann dann definitorisch ermittelt werden:

$$\text{ARST}(t) = \text{RARST}(t) + \text{AROES}(t) \quad (37)$$

Die Zahl der Angestellten in der Stahlindustrie wird durch die realen Arbeitskosten pro Stunde in der Strahlindustrie sowie den realen Forschungs- und Entwicklungsaufwand des Maschinenbaus erklärt. In den Jahren des Übergangs 1991 und 1992 gab es Abweichungen von diesem Zusammenhang, die durch die beiden Dummyvariablen erfasst werden.

$$\text{ANST}(t) = \text{ANST}(\text{wsn16}(t)/\text{pg16}(t), \text{FEM}(t)/\text{pg21}(t), \text{D90}[1], \text{D90}[2]) \quad (38)$$

Die Beschäftigten insgesamt in der Stahlindustrie ergeben sich definitorisch:

$$\text{BST}(t) = \text{ARST}(t) + \text{ANST}(t) \quad (39)$$

Die insgesamt in der Stahlindustrie geleisteten Arbeitsstunden avb16 werden durch das Produkt aus der Anzahl der Beschäftigten und der durchschnittlichen Jahresarbeitszeit in der Stahlindustrie jab16 , die eine endogene Variable des Modells ist, bestimmt.

$$\text{avb16}(t) = \text{avb16}(\text{BST}(t) * \text{jab16}(t)) \quad (40)$$

Die Bestimmung aller anderen Inputs sowie der Preise und der Absatzstruktur der Stahlindustrie erfolgt im Rahmen des Modells PANTA RHEI.

3.4 Simulationen und erste Ergebnisse

Das oben beschriebene Modell für die Technologiewahl und den Energieverbrauch in der Stahlindustrie wurde in das Modell PANTA RHEI Modell implementiert. Im folgenden werden die Ergebnisse von zwei Simulationsrechnungen für die Stahlindustrie vorgestellt, die beispielhaft die Eigenschaften des neuen Modellierungsansatzes und die Modellzusammenhänge demonstrieren. Um die Auswirkungen von preislichen Instrumenten zu untersuchen, wurde zunächst eine steuerpolitische Maßnahmen simuliert. Demnach kommt es ab dem Jahr 2005 zur stufenweisen Einführung einer CO₂-Steuer. Diese kann in ihrer ökologischen Wirkung auch als nationale Umsetzung im Rahmen eines weltweiten CO₂-Handels mit einer schrittweisen Verschärfung des Emissionsziels interpretiert werden. In der zweiten Simulation wird ein kontinuierlicher Rückgang des Schrottpreises, der eine wichtige Determinante der Technologiewahl darstellt, simuliert. Auslöser einer solchen Entwicklung könnten beispielsweise ordnungsrechtliche Vorgaben sein, die eine Schließung von Materialkreisläufen zum Ziel hat. Das erhöhte Schrottangebot führt dann über niedrigere Schrottpreise ceteris paribus zu einer Ausweitung des Schrotteinsatzes und damit zur Verbesserung der Materialeffizienz bei der Rohstahlerzeugung.

3.1 CO₂-Steuer

In der ersten Politiksimulation wird ab dem Jahr 2005 eine CO₂-Steuer eingeführt, die von 5 € auf 25 € pro Tonne CO₂ im Jahr 2010 steigt. Die CO₂-Steuer belastet alle fossilen Energieträger nach ihrem Kohlenstoffgehalt, sodass der Einsatz von Kohle im Vergleich zu Öl oder Gas deutlich stärker besteuert wird. Da die Steuerbelastung zumindest teilweise überwältigt wird, verteuert sich auch Strom. Es ist aber zu bedenken, dass Strom, der aus CO₂-freien Energieträgern wie Kernenergie oder Erneuerbaren gewonnen wird, nicht von der Steuer betroffen belastet wird. Da außerdem Strom heute u. a. durch die Stromsteuer bereits höher belastet ist als Kohle, ist Kohle durch eine CO₂-Steuer relativ stärker berührt als Strom. In Abbildung 3.4-1 sind die wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen dieser Steuer auf die Stahlindustrie als prozentuale Abweichungen gegenüber der Referenzentwicklung dargestellt. Im Vergleich dazu löst die CO₂-Steuer eine deutliche Produktionsverschiebung von Oxygenstahl hin zum ökonomisch vergleichsweise attraktiveren Elektrostahl aus. Diese Verschiebung wird von einem ebenfalls deutlichen Anstieg der Investitionen in das Elektrostahl-

verfahren begleitet. Im Zeitverlauf verlagern sich damit auch die Kapazitäten in Richtung Elektrostahl. Abbildung 3.4-2 ist zu entnehmen, dass es in Folge der CO₂-Steuer im Vergleich zur Referenzentwicklung zu einem leichten Rückgang der Stahlproduktion sowie der Investitionen insgesamt kommt.

In Bezug auf die Innovationsimpulse, die durch die CO₂-Steuer ausgelöst werden, ist festzustellen, dass sich die best-practice Elektrostahltechnologie etwas schneller entwickelt als im Referenzszenario. Durch die gestiegenen Strompreise wird der Innovationsdruck einerseits erhöht. Andererseits dämpft der gleichzeitig steigende Outputpreis für Stahl diese Entwicklung, weil die Elektro-Stahlproduzenten ihre Innovationsanstrengungen gemäß der empirisch bestätigten Kostendruckhypothese¹⁰ an der Relation von Strompreis und Outputpreis orientieren. In der Summe verbessert sich die best-practice Technologie um gut 2 % bis zum Jahr 2010. Nicht ganz so stark sinkt der spezifische Stromverbrauch bei der Elektro-Stahlerzeugung, da sich der Bestand aus weniger effiziente Anlagen zusammensetzt.

Bei der Oxygenstahltechnologie fallen die Innovationseffekte wesentlich stärker aus. Die vergleichsweise stärkere Belastung des Energieträgers Kohle erhöht den Innovationsdruck deutlich, was zu einer signifikanten Verbesserung der best-practice Technologie um etwa 6 % bis zum Jahr 2010 führt. Da im Vergleich zur Referenzentwicklung alte Anlagen schneller stillgelegt werden, geht auch der spezifische Verbrauch fossiler Energieträger in dieser Größenordnung (und damit schneller als bei Elektrostahl) zurück.

Schließlich führt die CO₂-Steuer zu einer deutlichen Reduktion der CO₂-Emissionen, die der Stahlerzeugung entweder direkt (Oxygenstahl) oder über die Stromerzeugung indirekt (Elektrostahl) zuzurechnen sind.¹¹ Wie den Abbildungen 3.4-1 und 3.4-2 zu entnehmen ist, steigen auf der einen Seite die CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung für Elektrostahl. Der emissionsmindernde Effekt aus der verbesserten Energieeffizienz wird demnach durch den emissionssteigernden Effekt aus der gestiegenen Elektrostahlnachfrage übertroffen. Auf der anderen Seite sinken die direkten CO₂-Emissionen aus der Oxygenstahlproduktion. Dies liegt zum einen am Rückgang der Oxygenstahlproduktion und damit des Kokseinsatzes. Zum anderen vermindert sich der spezifische Energiebedarf der best-practice Technologien und des Bestandes. Insgesamt gesehen überwiegen die Emissionsminderungen aus der Oxygenstahlerzeugung die Emissionssteigerungen aus der Elektrostahlerzeugung. Im Saldo ergibt sich daher eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen aus der Stahlindustrie, die im Jahr 2010 verglichen mit der Referenzentwicklung über 3 Mio. t beträgt.

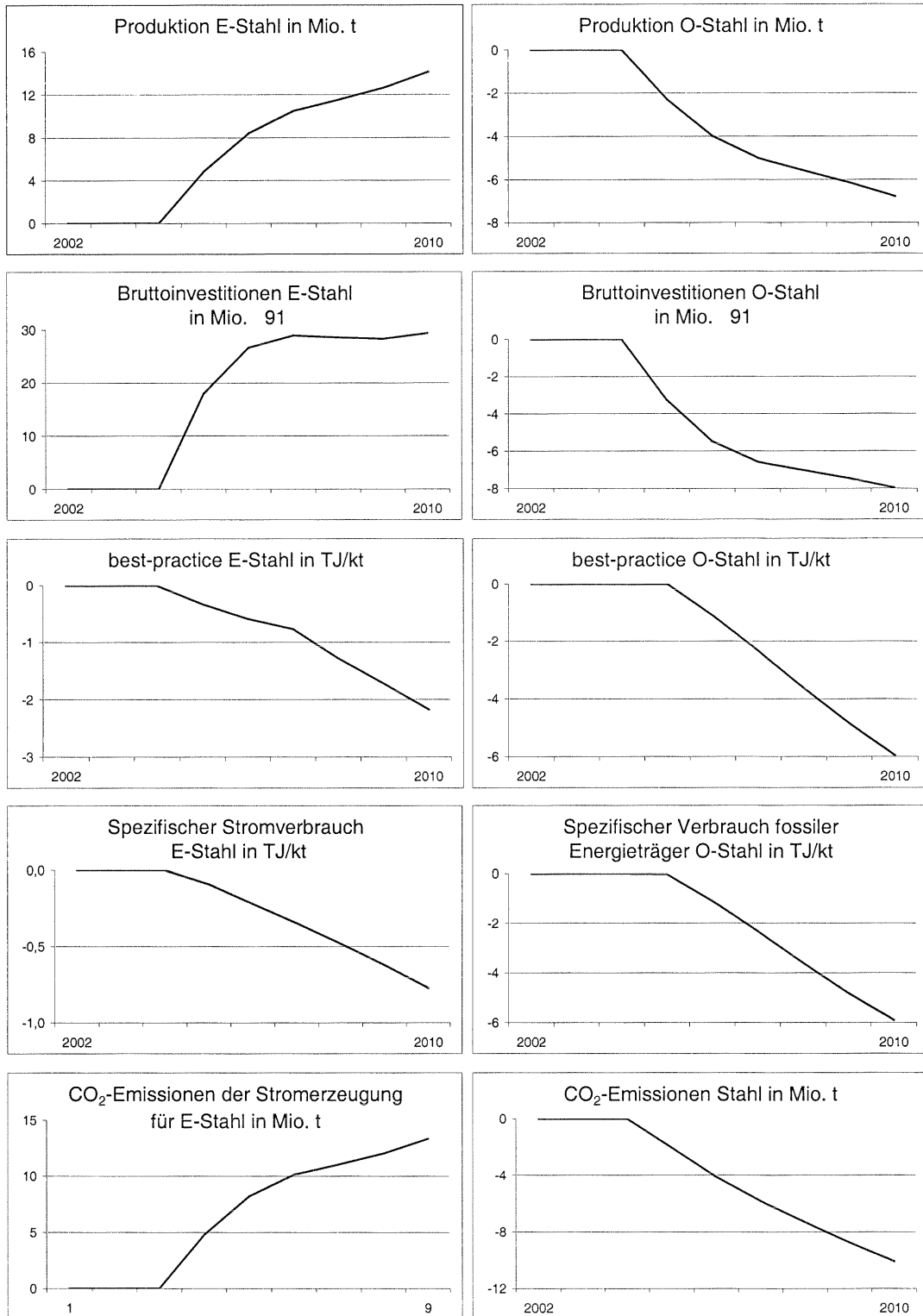
¹⁰ Vgl. Abschnitt 2.3.

¹¹ Für die Rechnungen wurde unterstellt, dass die Stromerzeugung für Elektrostahl die gleiche CO₂-Intensität aufweist wie die durchschnittliche Stromerzeugung in Deutschland.

Die Effekte unterscheiden sich im Vergleich zur herkömmlichen Modellierung ohne Technologiewahl und prozessspezifischen endogenen technischen Fortschritt wie folgt: In der neuen Modellierung fallen der Anstieg des Stahlpreises und der Rückgang der Stahlproduktion etwas stärker aus. Wesentlich bedeutsamer ist die im Vergleich zur herkömmlichen Modellierung etwa doppelt so hohe Abnahme der CO₂-Emissionen der Stahlindustrie. Offensichtlich hat die herkömmliche Modellierung die Substitutionsmöglichkeiten zwischen den Energieträgern überschätzt und folglich die ökonomischen Folgen unterschätzt.¹² Stattdessen zeigt die explizite Modellierung der Technologien, dass die CO₂-Steuer insbesondere den technischen Fortschritt beim Energieverbrauch der Oxygenstahlerzeugung und - wenngleich in schwächerer Form - den technischen Fortschritt beim Energieverbrauch der Elektrostahlerzeugung forciert. Die im Vergleich zur herkömmlichen Modellierung deutlich niedrigeren CO₂-Emissionen im neuen Modellansatz implizieren, dass der emissionsmindernde Effekt des zusätzlichen technischen Fortschritts den emissionssteigernden Effekt der begrenzten Substitutionalität mehr als ausgleicht. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der zur Erreichung eines vorgegebenen Umweltziels anzulegende Steuersatz unter der neuen Modellierung deutlich geringer ausfällt.

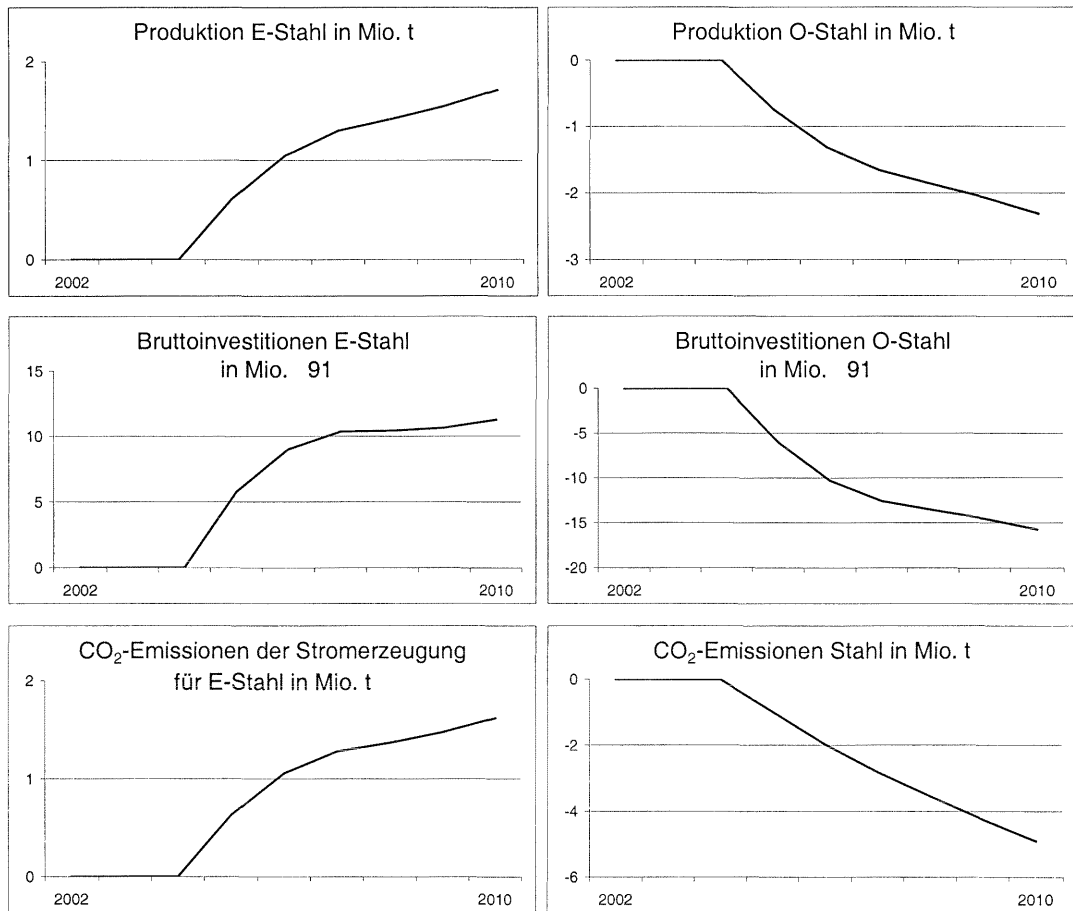
¹² In der herkömmlichen Modellierung wurde der Energieeinsatz in der Stahlindustrie zweistufig modelliert. Auf der ersten Stufe wurde der Inputkoeffizient für den gesamten Energieeinsatz durch den Relativpreis der Energie (gewogener Durchschnittspreis des Energiemixes durch den Outputpreis) bestimmt. Auf der zweiten Stufe wurden die Substitutionsmöglichkeiten zwischen den Energieträgern als Funktion der Relativpreise abgebildet (Vgl. dazu ausführlich Meyer et al. 1999).

Abbildung 3.4-1: Wirkungen der CO₂-Steuer –
Abweichungen zur Basislösung in v. H.



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3.4-2: Wirkungen der CO₂-Steuer –
Absolute Abweichungen zur Basislösung



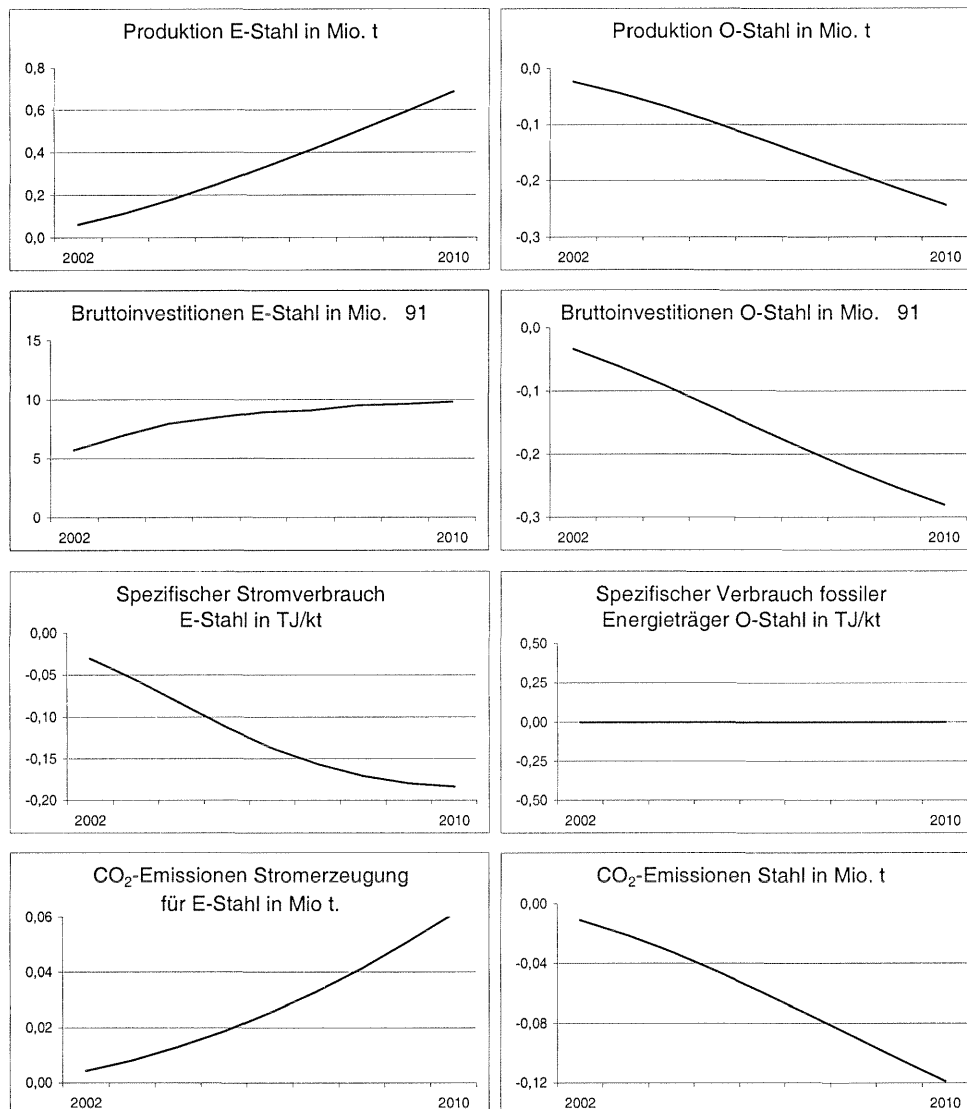
Quelle: Eigene Berechnungen

3.2 Senkung des Schrottpreises

In der zweiten Politiksimulation wird der Schrottpreis, der eine wichtige Bestimmungsgröße bei der Technologiewahl in der Stahlindustrie darstellt, zwischen 2002 und 2010 um jährlich 3 % im Vergleich zum Ausgangsjahr reduziert. Die Senkung des Schrottpreises führt zu einer Verlagerung von Investitionen, Produktion und Kapazitäten in Richtung Elektrostahl (vgl. Abbildung 3.4-3). Die Rohstahlproduktion insgesamt allerdings in etwa auf dem ursprünglichen Niveau. Die gestiegenen Investitionen in Elektrostahl führen zu einer beschleunigten Diffusion der best-practice Technologie, sodass sich die durchschnittliche Energieeffizienz im Bestand verbessert. Im Unterschied zur Simulation der CO₂-Steuer ergeben sich aber keine zusätzlichen Effekte in Bezug auf den technischen Fortschritt, da die Inputpreise der Energieträger, die für die Entwicklung der Energieeffizienz der best-practice Technologien ausschlaggebend sind, unverändert bleiben.

Insgesamt führt die simulierte Schrottpreissenkung zu einer geringfügigen Reduktion der CO₂-Emissionen der Stahlindustrie. Zwar erhöhen sich die indirekten Emissionen aus der Stromerzeugung in Folge der gestiegenen Elektrostahlproduktion. Diese werden aber durch den Rückgang der direkten CO₂-Emissionen aus dem Kokseinsatz in Folge der gesunkenen Oxygenstahlproduktion kompensiert (vgl. Abbildung 3.4-3).

Abbildung 3: Wirkungen einer Senkung des Schrottpreises – Abweichungen zur Basislösung in v. H.



Quelle: Eigene Berechnungen

3.5 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Beobachtung, dass Innovation und technischer Fortschritt in den vorherrschenden umweltökonomischen Modellen nur oberflächlich abgebildet werden, und dass die Annahme vollkommener Faktorsubstitution die tatsächlichen Produktionsverhältnisse in vielen Produktionsbereichen nicht korrekt widerspiegelt, wird in diesem Forschungsprojekt ein neuer Modellierungsansatz entwickelt. In

Form eines integrierten bottom-up/top-down Ansatzes wird zunächst am Beispiel der Rohstahlerzeugung in Deutschland dargestellt, wie sich zum einen technischer Fortschritt prozessbezogen und politik-induziert abbilden, und zum anderen die Technologiewahl zwischen limitationalen Prozessen explizit modellieren und im ökonomischen Input-Output-Modell PANTA RHEI implementieren lassen. Die Ergebnisse für die Herstellung von Rohstahl zeigen, dass der gewählte Modellierungsansatz funktionsfähig und implementierbar ist. Die realen technologischen Gegebenheiten werden in Form der wichtigsten Inputkoeffizienten für die beiden Hauptproduktionslinien Elektrostahl und Oxygenstahl explizit abgebildet. Daraus lassen sich dann die paradigmenpezifischen Investitionen, i. e. die Technologiewahl, und die Entwicklung des technischen Fortschritts im Modell als Funktion von Preisen und anderen Variablen ökonomisch schätzen. Die Realisierung technischen Fortschritts erfolgt im Modell primär durch Neuinvestitionen in best-practice Technologien.

Anhand zweier Politiksimulationen werden dann die Eigenschaften des neuen Modellierungsansatzes und die Modellzusammenhänge beispielhaft demonstriert. In der ersten Simulation führt die stufenweise Einführung einer CO₂-Steuer zwischen den Jahren 2005 und 2010, die den Energieinput für die Oxygenstahlerzeugung, i. e. Kohle, vergleichsweise stärker belastet als den Energieinput für die Erzeugung von Elektrostahl, i. e. Strom, zu einer deutlichen Verschiebung der Produktions-, Kapazitäts- und Investitionsanteile zu Gunsten von Elektrostahl. Im Bereich Elektrostahl beschleunigt sich durch die Neuinvestitionen die Durchdringung der best-practice Technologien. Zusätzlich erhöht das leicht gestiegene Strom-Output-Preisverhältnis den Innovationsdruck, sodass sich der technische Fortschritt geringfügig beschleunigt. Beide Effekte verringern den spezifischen Energieverbrauch des Elektrostahlkapitalstocks. Im Bereich Oxygenstahl werden alte Anlagen schneller stillgelegt, und der erheblich gestiegene Kostendruck führt zu einer signifikanten Verbesserung des best-practice Energieverbrauchs. Beide Effekte bewirken eine Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs im Oxygenstahlkapitalstock. Insgesamt bewirkt die CO₂-Steuer im Jahr 2010 eine deutliche Reduktion der direkt oder indirekt zurechenbaren CO₂-Emissionen aus der Stahlindustrie um ca. 3 Mio. t.

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse des neuen Modellierungsansatzes mit den Ergebnissen der herkömmlichen Modellierung zeigt, dass durch die alte Modellierung die Substitutionsmöglichkeiten zwischen Energieträgern überschätzt, der technische Fortschritt und die vermiedenen CO₂-Emissionen deutlich unterschätzt werden. Der emissionsmindernde Effekt des zusätzlichen technischen Fortschritts überwiegt demnach den emissionssteigernden Effekt der begrenzten Substitutionalität deutlich. Die Ergebnisse weisen gleichfalls darauf hin, dass der zur Erreichung eines vorgegebenen Umweltziels anzulegende Steuersatz (bzw. der sich einstellende Preis für handelbare Emissionsrechte) unter der neuen Modellierung deutlich geringer ausfällt.

In der zweiten Simulation werden die Auswirkungen einer materialeffizienzsteigernden Strategie, die einen kontinuierlichen Rückgang des Schrottpreises bewirkt, untersucht. Die Folge ist eine Erhöhung der Produktion, Investition und Kapazität von Elektrostahl auf Kosten von Oxygenstahl. Da der stromverbrauchssteigernde Effekt der erhöhten Elektrostahlproduktion durch die beschleunigte Durchdringung energieeffizienterer Elektrostahltechnologien über die Neuinvestitionen in etwa ausgeglichen wird, verändern sich der Stromverbrauch und die damit einhergehenden indirekten CO₂-Emissionen der Stahlindustrie kaum. Der Produktionsrückgang bei Oxygenstahl und der damit verbundenen direkten CO₂-Emissionen führt dann zu einer Abnahme der gesamten CO₂-Emissionen aus der Stahlindustrie. Im Vergleich zur CO₂-Steuer hat ein Sinken der Schrottpreise allerdings keine direkten Effekte auf den technischen Fortschritt, da die Inputpreise der Energieträger, weitgehend unverändert bleiben.

Der vorgestellte neue Modellierungsansatz erlaubt eine prozessspezifische Analyse der Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen, deren Wirkungen auf die Technologiewahl einerseits und auf den technischen Fortschritt andererseits modellendogen dargestellt werden können. Für zukünftige Anwendungen sind vielfältige Erweiterungen denkbar. Für die Modellierung der Stahlindustrie selbst könnte die Abbildung der technologischen Gegebenheiten weiter verbessert werden. Beispielsweise könnte die Annahme vollkommener Substitutionalität der beiden Stahlsorten aufgegeben werden, da Elektrostahl eher für „Langprodukte“ eingesetzt wird, während die Herstellung von „Flachprodukten“ (Bleche) überwiegend dem Oxygenstahl vorbehalten bleibt¹³. Dazu soll versucht werden, die Nachfrage in Abhängigkeit der Substituierbarkeit der beiden Stahlsorgen in drei Bereiche aufzuteilen. Erstens wird es Bereiche geben, in denen nur Elektrostahl eingesetzt werden kann, zweitens Bereiche, in denen nur Oxygenstahl verwendet werden kann, und schließlich drittens Bereiche, in denen beide vollkommen substituierbar sind. Die Berücksichtigung der tatsächlich begrenzten Substituierbarkeit der beiden Stahlsorten für manche Anwendungen erlaubt dann zu analysieren, welche Auswirkungen sich aus nachfrageinduziertem strukturellem Wandel, der wiederum politikinduziert sein kann, auf die Technologiewahl und den technischen Fortschritt ergeben.

Außerdem soll der vorgestellte Modellierungsansatz im Rahmen des Forschungsprojekts für zwei weitere energieintensive Branchen angewendet werden. Schließlich sind weitere Simulationsrechnungen denkbar, in denen beispielsweise das Ausschöpfen von Zeitfenstern, die sich aus den Investitionszyklen ergeben, oder in denen der Einfluss weicher Kontextfaktoren, wie z. B. Politikglaubwürdigkeit, analysiert werden (Erdmann 1999).

¹³ Die Höhe des Elektrostahlanteils an der gesamten Rohstahlerzeugung hängt nach Aussagen von Branchenvertretern wesentlich von der Nachfragestruktur auf den Stahlmärkten in Verbindung mit der Verfügbarkeit von Schrott und Energie ab (Ameling./Aichinger 2001).

4 Literatur

- Aichinger, H. M./Mülheims, K./Lüngen, H. B./Schierloh, U./Stricker, K. P.: Ganzheitliche Bewertung und Potentiale der CO₂-Emission bei der Hochofen-Konverter-Route. *Stahl und Eisen* 121 (2001), Nr. 5, S. 59-65.
- Ameling, D.: The importance of metallurgical coke for crude steel production. *Stahl und Eisen* 121 (2001), Nr. 11, S. 31-37
- Ameling, D./Aichinger, H. M.: Beitrag von Wirtschaft und Stahlindustrie zur Minderung klimawirksamer Emissionen in Deutschland im Kontext der Klimavorsorgepolitik. *Stahl und Eisen* 121 (2001), Nr. 7, S. 61-70.
- Böhringer, C. (1999): Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der energie- und umweltpolitischen Analyse. Theoretische Grundlagen und empirische Anwendung. Frankfurt.
- Buoananno, P./Carraro, C./Galeotti, M. (2001): Endogenous Induces Technical Change and the Costs of Kyoto, Working Paper Fondazione Eni Enrico Matteio 2001.
- Buttermann, H.-G.: Potentiale und Kosten einer globalen CO₂-Minderungsstrategie in der Stahlindustrie. *RWI-Mitteilungen. Zeitschrift für Wirtschaftsforschung* 50 (1999), Heft 3; S. 129-155.
- Buttermann, H.-G./Hillebrand, B.: Klimaschutzzerklärung der deutschen Industrie unter neuen Rahmenbedingungen. Monitoring-Bericht 1999. Untersuchungen des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung, Heft 37, Essen 2000.
- Carraro, C. (1998): Climate Modelling and Policy Strategies. The Role of Technical Change and Uncertainty. *Energy Economics* 20, S. 463-471.
- Czarnitzki, D./Ebling, G./Gottschalk, S./Janz, N./Niggemann, H.: Quellen für Innovationen im Verarbeitenden Gewerbe und Bergbau, in: Quellen für Innovationen: Analyse der ZEW-Innovationserhebung 1999 im Verarbeitenden Gewerbe und im Dienstleistungssektor, N. Janz (Hrsg.), Dokumentation Nr. 00-10, ZEW Mannheim.
- De Almeida, E.L.F. (1998): Energy efficiency and the limits of market forces: The example of the electric motor market in France. *Energy Policy*, Vol. 26, No. 8, pp 643-653.

- DeCanio, S. J. (1993): Barriers within firms to energy efficient investments. *Energy Policy*, September, pp. 906-914.
- Dosi, G. (1982): Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Change. *Research Policy* 11, 147-162.
- Dosi, G. (1988): The nature of the innovative process. In: Dosi, G. Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G., Soete, L.(eds.): *Technical Change and Economic Theory*. Pinter Publishers, London and New York.
- Erdmann, G. (1993): *Elemente einer evolutorischen Innovationstheorie*. Tübingen.
- Erdmann, G. (1999): Zeitfenster beachten. Möglichkeiten der Ökologisierung der regulären Innovationstätigkeit. *Ökologisches Wirtschaften* 2/99.
- Eyre, N. (1997): Barriers to energy efficiency: more than just market failure. *Energy & Environment* 8, Issue 1, pp. 25-43.
- FIU (1996): Der Einfluss von Energiesteuern und -abgaben zur Reduktion von Treibhausgasen auf Innovation und technischen Fortschritt - Clearing Studie. Essen.
- Frohn, J. et al. (1998): Fünf makroökonomische Modelle zur Erfassung der Wirkungen umweltpolitischer Maßnahmen - eine vergleichende Betrachtung. Band 7 der Schriftenreihe "Beiträge zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen", Stuttgart.
- Gilchrist, S./Williams, J. (2000): Putty-Clay and Investment: A Business Cycle Analysis. *Journal of Political Economy* 108 (5), S. 928-960.
- Goulder L. H./Mathai, K. (2000): Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change, *Journal of Environmental Economics and Management* 39, S. 1-38.
- Goulder, L. H./Schneider, S. (1999): Induced Technological Change, Crowding Out, and the Attractiveness of CO₂ Emissions Abatement, *Resource and Environmental Economics* 21(3-4), S. 211-253.
- Grupp, H. (1999): Umweltfreundliche Innovation durch Preissignale oder Regulation? Eine empirische Analyse für Deutschland. *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*. Bd. 219/5+6.
- Hemmelskamp, J. (1997): Umweltpolitik und Innovation, Grundlegende Begriffe und Zusammenhänge, *Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht* Nr. 4, S. 481-511.

- Hemmelskamp, J. (1999): *Umweltpolitik und technischer Fortschritt*, Schriftenreihe des Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Hicks, J. (1932): *The Theory of Wages* (Macmillan, London). Jaffe, A. B./Stavins, R. N. (1994a): Energy-efficiency investments and public policy. *The Energy Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 43-65.
- Jaffe, A. B./Stavins, R. N. (1994b): The energy-efficiency gap: What does it mean? *Energy Policy*, 22 (10), pp. 804-810.
- Jaffe, A. B./Newell, R.G./Stavins, R. N. (2000): Technological Change and the Environment, *NBER Working Paper 7970*.
- Jochem, E./Gruber, E. (1990): Obstacles to rational electricity use and measures to alleviate them. *Energy Policy*, May, pp. 340-350.
- Jungmittag, A./Blind, K./Grupp, H.; Innovation, Standardisation and the Long-term Production Function. A Cointegration Analysis for Germany 1960-1996. *Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (ZWS)* Vol. 119 (1999), S. 205-222.
- Keuter, A. (1994): *Determinanten der industriellen Forschung und Entwicklung*. Frankfurt.
- Klemmer, P. et al. (1999): *Umweltinnovationen. Anreize und Hemmnisse*, Band 2 der Schriftenreihe "Innovative Wirkungen umweltpolitischer Instrumente", Analytica Verlag Berlin.
- Köhle, S.: Einflussgrößen des elektrischen Energieverbrauchs und des Elektrodenverbrauchs von Lichtbogenöfen. *Stahl und Eisen* 112 (1992) Nr. 11, S. 59-67
- Löschel, Andreas (2001): *Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey*. ZEW Discussion Paper No. 01-62, Mannheim.
- Meyer, B./Bockermann, A./Ewerhart, G./Lutz, C. (1999): *Marktkonforme Umweltpolitik. Wirkungen auf Luftschadstoffemissionen, Wachstum und Struktur der Wirtschaft*. Physica, Heidelberg.
- Meyer, B./Keuter, A./Voßkamp, R. (1993): The Estimation of Barone-Curves Based on the Iwai-Model. In: *Journal of Economic Behavior and Organization*. Vol. 21.
- Nelson, R./Winter, S. (1982): *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press. Cambridge (Massachusetts) and London.

- Nordhaus, W. (1999): Modelling Induced Innovation in Climate-Change Policy, Paper presented at the Workshop on Induced Technological Change and the Environment. IIASA, Laxenberg, Austria, June 1999.
- Ostertag, K. (2002): "No-regret" potentials in energy conservation. An analysis of their relevance, size and determinants. Doctoral Thesis, Strasbourg, Université Louis Pasteur (Buchveröffentlichung voraussichtlich Ende 2002).
- Pavitt, K. (1984): Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory. *Research Policy*, Vol. 13, S. 343-373.
- Pavitt, K./Robson, M./Townsend, J. (1989): Accumulation, Diversification and Organisation of Technological Activities in UK Companies, 1945-83. In: Dodgson (ed.): *Technology, Strategy and the Firm: Management and Public Policy*. Burnt Mill, Harlow.
- Prange, W./Schneider, Ch.: Automobile Leichtbauinitiativen der internationalen Stahlindustrie. *Stahl und Eisen* 121 (2001), Nr. 7, S. 23-29.
- Rahmeyer, F.(1993): Technischer Wandel und sektorales Produktivitätswachstum. *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik. Bd. 211/3-4*.
- Sanstad, A. H./Howarth, R. B. (1994): Normal markets, market imperfections and energy efficiency. *Energy Policy*, 22 (10), pp. 811-818.
- Schleich, J. (2001): The impact of fuel prices on energy intensity in the West German manufacturing sector. Paper presented at the International Summer School on Economics, Innovation, Technological Progress, and Environmental Policy, Seon, September 2001.
- Silverberg, G. (1988): Modelling economic dynamics and technical change: Mathematical approaches to self-organisation and evolution. In: Dosi, G. Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G., Soete, L.(eds.): *Technical Change and Economic Theory*. Pinter Publishers, London and New York.
- Simon, H. (1947): *Administrative Behaviour: A Study on Decision-making Processes in Administrative Organizations*. Macmillan Company, New York.
- Van der Zwaan, B. C. C./Gerlagh, R./Klaassen, G./Schrattenholzer, L. (2002): Endogenous technological change in climate change modelling. *Energy Economics* 24, S. 1-19.
- VDEH (Verein Deutscher Eisenhüttenleute): Persönliche Mitteilungen 2001 und 2002.

- Vögele, S. (2000): DIOGENES. Ein gesamtwirtschaftliches Modell zur Analyse von Energie- und Umweltpolitiken. Modellstruktur und Anwendung auf die Elektrizitätswirtschaft von Baden-Württemberg. Dissertation Universität Osnabrück.
- Vogt, C. (1997): Zur Bestimmung von Innovationsaktivitäten. Eine empirische Analyse des Weltautomobilmarktes. Frankfurt.
- Welsch, H. (1996): Klimaschutz, Energiepolitik und Gesamtwirtschaft. Eine allgemeine Gleichgewichtsanalyse für die Europäische Union.
- Weyant, J. P. (1993): Costs of Reducing Global Carbon Emissions. In: *Journal of Economic Perspectives* 7, S.27-46.
- WV Stahl/VDEH (Wirtschaftsvereinigung Stahl/Verein Deutscher Eisenhüttenleute; Hrsg.): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie, diverse Jahrgänge. Verlag Stahleisen Düsseldorf.

Anhang: Schätzergebnisse für die Stahlindustrie

In der folgenden Übersicht sind die Ergebnisse der OLS-Schätzungen der im Textteil erläuterten Zusammenhänge mit den geschätzten Koeffizienten, den zugehörigen t-Statistiken, dem bereinigten Bestimmtheitsmaß sowie dem Durbin-Watson- Koeffizienten wiedergegeben.

Best practice Stromverbrauch bei der E-Stahlerzeugung in TJ/kt

$$EBS = 2,5928 \cdot \text{intercept} + -0,2769 \cdot \text{PEST} + -0,1136 \cdot \text{PEST}[1] + -0,2323 \cdot \text{PEST}[2] + -0,3110 \cdot \text{PEST}[3]$$

	RBSQ	DW	obser
	0,965	1,3679	14
name	reg coeff		t-val
intercept	2,5928		51,1986
PEST	-0,2769		-2,9164
PEST[1]	-0,1136		-0,982
PEST[2]	-0,2323		-1,8943
PEST[3]	-0,311		-3,3115

Best practice Verbrauch fossile ET in TJ/kt

$$RBF = 37,5962 \cdot \text{intercept} + -0,0004 \cdot \text{FEM}/1000 + -8,3383 \cdot \text{PKST}[1] + -0,4804 \cdot (\text{RUML-INFL})$$

	RBSQ	DW	obser
	0,8725	2,4727	16
name	reg coeff		t-val
intercept	37,5962		24,4887
FEM/1000	-0,0004		-2,1299
PKST[1]	-8,3383		-4,7402
(RUML-INFL)	-0,4804		-3,9302

Spezifischer Stromverbrauch, E-Stahl, in TJ/kt

$$ESS = 0,9945 \cdot (\text{EKK}[1] \cdot \text{ESS}[1] + \text{EIB} \cdot \text{EBS}) / (\text{EKK}[1] + \text{EIB})$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9965	1,1109	16
name	reg coeff		t-val
$(\text{EKK}[1] \cdot \text{ESS}[1] + \text{EIB} \cdot \text{EBS}) /$	0,9945		1419,7698

Spezifischer Verbrauch fossile ET, O-Stahl in TJ/kt

$$\text{OSF} = 1,1665 \cdot \text{RBF} + 0,0443 \cdot (\text{RUML-INFL})$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9966	1,5248	16
name	reg coeff		t-val
RBF	1,1665		341,0827
(RUML-INFL)	0,0443		2,3676

Inputkoeffizient Strom, Stahlind.

$$\text{EEST} = 1,3383 \cdot \text{intercept} + 7,6430 \cdot \text{EAS}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,7993	1,4327	16
name	reg coeff		t-val
intercept	1,3383		8,3689
EAS	7,643		7,7928

Inputkoeffizient fossile Energieträger, Stahlind.

$$\text{FEST} = 1,9790 \cdot \text{intercept} + -0,3020 \cdot \text{D91FF} + 0,3572 \cdot \text{OAS}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,5115	1,6814	16
name	reg coeff	t-val	
intercept	1,979	1,6138	
D91FF	-0,302	-2,3713	
OAS	0,3572	3,1714	

Inputkoeffizient verteilte Gase

$$\text{VGST} = 0,3188 \cdot \text{intercept} + 0,1209 \cdot \text{FEST} + -0,0861 \cdot \text{D91FF}[1]$$

	RBSQ	DW	obser
	0,6363	1,7435	16
name	reg coeff	t-val	
intercept	0,3188	1,3129	
FEST	0,1209	2,9065	
D91FF[1]	-0,0861	-2,8278	

Inputkoeffizient Steinkohle

$$\text{SKST} = 2,1839 \cdot \text{intercept} + 0,1008 \cdot \text{FEST} + -2,1151 \cdot \text{pvge05/pvge06}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,7707	1,1671	9
name	reg coeff	t-val	
intercept	2,1839	6,6369	
FEST	0,1008	1,739	
pvge05/pvge06	-2,1151	-4,921	

Inputkoeffizient Koks

$$\text{KOST} = -0,1575 \cdot \text{intercept} + 0,8207 \cdot \text{FEST} + -1,1790 \cdot \text{SKST}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9472	0,9455	17
name	reg coeff	t-val	
intercept	-0,1575	-0,3101	
FEST	0,8207	9,4785	
SKST	-1,179	-11,2589	

Inputkoeffizient Leichtes Heizöl

$$\text{LHST} = 0,0828 \cdot \text{intercept} + 0,0177 \cdot \text{D91FF}[4] + -0,0008 \cdot \text{ZEIT}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,8105	1,6279	17
name	reg coeff	t-val	
intercept	0,0828	6,7393	
D91FF[4]	0,0177	8,2605	
ZEIT	-0,0008	-5,8433	

Stahlproduktion in Mio. t

$$\text{GRS} = -19,9494 \cdot \text{intercept} + 0,2872 \cdot \text{xg16} + 0,3875 \cdot \text{ZEIT}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,5521	1,7669	17
name	reg coeff	t-val	
intercept	-19,9494	-1,4504	
xg16	0,2872	4,6035	
ZEIT	0,3875	3,6171	

Anteil der Elektrostaahlprod. in vH

$$QERS = 35,2739 \cdot \text{intercept} + -21,6778 \cdot \text{pvge01/pvge06} + 23,6027 \cdot \text{EPK/OSPK}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,7812	1,6168	15
name	reg coeff		t-val
intercept	35,2739		2,6839
pvge01/pvge06	-21,6778		-1,9296
EPK/OSPK	23,6027		2,6255

Preis für Eisenerz

$$\text{PERZ} = -29,5952 \cdot \text{intercept} + 0,9098 \cdot \text{pmg07}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9173	1,3651	17
name	reg coeff		t-val
intercept	-29,5952		-4,1733
pmg07	0,9098		13,3561

Stahlpreis in DM/t

$$\text{PSTAHL} = -786,1694 \cdot \text{intercept} + 12,7079 \cdot \text{pg16}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,8816	2,0579	15
name	reg coeff		t-val
intercept	-786,1694		-6,1997
pg16	12,7079		10,259

Bruttoinvestitionen Elektrostaahl in Mio. DM

$$\text{EIB} = -10,1811 \cdot (\text{RUML-INFL}) + 262,4218 \cdot \text{ERS/EPK} + 230,0829 \cdot (\text{D90[4]} + \text{D90[5]}) + -12,7142 \cdot \text{PSCH/PERZ}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,6663	1,8014	15
name	reg coeff		t-val
(RUML-INFL)	-10,1811		-0,8787
ERS/EPK	262,4218		2,3511
(D90[4]+D90[5])	230,0829		4,9477
PSCH/PERZ	-12,7142		-1,3228

Bruttoinvestitionen Qxygenstaahl in Mio. DM

$$\text{OIB} = 597,7007 \cdot \text{ORS/OSPK} + 828,6411 \cdot \text{D80[5]}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,5852	0,7781	16
name	reg coeff		t-val
ORS/OSPK	597,7007		10,6074
D80[5]	828,6411		4,8349

Abschreibungen Elektrostaahl in Mio. DM

$$\text{EIA} = 0,0667 \cdot \text{EKK}$$

	RBSQ	DW	obser
	1	2,5	16
name	reg coeff		t-val
EKK	0,0667		94062072

Abschreibungen Qxygenstaahl in Mio. DM

$$\text{OIA} = 0,0656 \cdot \text{OKK}$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9997	0,2402	16
name	reg coeff		t-val
OKK	0,0656		2970,9966

Kapazität Elektrostahl in Mio. t

$$EPK = 0,0068 \cdot EKK + 2,7115 \cdot D90FF$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9153	1,724	16
name	reg coeff		t-val
EKK	0,0068		53,5554
D90FF	2,7115		10,1527

Kapazität Oxygenstahl in Mio. t

$$OSPK = 0,0044 \cdot OKK + 4,3531 \cdot (D90 + D90[1] + D90[2]) + 0,0852 \cdot ZEIT$$

	RBSQ	DW	obser
	0,7465	1,5548	12
name	reg coeff		t-val
OKK	0,0044		5,2594
(D90+D90[1]+D90[2])	4,3531		6,4005
ZEIT	0,0852		1,3177

Spezifischer Arbeitsinput, E-Stahl, Kopf/kt

$$\log(KARES) = -0,7648 \cdot \log(wsn16/pg16) + -0,3397 \cdot \log(FEE/1000/pg26)$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9065	1,8021	16
name	reg coeff		t-val
$\log(wsn16/pg16)$	-0,7648		-10,6394
$\log(FEE/1000/pg26)$	-0,3397		-24,8609

Spezifischer Arbeitsinput, O-Stahl, Kopf/kt

$$\log(KAROS) = -0,9736 \cdot \log(wsn16/pg16) + -0,3456 \cdot \log(FEM/1000/pg21)$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9176	2,0367	16
name	reg coeff		t-val
$\log(wsn16/pg16)$	-0,9736		-12,6145
$\log(FEM/1000/pg21)$	-0,3456		-19,0405

Sonstige Arbeiter in der Stahlindustrie in 1000

$$\log(RARST) = 13,0813 \cdot \text{intercept} + -0,8211 \cdot \log(wsn16/pg16) + -0,3343 \cdot \log(FEM/pg21) + 0,2796 \cdot \log(xg16)$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9474	1,806	16
name	reg coeff		t-val
intercept	13,0813		4,9871
$\log(wsn16/pg16)$	-0,8211		-9,619
$\log(FEM/pg21)$	-0,3343		-1,5176
$\log(xg16)$	0,2796		1,2182

Angestellte in der Stahlindustrie insgesamt in 1000

$$\log(ANST) = 12,1353 \cdot \text{intercept} + -0,6903 \cdot \log(wsn16/pg16) + -0,2023 \cdot \log(FEM/pg21) + 0,1230 \cdot D90[1] + 0,1986 \cdot D90[2]$$

	RBSQ	DW	obser
	0,9199	1,565	16
name	reg coeff		t-val
intercept	12,1353		4,8718
$\log(wsn16/pg16)$	-0,6903		-9,4665
$\log(FEM/pg21)$	-0,2023		-0,8965
D90[1]	0,123		2,0042
D90[2]	0,1986		3,3969