

Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem „bottom-up“ Energienachfrage-Modell für die Industrie

Eine Fallstudie über die Stahlindustrie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften
(Dr. rer. pol.)

beim interdisziplinären Institut für Umwelt-, Sozial- und Humanwissenschaften
Abteilung Energie- und Umweltmanagement der Europa-Universität Flensburg
eingereichte

DISSERTATION

von

Mag. rer. soc. oec. Andrea Herbst

Referent: Prof. Dr. Olav Hohmeyer
Korreferent: Prof. em. Dr. Eberhard Jochem

2017

Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen, dem Internet und mündlicher Kommunikation) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos unter genauer Quellenangabe als solche kenntlich gemacht. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe sogenannter Promotionsberaterinnen / Promotionsberater in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar Geld oder geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Andrea Herbst

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	7
TABELLENVERZEICHNIS.....	9
ZUSAMMENFASSUNG.....	12
1. MOTIVATION UND PROBLEMSTELLUNG	16
1.1 ÜBERSICHT ENERGIEMODELLIERUNGSANSÄTZE	16
1.1.1 Top-down Modelle	17
1.1.2 Bottom-up Modelle	18
1.1.3 Stärken, Schwächen und Grenzen der Modellierungs-ansätze	19
1.1.4 Hybride Energiesystemmodellierung.....	22
1.2 DEFINITION STRUKTURWANDEL	24
1.2.1 Intersektoraler und intra-sektoraler Strukturwandel.....	25
1.2.2 Intra-industrieller Strukturwandel.....	27
1.3 BEDEUTUNG MAKROÖKONOMISCHER TREIBER UND DEREN PLAUSIBILITÄT	27
1.3.1 Fall 1: Beschränkte Verfügbarkeit makroökonomischer Information	28
1.3.2 Fall 2: Kopplung eines bestehenden makroökonomischen Modells mit einem bottom-up Energienachfragemodell für die Industrie	29
2. ZIELSETZUNG DER ARBEIT	30
3. MODELLUMGEBUNG: EINORDNUNG UND ABGRENZUNG	33
3.1 VERGLEICH VERSCHIEDENER MODELLSYSTEME	33
3.2 DIE MODELLE	48
3.2.1 Das makroökonomische top-down Modell ASTRA	49
3.2.2 Das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry	50
3.2.3 Gemeinsame Modellhistorie	51
3.3 BERÜCKSICHTIGUNG UNTERSCHIEDLICHER MODELLSTRUKTUR	51
3.4 TYPISIERUNG VON ENERGIEINTENSIVEN GRUNDSTOFFEN BZW. ZWISCHENPRODUKTEN FÜR ENERGIEBEDARFSPROJEKTIONEN	52
4. FALL 1: MODELLIERUNG DER WERTSCHÖPFUNG DES INDUSTRIESEKTORS BEI BESCHRÄNKTER VERFÜGBARKEIT MAKROÖKONOMISCHER INFORMATION	58
4.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG.....	58
4.2 METHODISCHES VORGEHEN UND DATEN.....	61
4.2.1 Verwendete ökonometrische Methoden	62

4.2.1.1	Methode für den gesamten Sektor Verarbeitendes Gewerbe.....	63
4.2.2	<i>Daten</i>	68
4.3	ERGEBNISSE VERARBEITENDES GEWERBE GESAMT	70
4.3.1	<i>Modellqualität</i>	76
4.3.1.1	Nicht-Stationäre Reihen	76
4.3.1.2	Fixed-effects oder Random-effects	82
4.3.1.3	Reihenkorrelation	83
4.3.1.4	Heteroskedastizität	83
4.3.1.5	Querschnittsabhängigkeit	83
4.3.2	<i>Kritische Diskussion</i>	85
5.	FALL 2: KOPPLUNG EINES MAKROÖKONOMISCHEN MODELLS MIT EINEM ENERGIENACHFRAGEMODELL FÜR DIE INDUSTRIE – EINE FALLSTUDIE ÜBER DIE EUROPÄISCHE STAHLINDUSTRIE	86
5.1	DIE EUROPÄISCHE STAHLINDUSTRIE.....	88
5.1.1	<i>Konzeptionelle Strukturierung der Übersetzung von Bruttowertschöpfung in physische Einheiten</i>	91
5.2	METHODISCHE VORGEHENSWEISE UND MODELLBILDUNG ZUR PHYSISCHEN PRODUKTION.....	94
5.2.1	<i>Szenariobeschreibung und weitere Sektordifferenzierung</i>	94
5.2.2	<i>Elastizitäten-Methode</i>	99
5.2.3	<i>Strenges Korrelationsverfahren</i>	100
5.2.4	<i>Materialflussverfahren</i>	103
5.2.4.1	Methodik: Regressionsanalyse	103
5.2.4.2	Methodik: vereinfachtes Materialflussverfahren	119
5.2.4.3	Daten	131
6.	FALL 2: SIMULATIONSERGEBNISSE DER MODELLKOPPLUNG	161
6.1	NACHFRAGE- UND SCHROTTVERFÜGBARKEITSPROJEKTIONEN BIS 2035.....	161
6.2	PHYSISCHE PRODUKTIONSPROJEKTIONEN BIS 2035	171
6.2.1	<i>Sensitivitäten</i>	174
6.3	ENERGIENACHFRAGESIMULATION MIT FORECAST INDUSTRY	178
6.4	SIMULATION DER GESAMTWIRTSCHAFTLICHEN EFFEKTE MIT ASTRA	181
7.	KRITISCHE DISKUSSION	184
8.	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	192
9.	ANHANG.....	197
9.1	ANHANG ZU KAPITEL 3.....	197
9.2	ANHANG ZU KAPITEL 5.....	198

LITERATURVERZEICHNIS.....	199
---------------------------	-----

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines möglichen hybriden Systems	22
Abbildung 2: Entwicklung der Wirtschaftsstruktur, Deutschland (oben) und China (unten), 1970 – 2007....	26
Abbildung 3: Bruttoinlandsprodukt pro Kopf 1960, 1980, 2000, 2011 (in Euro 2005)	59
Abbildung 4: Struktur der Wirtschaft EU-28 für das Jahr 2000 (oben) und 2014 (unten)	60
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Modellbildung.....	87
Abbildung 6: Rohstahlproduktion und sichtbarer Stahlverbrauch EU-27 (1995-2012)	88
Abbildung 7: Europäische Stahlnachfrage nach Sektoren (2010)	90
Abbildung 9: Historische Schrott- und Eisenerzpreisentwicklung (1978-2012)	132
Abbildung 10: Historische Erdgas- und Kohlepreisentwicklung (1978-2012).....	133
Abbildung 11: Historische Strompreisentwicklung (1978-2012).....	133
Abbildung 12: Rohstahlproduktion (1969-2012) (links) und sichtbarer Stahlverbrauch (1950-2012) (rechts) FR, DE, IT, PL	137
Abbildung 13: Rohstahlproduktion nach Prozess FR, DE, IT, PL (1974-2012)	138
Abbildung 14: Indirekte Stahl-Nettoexporte FR, DE, IT, PL (1950-2035) mit und ohne Materialstrategieverbesserungen (MSV)	146
Abbildung 15: Schrott-Nettoexporte FR, DE, IT, PL (1990-2035) vor und nach Modelliteration.....	155
Abbildung 16: Sichtbarer Stahlverbrauch (sSV) vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (1950-2035)	163
Abbildung 17: Tatsächlicher Stahlverbrauch vor und nach MSV FR (links oben), DE (rechts oben), IT (links unten), PL (rechts unten) (1950-2035)	165
Abbildung 18: Inländisches Schrottaufkommen nach MSV FR (links oben), DE (rechts oben), IT (links unten), PL (rechts unten) (2010-2035)	167
Abbildung 19: Sensitivität der inländischen Schrottverfügbarkeit nach MSV: FR, DE, IT, PL (2010-2035): durchschnittliche Nutzungsdauer +/-30%	169
Abbildung 20: Rohstahlproduktion vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (1950-2035).....	172
Abbildung 21: Sensitivitäten der Stahlproduktion nach MSV FR (oben), DE (unten): 100 EoL-Recycling, plus 20% Nachfrage, minus 20% Nachfrage	175
Abbildung 22: Sensitivitäten der Stahlproduktion nach MSV IT (oben), PL (unten): 100 EoL-Recycling, plus 20% Nachfrage, minus 20% Nachfrage	176
Abbildung 23: Energienachfrage nach Prozess FR (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen	178
Abbildung 24: Energienachfrage nach Prozess DE (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen	179
Abbildung 25: Energienachfrage nach Prozess IT (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen	180

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 26: Energienachfrage nach Prozess PL (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen	181
Abbildung 27: Plausibilitätskontrolle Schrottaufkommen und –verbrauch FR, DE, IT, PL (2005-2010).....	187

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kriterien des Modellvergleichs	35
Tabelle 2: Zusammenfassung ausgewählter Modellansätze	37
Tabelle 2: Zusammenfassung ausgewählter Modellansätze (Fortsetzung).....	38
Tabelle 2: Zusammenfassung ausgewählter Modellansätze (Fortsetzung).....	39
Tabelle 3: Zusammenfassung ausgewählte Kriterien zum Strukturwandel, Materialeffizienz.....	44
Tabelle 4: Gegenüberstellung Industriezweige FORECAST Industry und ASTRA	52
Tabelle 5: Typisierung von Industrieprodukten	54
Tabelle 6: Erwartete Zusammenhänge gesamtes Verarbeitendes Gewerbe	66
Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten Verarbeitendes Gewerbe: gesamter Datensatz.....	67
Tabelle 8: Korrelationskoeffizienten Verarbeitendes Gewerbe: Deutschland	67
Tabelle 9: Verwendete Datenquellen	69
Tabelle 10: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichung I, III, V, VI)	72
Tabelle 10: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichung I, III, V, VI) (Fortsetzung)...	73
Tabelle 11: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichungen II, IV, VII, VIII)	74
Tabelle 11: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichungen II, IV, VII, VIII) (Fortsetzung)	75
Tabelle 12: Test auf Nicht-Stationarität: abhängige und unabhängige Variablen	77
Tabelle 13: Test auf Nicht-Stationarität: erste Differenzen	78
Tabelle 14: Ausgewählte Regressionsergebnisse Verarbeitendes Gewerbe, Differenzen (Gleichungen D.I, D.II, D.III, D.IV)	81
Tabelle 15: Hausman-Spezifikations-Test: Modelle D8 und D9.....	82
Tabelle 16: Lagram-Multiplier-Test: Modelle D8 und D9	83
Tabelle 17: Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeit-Test: Modelle D8 und D9	84
Tabelle 18: Regressionsergebnisse Driscoll-Kraay Standardfehlern [xtscc] (Modelle D8 und D9)	84
Tabelle 19: Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung (basierend auf ASSIST-Referenzszenario)	94
Tabelle 20: Bruttowertschöpfungsentwicklung Verarbeitendes Gewerbe und Baugewerbe „hohes Wachstum“ (basierend auf ASSIST-Referenzszenario).....	95
Tabelle 21: Entwicklung der Bruttowertschöpfung (BWS) stahlnachfragender Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes „hohes Wachstum“ (2010-2035) (basierend auf ASSIST-Referenzszenario)	96
Tabelle 22: Differenzierung des Sektors „Metallprodukte“ (in Prozent des Aggregats)	97
Tabelle 23: Erwartete Zusammenhänge: sichtbarer Stahlverbrauch	105
Tabelle 24: Korrelationskoeffizienten sichtbarer Stahlverbrauch	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 25: Test auf Nicht-Stationarität: sichtbarer Stahlverbrauch.....	106
Tabelle 26: Hausman-Spezifikations-Test: sichtbarer Stahlverbrauch	107
Tabelle 27: Lagram-Multiplier-Test: sichtbarer Stahlverbrauch	107
Tabelle 28: Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeits-Test: sichtbarer Stahlverbrauch	108
Tabelle 29: Modifizierter-Wald-Test auf Heteroskedastizität: sichtbarer Stahlverbrauch.....	108
Tabelle 30: Regressionsergebnisse sichtbarer Stahlverbrauch, Differenzen	109
Tabelle 31: Erwartete Zusammenhänge Rohstahlproduktion	111
Tabelle 32: Korrelationskoeffizienten Rohstahlproduktion gesamtes Panel (1978-2012).....	112
Tabelle 33: Test auf Nicht-Stationarität: Rohstahlproduktion	113
Tabelle 34: Vorläufige Regressionsergebnisse Rohstahlproduktion, Differenzen	115
Tabelle 35: Reduzierte Formen von Modell C	116
Tabelle 36: Hausman-Spezifikations-Test.....	117
Tabelle 37: Breusch-Pagan-Lagrangian-Multiplikator-Test.....	117
Tabelle 38: Lagram-Multiplikator-Test	117
Tabelle 39: Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeits-Test	118
Tabelle 40: Regressionsergebnisse Rohstahlproduktion, Differenzen.....	119
Tabelle 41: Energieträgerpreise zur Energiekostenberechnung in Euro2005/kWh	135
Tabelle 42: RCA der Stahlindustrie historisch und Projektion (FR, DE, IT, PL)	136
Tabelle 43: Sektorale Aufteilung des sichtbaren Stahlverbrauchs.....	140
Tabelle 44: Strukturwandel-Quotient	143
Tabelle 45: Materialstrategie Parameter für Materialeffizienz, -substitution, intensivere Nutzung und Wiederverwendung.....	145
Tabelle 46: Durchschnittliche Nutzungsdauer.....	148
Tabelle 47: Eigenschrottrate in Prozent.....	150
Tabelle 48: Neuschrottrate in Prozent	151
Tabelle 49: End-Of-Life-Recyclingrate in Prozent.....	153
Tabelle 50: Schrottpreiselastizitäten der jährlichen Wachstumsraten: historisch (1990-2012) und Projektion	154
Tabelle 51: Schrotteinsatz Oxygenstahl (in Tonnen pro Tonne)	157
Tabelle 52: Schrotteinsatz Elektrostahl (in Tonnen pro Tonne)	157
Tabelle 53: Sinter-Faktor pro Tonne Oxygenstahl (in Tonnen pro Tonne)	159
Tabelle 54: Koks-Faktor pro Tonne Oxygenstahl (in Tonnen pro Tonne)	160
Tabelle 55: Walzstahl-Faktor pro Tonne Rohstahl (in Tonnen pro Tonne).....	161
Tabelle 56: Tatsächlicher Stahlverbrauch (tSV) vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (2010, 2020, 2035)	164

Tabelle 57: Sektorale Aufteilung des tatsächlichen Stahlverbrauchs (<i>tSV</i>) nach MSV FR, DE, IT, PL (2010, 2035).....	165
Tabelle 58: Zusammensetzung des inländischen Schrottaufkommens (<i>SchAufk</i>) nach MSV in Prozent FR, DE, IT, PL (2010, 2035).....	168
Tabelle 59: Summe des Neu- und Altschrottsaufkommen je Sektor als prozentualer Anteil am inländischen Schrottaufkommen nach MSV FR, DE, IT, PL (2010, 2035)	168
Tabelle 60: Tatsächliches Schrottaufkommen/-verbrauch in Millionen Tonnen nach Iteration FR, DE, IT, PL (2010, 2020, 2035) vor und nach MSV	170
Tabelle 61: Oxygen- und Elektrostahlproduktion in Millionen Tonnen vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (2010, 2020, 2035)	173
Tabelle 62: Veränderung der Bruttowertschöpfung der Sektoren Energie und Metallprodukte	183
Tabelle 63: Zuordnung der HS 1992 Codes zur Typisierung von Industrieprodukten	197
Tabelle 64: Schrotteinsatz pro Tonne Elektrostahl (in Tonnen)	198

Zusammenfassung

Motivation und Problemstellung

Die Modellierung von Energiebedarf und –angebot sowie von Wirkungen energiepolitischer Maßnahmen als Werkzeug zur Beantwortung von energiebezogenen Fragestellungen ist bei heutigen Entscheidungsprozessen in der Energie- und Klimapolitik auf nationaler, europäischer Ebene und selbst globaler Ebene (z.B. IEA, IPCC) sowie in großen Energieunternehmen bereits gängige Praxis. Größere Forschungs- und Modellkonsortien wie auch individuelle, spezialisierte Institute und Planungsgruppen befassen sich mit den verschiedensten Aspekten von Energieangebot und -nachfrage, Energiewandlung und -transport oder der Energiewende und dem Beitrag eines Landes zum Erreichen des 2°C-Klimazieles.

Lange Zeit lag der methodische und inhaltliche Fokus der Energiemodellierung auf den angebotsorientierten Modellierungsansätzen, welche zum Beispiel den optimalen Energiemix zur Erreichung der energie- und umweltpolitischen Ziele ermittelten. In den letzten Jahren jedoch ließ sich ein zunehmender Trend auch zu nachfrageorientierten Fragestellungen (z.B. Einsparoptionen durch Energieeffizienz-Technologien und Lastmanagement) feststellen. Die Auswahl an Modellierungsansätzen zur Beantwortung der vielfältigen energietechnischen und -wirtschaftlichen Fragestellungen, wurde durch die Forderung nach Analysen unterschiedlicher Rahmenbedingungen und nach Antworten auf gesamtwirtschaftliche Wirkungen unterschiedlicher Energiepolitiken, noch erweitert.

Vereinfacht kann man Energiemodelle in eher gesamtwirtschaftlich angelegte top-down und technologisch ausgerichtete bottom-up Modelle unterscheiden. Während es sich bei den ersteren oft um makroökonomische Modelle (oft mit erweitertem Energiebereich) zur Abbildung von gesamtwirtschaftlichen Effekten von Energie- und Klimapolitik handelt, beschreiben letztere in erster Linie technologie- und branchenspezifische Modelle, welche geeignet sind sehr konkrete Fragestellungen (z.B. Auswirkung eines Mindeststandards oder einer neuen Norm auf den Energieverbrauch eines bestimmten Prozesses) zu beantworten, aber völlig ungeeignet um gesamtwirtschaftlich stimmige Rahmenbedingungen oder Wirkungen zu beschreiben. Da beide Modellarten Stärken und Schwächen aufweisen, versucht die Energiesystemforschung seit etwa Mitte der 1990er Jahre, beide Modelltypen in hybriden Modellierungssystemen zu verbinden.

Versucht man diese beiden Modellarten miteinander zu kombinieren steht man jedoch vor dem Problem, dass makroökonomische top-down Modelle ökonomische und demographische Größen, wie zum Beispiel das Bruttoinlandsprodukt und die Bevölkerung, als Input für die bottom-up Energienachfragemodelle liefern, diese jedoch physische Größen, wie zum Beispiel produzierte Tonnen energieintensiver (Basis-)Massenprodukte in der Indust-

rie, als Treiber zur Berechnung der zukünftigen Energienachfrage benötigen. Insbesondere bei der Modellierung der industriellen Energienachfrage spielt die plausible Entwicklung der physischen Produktion energieintensiver Industrien eine maßgebliche Rolle für das Modellergebnis (weshalb auch der Fokus dieser Arbeit auf einem der energieintensiven Industriesektoren, der Stahlindustrie, liegt).

Folglich wird eine im Szenario-Kontext konsistente, plausible und transparente Übersetzung der ökonomischen oder demographischen Information in die physischen Treiber der Energienachfrage benötigt, um Energienachfrageprojektionen zu ermöglichen, welche in beiden Modellarten als konsistent angesehen werden können. Diese Übersetzung gestaltet sich jedoch nicht als einfach, da im Bereich der physischen Produktion von energieintensiven (Basis-) Massenprodukten eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren deren Produktionsentwicklung bestimmen. Eine besondere Rolle spielen hierbei strukturelle Änderungen zwischen (intra-sektoraler Strukturwandel) bzw. innerhalb (intra-industrieller Strukturwandel) von Branchen. Dies können auf intra-industrieller Ebene Nachfrageveränderungen (z.B. durch Produktion höherwertiger Produkte), Trends zu höherer Wertschöpfung (z.B. durch produktbegleitende Dienstleistungen) und/oder veränderte Materialstrategien (z.B. durch erhöhte Materialeffizienz/Materialsubstitution, Änderungen im Recyclingverhalten) sein.

Zielsetzung und Methodisches Vorgehen

In der Praxis werden häufig, bei der Nutzung beider Modelltypen, nur Expertenschätzungen für die Transformation der makroökonomischen Ergebnisse in die Inputdaten der technologie-spezifischen Modelle gemacht, mit der Konsequenz, dass diese intransparent und zeitintensiv bei veränderten Szenariorechnungen sind.

Deshalb wurde in dieser Arbeit ein Modul entwickelt, welches das makroökonomische Modell ASTRA und das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry miteinander verbindet. Dieser Brückenschlag zwischen den beiden Modellarten wurde beispielhaft für die europäische Stahlindustrie und vier der wichtigsten europäischen stahlproduzierenden Länder (Frankreich, Deutschland, Italien, Polen) mit dem Zeithorizont 2010 bis 2035 durchgeführt. Anhand dieser Fallstudie wurden auch die Möglichkeiten verbesserter Materialeffizienz, -substitution und verbesserten Recyclings sowie Veränderungen im Nutzerverhalten mittels eines Stoffflussmodells exemplarisch simuliert, um eine plausible und transparente Modellierung der primären und sekundären Produktionsroute mit ihren unterschiedlichen Energieverbräuchen zu gewährleisten.

Dieser Modellierungsansatz sollte damit eine Transformation der makroökonomischen Information (z.B. Bruttowertschöpfung) in physische Tonnen produzierten Stahls auf Prozessebene (Unterscheidung primäre und sekundäre Produktionsroute) ermöglichen, d.h.

eine Modellkopplung, welche die zuvor genannten methodischen Herausforderungen transparent und Szenario-konsistent berücksichtigt.

Hierzu wurden verschiedene methodische Ansätze miteinander kombiniert und auch ein Stahlflussmodell für die ausgewählten vier europäischen Staaten entwickelt. Strukturelle Änderungen der Nachfrage konnten durch panel-ökonometrische Ansätze und Expertenbefragungen berücksichtigt werden, während durch die Materialflussmodellierung sowohl Änderungen des Recyclingverhaltens (höhere Recyclingraten, Wiederverwendung, etc.) als auch Materialstrategieverbesserungen transparent abgebildet werden konnten. Des Weiteren berücksichtigt der hier vorgestellte methodische Ansatz die zukünftige Schrottverfügbarkeit als Obergrenze, insbesondere der sekundären Produktionsroute (Elektrostahl), unter der Berücksichtigung von Szenario-abhängigen Annahmen zum indirekten Stahlhandel sowie Szenario-abhängigen Annahmen zum Schrottaußenhandel der betrachteten Schwerpunktländer.

Die so ermittelten physischen Produktionsprojektionen für Stahl fließen dann als Input in das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry, welches basierend auf diesen Zahlen dann die Energienachfrage auf Prozessebene mit und ohne Materialstrategieverbesserungen beispielhaft für die Stahlindustrie berechnet.

Zur Schließung des hybriden Modellsystems werden dann die Investitionen in Materialstrategieverbesserungen, die Programmkosten und die vermiedenen Energiekosten ermittelt und an das makroökonomische Modell zurück gespielt. Die Veränderungen der Ergebnisse dieses Szenarios gegenüber dem Referenz-Szenario (ohne Materialstrategieverbesserungen) geben dann, die Auswirkungen von Materialstrategieverbesserungen auf Wirtschaft, Beschäftigung, Einkommen oder Außenhandel wieder.

Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse basieren auf dem für die Modellkopplung verwendete Referenz-Szenario des makroökonomischen Modells ASTRA aus dem europäischen ASSIST- (Assessing the Social and Economic Impacts of Past and Future Sustainable Transport)-Projekt (Krail und Schade 2014; Krail et al. 2014). In der nachfolgenden Arbeit wurde dies jedoch nicht als Referenz-Szenario (wie im ASSIST-Projekt) bezeichnet, sondern als industrielle „Hochwachstums-Variante“ (mit rund 2% p.a. im Verarbeitenden Gewerbe der betrachteten Schwerpunktländer). Diese in den Szenario-Annahmen hinterlegte Re-Industrialisierung hat maßgeblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse, da diese wie bereits zuvor erwähnt plausibel und konsistent zu den Szenario-Annahmen sein müssen. So kommt es in dieser „Hochwachstums-Variante“ zu einem Zuwachs der Stahlnachfrage und -produktion im Vergleich mit dem Basisjahr 2010.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass Materialstrategieverbesserungen durchaus bereits mittelfristig bis langfristig (bis 2035) Potential zur Reduktion der Stahlnachfrage und damit der Energienachfrage und folglich der Treibhausgasemissionen haben. Dies gilt insbesondere in Ländern wie Polen, wo die Materialeffizienzpotentiale sich noch größer im Vergleich zu technologischen Vorreiternationen (wie zum Beispiel Deutschland) gestalten. In der langen Frist (2035 bis 2050), könnten noch höhere Potentiale erwartet werden, da die zukünftige Schrottverfügbarkeit (und Qualität) ein wichtiger Einflussfaktor der europäischen Elektrostahlproduktion ist, und Materialstrategieverbesserungen dort, da Stahl vergleichsweise lang in der Nutzungsphase gebunden ist, erst später ihre Wirkung entfalten könnten.

Fazit

Der hier vorgestellte hybride Modellierungsansatz ermöglicht nicht nur eine Verbesserung der gesamten Modellqualität sowie eine transparente Darstellung bzw. Erläuterung der Annahmen zur Entwicklung der ökonomischen Treibergrößen und die geplante plausible und Szenario-konsistente Ergebniserzeugung. Sie zeigt auch, dass wichtige alternative Faktoren und Maßnahmen, wie zum Beispiel strukturelle Änderungen und Materialstrategieverbesserungen bei der Analyse der zukünftigen Energienachfrage nicht vernachlässigt werden dürfen. Zu oft liegt der Fokus von Studien und Maßnahmen auf klassischen Energieeffizienz- und Substitutionsoptionen wodurch die zusätzlichen Potentiale verminderter Stahlnachfrage durch mehr Materialeffizienz und den einhergehenden Verschiebungen der Primär- und Sekundärproduktionsanteile (z.B. durch mehr Recycling) alternativer Strategien leicht übersehen werden könnten. Mit rund 0,5% pro Jahr zusätzlicher Verminderung des Gesamtenergiebedarfs der Stahlindustrie infolge von zusätzlicher Materialeffizienz und -substitution erhält diese Option die gleiche Dimension wie Energieeffizienz selbst. Des Weiteren bieten zusätzliche Anstrengungen im Bereich von Materialstrategien auch zusätzliche wirtschaftliche Anreize wie ein höheres Bruttoinlandsprodukt und zusätzliche Beschäftigte durch zusätzliche Investitionen.

1. Motivation und Problemstellung

1.1 Übersicht Energiemodellierungsansätze

Der Abschnitt 1.1 wurde bereits in einer früheren und weitaus detaillierteren Version im *Swiss Journal of Economics and Statistics (SJES)* 2011 eingereicht und 2012 als Hauptautor veröffentlicht (Herbst et al. 2012b)¹. Teile davon wurden auch in einem Konferenzbeitrag für die *ECEEE 2012 Industrial Summer Study on Energy Efficiency* (Herbst et al. 2012a)² wiederholt bzw. rekapituliert. Die Einteilung der verschiedenen Modelltypen erfolgte sowohl in der Veröffentlichung im *SJES*³ als auch in diesem Abschnitt in Anlehnung an Catenazzi (2009, S. 4–13).

Energiemodelle werden heutzutage vielseitig genutzt, und zur Beantwortung von energie- und klimapolitischen Fragestellungen auf regionaler, nationaler und globaler Ebene herangezogen. Das gewählte Modell-Instrument hängt jedoch oft von Fragestellung, Auftraggeber, Spezialisierung des Forschungsteams und Zielgruppe ab. In diesem Zusammenhang werden oft verschiedenste mittel- und langfristige Energieszenarien (2035-2050) entwickelt, analysiert und diskutiert, und dienen dann als Grundlage für den politisch/unternehmerischen Entscheidungsprozess.

Wie bereits in Herbst et al. (2012b, S. 112–113) und Herbst et al. (2012a, S. 410) diskutiert, stellt die Wahl des geeignetsten Energiemodells oder -modellierungsansatzes für jeden Modellierer eine mehr oder minder herausfordernde Aufgabe dar. So ist die Auswahl an Modelltypen (top-down mit meist gesamtwirtschaftlichem Ansatz, bottom-up mit dem Ansatz technologischer Tiefe, ohne die gesamtwirtschaftlichen Zusammenhänge zu beachten; vgl. Böhringer und Rutherford (2008) bzw. Böhringer und Rutherford (2006)) und Projektionszielen (explorativ, normativ (z.B. energiewirtschaftliche Ziele) oder kostenorientiert) ebenso vielfältig, wie deren inhaltliche Schwerpunktsetzung (angebotsseitig, nachfrageseitig, aber auch spezifische Schwerpunktthemen wie zum Beispiel Speichertechnologien, Netzentwicklung, Eigenerzeugung, etc.). Fragestellung, Datenlage, Zweck und Einsatzgebiet eines Energiemodells bestimmen ebenso den Grad der Komplexität und Ausprägung des gewählten Ansatzes wie Hintergrund und Schwerpunktsetzung der Entwickler und Anwender (ökonomisch, technologisch; akademisch, öffentlich, privatwirtschaftlich). Trotz der Vielzahl an in den letzten zehn bis zwanzig Jahren entstandenen Modellen (IEA 2013a; EIA 2013b) und Studien (IEA

¹ Herbst, Andrea; Toro, Felipe; Reitze, Felix; Jochem, Eberhard (2012): Introduction to Energy Systems Modeling. In: *Swiss Journal of Economics and Statistics* 148 (2), S. 111–135.

² Herbst, Andrea; Reitze, Felix; Toro, Felipe Andrés; Jochem, Eberhard (2012): Bridging macroeconomic and bottom up energy models – the case of efficiency in industry. *Proceedings of the ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency*. Hg. v. ECEEE Industrial Summer Study. Arnhem, Netherlands.

³ Anlehnung der gesamten Struktur an der Veröffentlichung an Catenazzi 2009, S. 4–13.

2013b; Greenpeace 2012; European Commission 2011a, 2011b) und der ausgeprägten wissenschaftlichen Diskussion zu Modellauswahl, -kriterien, -qualität und -verbesserungen (z.B. Jaccard et al. 2003; Bataille et al. 2006; Krause 1996; Löschel 2002; Worrell et al. 2004; Zhang und Folmer 1998), bleiben diese jedoch, wie Worrell et al. (2004, S. 346) treffend feststellen, immer nur eine „*Abstraktion der realen Welt*“⁴, welche auf Annahmen und Vereinfachungen basieren. Oft sind diese Simplifizierungen notwendig, um mit methodischen Einschränkungen und begrenzter Verfügbarkeit von Daten und Information, aber auch mit (Rechen-)Zeit-, Personal-, Kapazitäts- und Budgetbeschränkungen umzugehen (Worrell et al. (2004, S. 353–354) nennen hierzu als Beispiel die Industriemodellierung). (Herbst et al. 2012b, S. 112–113)

Es ist es jedoch von essentieller Bedeutung, dass diese den Modellen zugrunde liegende Unsicherheiten für Anwender und Zielgruppen deutlich gemacht und in der wissenschaftlichen Gemeinde diskutiert werden, um Transparenz und Glaubwürdigkeit der Modelle bzw. Studien zu erhalten. Andererseits ist es eine „Kunst“, die Komplexität von Wirklichkeit in einem Modell mit den wesentlichen Strukturen und Zusammenhängen abzubilden und zu abstrahieren, so dass die Abstraktion es mittels eines Modells ermöglicht, wesentliche Aussagen einer zukünftigen Entwicklung der Energiewirtschaft eines Landes zutreffend zu beschreiben. (siehe auch in Worrell et al. (2004, S. 360) und Herbst et al. (2012b, S. 112–113))

Im nachfolgenden wird nur eine grobe Unterscheidung der Energiemodellierung in top-down und bottom-up Modelle getroffen; für eine detaillierte Analyse siehe Herbst et al. (2012b) bzw. Herbst et al. (2012a) und Catenazzi (2009). In Abschnitt 1.1.3 werden deren Schwächen (Nachteile), aber auch Stärken (Vorteile) diskutiert und Abschnitt 1.1.4 erörtert dann die Kombination der beiden Modellierungsansätze, um beiden Aspekten – der angemessenen gesamtwirtschaftlichen Entwicklung sowie der hinreichend differenzierten energietechnologischen Entwicklungsmöglichkeiten - in einer widerspruchsfreien und transparenten Modellierung gerecht werden zu können.

1.1.1 Top-down Modelle

Makroökonomische Modelle (auch top-down Modelle genannt; Böhringer und Rutherford (2008, S. 574–575)) beschreiben gesamtwirtschaftliche Zusammenhänge. Sie können somit auch aggregierte Effekte von Politikmaßnahmen (z.B. Energie- und Klimapolitik, Fiskalpolitik) auf Sektorebene (Energie, Wirtschaft, Gesellschaft, etc.) beschreiben, dies unter anderem in monetären Einheiten auf regionaler, nationaler, multinationaler oder weltweiter Ebene. Getrieben werden top-down Modelle in erster Linie von Produktivitätsfortschritten, Außenhandel, Wirtschaftswachstum, Preis- und Bevölkerungsentwicklungen; aber auch intersek-

⁴ „abstraction of the real world“ übersetzt nach Worrell et al. 2004, S. 346

toraler und intra-sektoraler Strukturwandel sowie Rückkopplungen von Politikmaßnahmen auf Wohlfahrt, Beschäftigung und Wirtschaftswachstum können von diesen Modellen berücksichtigt werden. (Bataille, Christopher G. F. 2005, S. 3–9; Herbst et al. 2012b, S. 112–118)

In der Praxis werden makroökonomische Energiemodelle oft genutzt, um allgemeine energie- oder klimapolitische Instrumente wie Energie- und CO₂-Steuern oder Zuschläge, Emissionshandelssysteme (ETS), Einspeisevergütungen für erneuerbaren Energien, etc. zu bewerten (siehe auch Bataille, Christopher G. F. (2005) und Hourcade et al. (2010, S. 5)). Technologieentwicklungen berücksichtigten die herkömmlichen top-down Energiemodelle überwiegend im Zusammenhang preisbasierter Maßnahmen (Worrell et al. 2004, S. 359; z.B. Steuern, Gebühren oder Investitionszuschüsse) oder technischer Normen, Verbote und Ziele/Standards (Hourcade et al. 2006, S. 2, 2010, S. 5). In aktuellen Modellierungsansätzen werden jedoch auch Anstrengungen unternommen, um die Rahmenbedingungen der vorhandenen Modelle für Energiebedarfsprognosen um spezielle Aspekte des technologischen und wirtschaftlichen Fortschritts (Böhringer und Löschel 2006; Löschel 2002) zu erweitern. (Herbst et al. 2012b, S. 114)

Eine detailliertere Beschreibung dieses Modelltyps und seiner unterschiedlichen Modellausprägungen kann in Herbst et al. (2012b, S. 114–118) nachgelesen werden.

1.1.2 Bottom-up Modelle

Herkömmliche bottom-up oder auch technologie-spezifische Energiemodelle zur Simulation der zukünftigen Energienachfrage bzw. des zukünftigen Energieangebots zeichnen sich häufig durch einen hohen technologischen Detaillierungsgrad aus. Dieser ist notwendig, um unterschiedliche (Energie-/Prozess-) Technologien zu simulieren und zu bewerten, behindert aber die Nutzung von bottom-up Modellen in der sehr langen Frist (30 bis 50 Jahre), da detaillierte technologische Veränderungen in diesem Zeithorizont infolge weiterer erheblicher technischer Innovationen kaum glaubwürdig projizierbar sind. Zusätzlich dazu bilden bottom-up Modelle keine gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von Energie- und Klimapolitik ab, und daher auch nicht die damit zusammenhängenden Investitionen, ihre Beschäftigungs- und Nachfrageeffekte, auch zum Beispiel in Forschung und Entwicklung. (vgl. Hourcade et al. 2006, S. 2; Herbst et al. 2012b, S. 118–119)

Hierbei wird versucht, wie in Herbst et al. (2012b, S. 119) bemerkt, die aus technisch-ökonomischer Perspektive besten Technologien durch die Bewertung von Politiken, deren Effekte, Investitionen, Kosten und Nutzen zu identifizieren, in vielen Fällen auch weitere Aspekte wie z.B. externe Effekte von Energieeffizienz-Maßnahmen oder die Identifikation von Synergie-Effekten zwischen Sektoren und sektoralen Kosten und Überschüssen in die

Modellberechnungen mit einzuschließen (Worrell et al. 2004, S. 352 zitiert Dowd J, Newman J 1999⁵).

Ein wichtiger Aspekt der bottom-up Modellierung ist die Nutzung von physischen Treibergrößen, welche im Gegensatz zu den ökonomischen (Output-) Größen der makroökonomischen Modelle stehen. So können sich zum Beispiel die Eingabeparameter eines bottom-up Energienachfragemodells je nach Sektor sehr heterogen gestalten, zum Beispiel: Quadratmeter pro Angestelltem im Dienstleistungssektor, Quadratmeter Wohnfläche pro Person im Haushaltssektor, oder produzierte Tonnen energieintensiver Grundstoffe im Industriesektor wie z.B. Oxygenstahl oder Sekundäraluminium⁶.

Eine detailliertere Beschreibung dieses Modelltyps und seiner unterschiedlichen Modellausprägungen kann in Herbst et al. (2012b, S. 118–124) nachgelesen werden.

1.1.3 Stärken, Schwächen und Grenzen der Modellierungsansätze

Da die zuvor beschriebenen Modellierungsansätze jedoch eine Vereinfachung der Realität darstellen, können sie diese niemals in deren gesamten Komplexität abbilden. Jeder Modellierungsansatz unterscheidet sich hierbei durch spezifische Charakteristika: z.B. durch die gewählte Art der Abbildung von technologischem Fortschritt, von Strukturwandel, oder von Rückkopplungen auf Wirtschaft und Wohlfahrt. Ob gewisse Eigenschaften der unterschiedlichen Modellierungsansätze als Schwäche oder Stärke interpretiert werden, hängt deshalb stark von der zugrundeliegenden Fragestellung, aber auch der gewählten Methodik und der Datenverfügbarkeit ab. Dennoch können relativ allgemeingültige Vor- und Nachteile der top-down und bottom-up Modellierung, welche auch bereits mehrfach in der Literatur diskutiert wurden, zusammengefasst werden. Hourcade et al. (2010)⁷, Bataille et al. (2006), Catenazzi (2009), Böhringer und Rutherford (2008), Worrell et al. (2004), Löschel (2002), Herbst et al. (2012a) und Herbst et al. (2012b) haben die folgenden Vor- und Nachteile der verschiedenen Modelltypen beschrieben oder aufgelistet⁸:

⁵ Originalquelle (Dowd J, Newman J. 1999. Challenges and opportunities for advancing engineering-economic policy analysis. Proc. IEA Int. Workshop Technol. Reduce Greenh. Gas Emissions: Eng.-Econ. Analysis of Conserved Energy Carbon, May 5-7. Washington, DC. <http://www.iea.org/workshop/engecon>) konnte nicht gefunden werden.

⁶ Ein Beispiel für ein solches bottom-up Energienachfragemodell, welches ebendiese physischen Treibergrößen nutzt, ist das bottom-up Modell FORECAST (Fraunhofer ISI 2015).

⁷ Reprint from The Energy Journal special issue Hybrid Modeling of Energy Environment Policies: 1-12; beide Artikel standen dem Autor zur Verfügung wobei die Zitation des überarbeiteten Artikels aus dem Jahr 2010 vom Autor vorgezogen wurde.

⁸ Überschneidungen der aufgelisteten Vor- und Nachteile zwischen den Autoren möglich.

Top-down Modelle

- + Verfügen über eine Rückkopplung zur Evaluierung von Effekten auf die Wohlfahrt, Beschäftigung und Wirtschaftswachstum (Vorteil: höhere Konsistenz der Ergebnisse, gesamtheitlicheres Verständnis der Ergebnisse) (Hourcade et al. 2010, S. 4; Catenazzi 2009, S. 4; Bataille et al. 2006, S. 93; Herbst et al. 2012b, S. 124–125).
- + Sind besonders gut geeignet, um monetäre/fiskalpolitische Instrumente, wie zum Beispiel Steuern, Subventionen, und Preisobergrenzen abzubilden (Hourcade et al. 2010, S. 5; Herbst et al. 2012b, S. 411).
- Liefern verallgemeinerte Ergebnisse, zum Beispiel auf einer stark aggregierten Sektorebene, mit einem Mangel an technologischem Detail (Bataille et al. 2006, S. 93; Löschel 2002).
- Verfügen nur über exogene oder stark vereinfachte Abbildung von technologischem Fortschritt (Löschel 2002); zum Beispiel: Substitutionselastizitäten, autonomer technologischer Fortschritt (Bataille et al. 2006, S. 95), usw. (Hourcade et al. 2010, S. 5; Catenazzi 2009, S. 4; Bataille et al. 2006, S. 93).
- Es existiert nur eine unzureichende bzw. keine Abbildung von nicht-monetären Hemmnissen der Energieeffizienz und Technologie- bzw. branchenspezifischen Maßnahmen – je nach Modelltyp (Hourcade et al. 2010, S. 5; Catenazzi 2009, S. 4; Herbst et al. 2012b, S. 125).
- Tendieren zur Unterschätzung von Übergangs-/Transaktionskosten (z.B. Annahme von vollkommenen Märkten, vollkommener Information, usw.) (Hourcade et al. 2010, S. 5; Herbst et al. 2012b, S. 125).
- Tendieren zur Trend-Extrapolation (z.B. ökonometrische Modelle) (Herbst et al. 2012a, S. 411).
- Liefern nur eine mangelhafte Abbildung von intra-sektorialem Strukturwandel, besonders in der langen Frist (Herbst et al. 2012b, S. 125). Dazu gehören unter anderem wie in Abschnitt 1.2 beschrieben Trends zu höherer Wertschöpfung (produktbegleitende Dienstleistungen, Produktion höherwertigerer Produkte, usw.), Verschiebung von Primär- auf Sekundärproduktion bei Grundstoffen sowie Materialeffizienz und -substitution von Produkten.

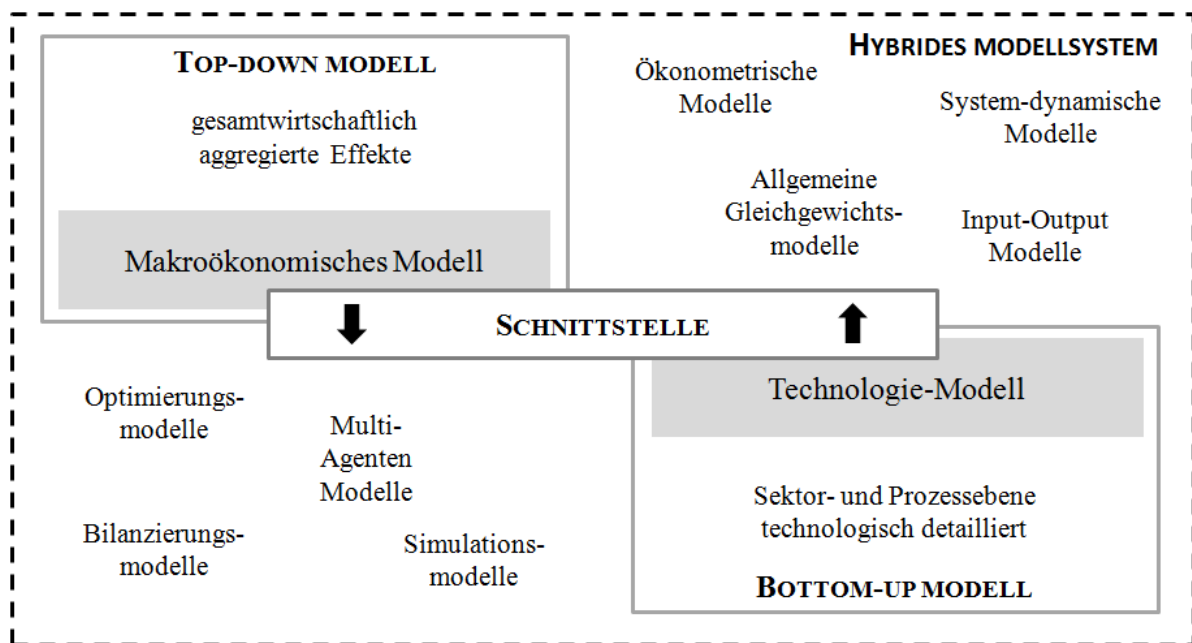
Bottom-up Modelle

- + Verfügen über einen hohen technologischen Detaillierungsgrad und in diesem Zusammenhang auch über eine detaillierte Darstellung der zukünftigen Energienachfrage und Technologien bzw. der relativ genauen Auswirkungen von Politikmaßnahmen auf diese (Hourcade et al. 2010, S. 4, 2010; Herbst et al. 2012b, S. 125).
- + Durch diesen hohen technologischen Detaillierungsgrad werden explizite Technologieentwicklungen aufgezeigt (vgl. Hourcade et al. 2010, S. 4, welcher deren Nutzen zur Illustration radikal unterschiedlicher "*Technologie Zukünfte*" hervorhebt).
- + Ermöglichen eine detaillierte Evaluierung von sektor- oder technologiespezifischen Richtlinien und Maßnahmen sowie von nicht-Preis-basierten Maßnahmen (vgl. Catenazzi 2009, S. 8)
- Keine Berücksichtigung von makroökonomischen Rückkopplungen und somit auch keine Abbildung der Auswirkungen von Energie- und Klimapolitiken auf die Wirtschaftsstruktur auf Sektor- und Branchenebene (Hourcade et al. 2010, S. 4; Schade et al. 2009, 9 u. 20; Herbst et al. 2012b, S. 125).
- Hängen in hohem Maße von Datenverfügbarkeit und –qualität ab (Worrell et al. 2004, S. 360; Herbst et al. 2012b, S. 125), denn der hohe und oft sehr spezielle Datenbedarf der bottom-up Modelle kann nicht immer von offiziellen Statistiken gedeckt werden.
- Häufig wird die explizite Behandlung von Programmkosten nicht durchgeführt (Worrell et al. 2004, S. 359), wenngleich sie über bottom-up Szenarioannahmen (z.B. mehr Beratung, Investitionszuschüsse, Wirtschaftskammeraktivitäten) berücksichtigt werden können. Dieser Mangel dürfte auch auf die meist ingenieur- und naturwissenschaftliche Herkunft der bottom-up-Modellierer zurückzuführen sein.

In speziellen Einzelfällen können je nach Methode, Modell und Fragestellung noch weitere Mängel der einzelnen Modellansätze beobachtet werden, diese müssen dann jedoch fallspezifisch von dem Modellierer gegenüber dem Nutzen des Modells abgewogen werden.

1.1.4 Hybride Energiesystemmodellierung

Um die zuvor genannten Schwächen und Grenzen der „konventionellen“ top-down-und bottom-up-Energiemodelle, wie Hourcade et al. (2006) sie nennen, zu überwinden und deren Stärken zu nutzen, geht der Trend der in der Energiemodellierung in Richtung Hybrid-Energiesystemmodellierung (Herbst et al. 2012b, S. 126). Unter Hybrid-Energiesystemmodellierung wird in den nachfolgenden Kapiteln - wie in Catenazzi (2009, S. 11–12), Herbst et al. (2012b, S. 126) und Herbst et al. (2012a, S. 411) ebenfalls diskutiert - die Kombination von mindestens einem makroökonomischen Modell mit einem Set an bottom-up Modellen, zum Beispiel für die Energienachfragesektoren, verstanden, während ein hybrides Modell nur die Erweiterung eines bestehenden top-down oder bottom-up Modell um Aspekte des modelltechnischen Gegenparts umfasst.



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Schade et al. 2009, S. 22

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines möglichen hybriden Systems⁹

Die Themenstellung der hybriden Modellierung ist konzeptionell nicht neu und wird bereits seit längerem verfolgt. Eine Vielzahl an Ansätzen, Modellen, und Diskussionen ist dabei in den letzten 10 bis 15 Jahren gestartet worden (Böhringer 1998; Böhringer und Löschel 2006; Böhringer und Rutherford 2008; Hourcade et al. 2006; Jaccard et al. 2003). Allerdings sind bisher wenig empirisch gesicherte quantitative Umsetzungen dieses Konzeptes realisiert worden. Somit gibt es weiterhin den Bedarf nach realitätsbezogener Umsetzung und entspre-

⁹ Genutzt in der Konferenzpräsentation von Herbst et al. 2016 und Herbst et al. 2013; vom Autor zur Verfügung gestellt für die Präsentation von Toro et al. 2015.

chenden Forschungsarbeiten in diesem Feld der Kopplung von makroökonomischen Modellen an die Nachfrageseite des mittels bottom-up Modellen simulierten Energiesystems.

Laut Hourcade et al. (2006, S. 3–4) sollte ein nützliches Energiewirtschafts Modell zumindest zu einem gewissen Grad die folgenden drei Eigenschaften erfüllen: „*technologische Deutlichkeit*“, „*mikroökonomischen Realismus*“ und „*makroökonomische Vollständigkeit*“ (zitiert in Herbst et al. (2012b, S. 126)). Wenn nun ein top-down oder bottom-up Modell in mindestens einem dieser Charakteristika signifikant verbessert wurde so spricht man auch dort von einem „*hybridem*“ Modell (Hourcade et al. 2006, S. 5). Diese drei Charakteristika zu Klassifizierung von Energie-Wirtschafts-Modellen wurden bereits in Jaccard et al. (2003, S. 56–58) unter ähnlicher Bezeichnung („*technologische Deutlichkeit, Präferenz Inkorporation, Gleichgewichts Feedback*“) vorgestellt. Für eine detailliertere Beschreibung der Charakteristika und eine Anwendung zur Modelkategorisierung siehe auch Bataille, Christopher G. F. (2005, S. 13–17).

Catenazzi (2009, S. 12–13) unterscheidet zwischen zwei möglichen Formen der Modellverknüpfung zu einem hybriden Energiesystem Modell: die manuelle Übertragung von Daten, Parametern und Koeffizienten zwischen den unterschiedlichen Modellen, hier auch "*soft link*" genannt, und die Übertragung durch automatische Routinen, hier auch „*hard link*“ genannt (Catenazzi 2009, S. 13; ähnlich definiert in Herbst et al. 2012b, S. 126).

Böhringer und Rutherford (2008, S. 575) hingegen heben drei verschiedene Möglichkeiten hervor, die Stärken von bottom-up und top-down Modellen zu kombinieren:

- (1) die Kopplung von unabhängigen top-down und bottom-up Modellen,
- (2) die Nutzung eines top-down oder bottom-up Modells in Kombination mit einer vereinfachten Version des alternativen Modelltyps, und
- (3) vollständig integrierte Modelle unter der Annahme von Komplementarität.

Böhringer und Rutherford (2006, 2008) benutzen den Begriff „*soft link*“ im Zusammenhang mit Möglichkeit 1): der Kombination bereits existierender (Böhringer und Rutherford 2006, S. 1), unabhängig voneinander entwickelten top-down und bottom-up Modellen (Böhringer und Rutherford 2008, S. 575). Dies vermittelt den Eindruck, dass es hier nicht in erster Linie um den manuellen Transfer geht, da theoretisch aus Sicht des Autors auch zwei voneinander unabhängige Modelle mittels automatischer Routinen aneinander gekoppelt werden könnten. Hier scheinen die zwei voneinander unabhängigen Modellierungssysteme den Begriff „*soft link*“ zu prägen. Entsprechend wird der Begriff „*hard link*“ in Zusammenhang mit einem einzigen integrierten Modellierungssystem genutzt (Böhringer und Rutherford 2006, S. 1). In den nachfolgenden Kapiteln werden jedoch die Termini wie in Catenazzi (2009, S. 13) verwendet.

Eine detaillierte Diskussion ausgewählter Energiesystemmodelle (hybrid und nicht-hybrid) wird in Abschnitt 3.1 verlegt.

Am Ende dieses Abschnitts sollen jedoch noch einmal zwei Herausforderungen hervorgehoben werden, mit denen sich in erster Linie Energie(-nachfrage)modellierer beschäftigen. Einerseits heben Hourcade et al. (2006, S. 5) die Notwendigkeit hervor, Modellsysteme zu generieren, welche das richtige Maß an Komplexität, Konsistenz, und angemessenen Datenaufwand vereinen, und dabei immer noch geeignet sind, relevante Fragestellungen empirisch valide zu beantworten. Andererseits fordern sie den transparenten Umgang mit der Problematik der Treibergrößen, das heißt die Übertragung und Übersetzung der Outputs eines Modells (z.B. top-down) in die Inputs des anderen Modells (z.B. bottom-up Energienachfragemodell). Wie bereits zuvor beschrieben, treffen in diesem Fall zwei methodisch sehr unterschiedliche Konzepte aufeinander. Während top-down Modelle eine ökonomische Welt in monetären Einheiten betrachten, simulieren bottom-up Modelle eine technologisch-physikalische Welt, welche auch auf dementsprechende Inputgrößen (z.B. Quadratmeter, Tonnen; siehe Abschnitt 1.1.2) angewiesen ist.

Dieser Brückenschlag von ökonomischer Information zu physikalischen Treibergrößen ist eine nicht-triviale Aufgabe und stellt aktuell in der Modellierung noch immer eine große Herausforderung dar (Schade et al. 2009; Groenenberg et al. 2005; Herbst et al. 2012a), unter anderem liegt sie darin, das richtige Maß zwischen Komplexität und Nutzen der Transformation zu finden. Die nachfolgende Arbeit legt ihren Schwerpunkt genau auf diese Übersetzung der ökonomisch demographischen Information von makroökonomischen Modellen in physikalische Treibergrößen für den Fall eines industriellen Energienachfragemodells (siehe Kapitel 2). Ein wichtiger Aspekt dieser Übersetzung ist, die Berücksichtigung von Strukturwandel und zukünftigen Materialstrategien, welche in den nachfolgenden Abschnitten kurz definiert bzw. diskutiert werden.

1.2 Definition Strukturwandel

Bei der Modellierung der Energienachfrage spielt nicht nur der gewählte Modellansatz, sondern auch die Berücksichtigung von Strukturwandel eine wichtige Rolle, wenn es um die Interpretation und/oder die Plausibilität projizierter Ergebnisse geht (Herbst et al. 2013). Veränderungen der Energieintensität, dem Verhältnis von Primärenergie zum Bruttoinlandsprodukt eines Landes oder des Endenergiebedarfs zur Bruttowertschöpfung eines Sektors, zum Beispiel eine nennenswerte Reduktion in der Vergangenheit oder bis zum Ende eines Projektionshorizonts, können verschiedene Ursachen haben: einerseits können durch diverse Politikmaßnahmen vorangetriebene Energieeffizienz- oder Einspartechnologien den Energieverbrauch bzw. die Energieintensität eines Landes signifikant verringern; andererseits kann auch Strukturwandel, das heißt zum Beispiel die Verschiebung wirtschaftlicher Aktivität von ei-

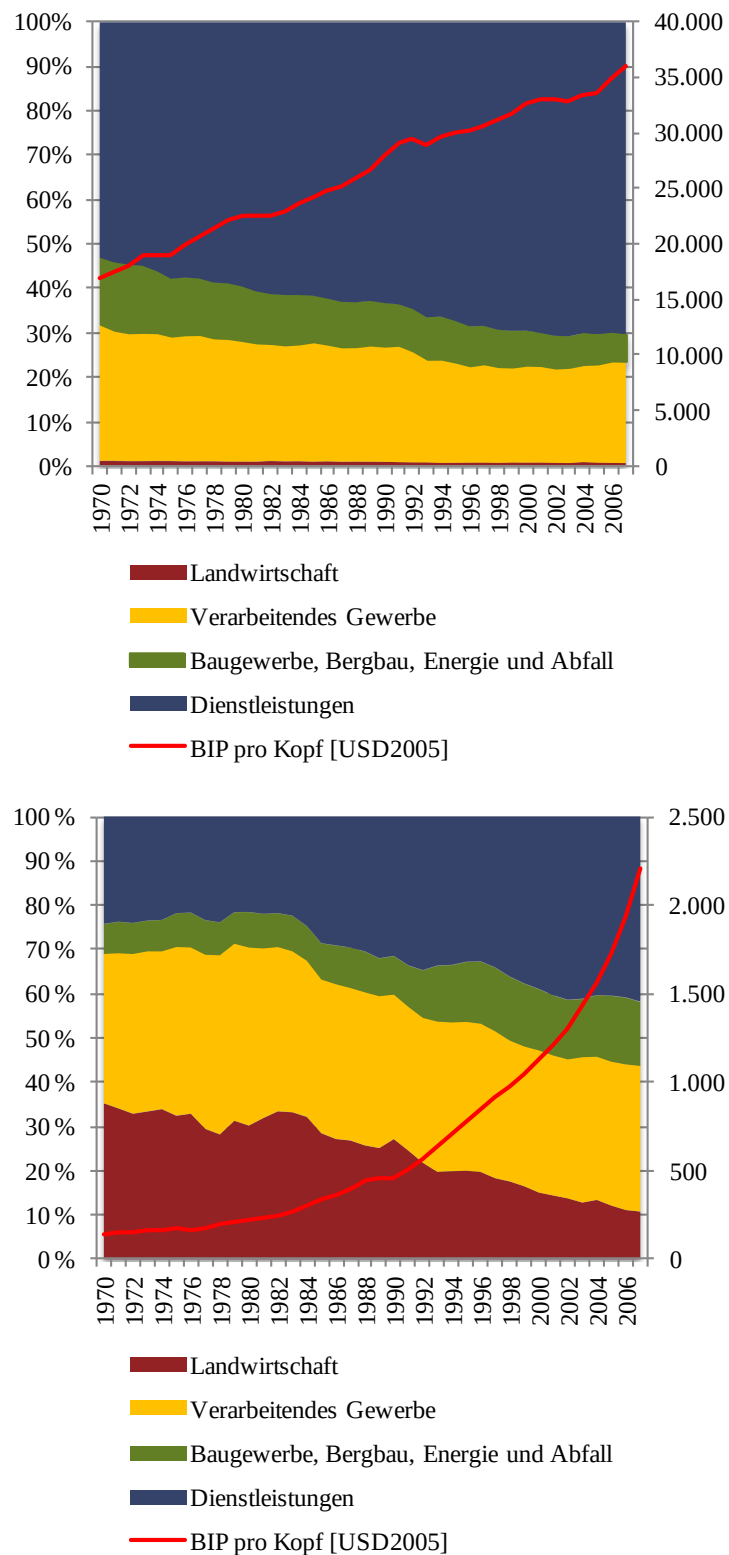
nem energieintensiven Sektor hin zu einem weniger energieintensiven Sektor (z.B. von einer Industrienation hin zur Dienstleistungsgesellschaft), zur Reduktion des Energiebedarfs beigetragen haben. Für eine umfangreiche Analyse siehe Schäfer (2005), welcher Strukturwandel im Endenergieverbrauch für 11 Weltregionen und einen Zeitraum von mehr als 25 Jahren betrachtet hat.

In der nachfolgenden Arbeit werden drei Arten von Strukturwandel unterschieden und diskutiert: sowohl intersektoraler und intra-sektoraler Strukturwandel, welche die Verschiebungen zwischen Sektoren und Subsektoren der Wirtschaft beschreiben, als auch intra-industrieller Strukturwandel, welcher in dieser Arbeit Änderungen innerhalb einer Industriebranche, zum Beispiel den Prozesswechsel von Primär- zu Sekundärproduktion oder die Trends zu höheren Anteilen produktbegleitender Dienstleistungen, beschreibt. Für eine detaillierte Diskussion der Thematik siehe Herbst et al. (2013).

1.2.1 Intersektoraler und intra-sektoraler Strukturwandel

Unter intersektoralen Strukturwandel versteht man die Verschiebung wirtschaftlicher Aktivität zwischen dem primären, sekundären, und tertiären Sektor. Die grundlegende Annahme hinter dem Begriff intersektoralen Strukturwandel lautet, dass mit steigendem Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf sich die wirtschaftliche Aktivität eines Landes zuerst im Rahmen einer Industrialisierung von der Landwirtschaft hin zur Industrie verschiebt. Steigt das pro Kopf Einkommen in der Industrialisierungsphase weiter, kommt es ab einem bestimmten Punkt zu einer De-Industrialisierung hin zu einem wachsenden Dienstleistungssektor. In westlichen Industrienationen, wie zum Beispiel Deutschland, die bereits über ein relativ hohes BIP pro Kopf mit einem linearen Wachstumspfad verfügen (siehe Abbildung 2: EUKLEMS database (2013), The World Bank Group (2014d)), erwirtschaftet der Dienstleistungssektor bereits über 70% des Bruttoinlandsprodukts. In Schwellenländern, wie China, deren BIP pro Kopf Wachstum derzeit noch exponentiell verläuft, liegt der Anteil des Dienstleistungssektors noch weit unter diesem Potential, dort können jedoch signifikante Rückgänge in der Wirtschaftsleistung des primären Sektors beobachtet werden, der ab 2006 unter 10% absank (Abbildung 2: The World Bank Group (2014d)).

Strukturelle Änderungen können auch innerhalb der erwähnten Sektoren stattfinden und prägen dann den Begriff intra-sektoralen Strukturwandel, welcher die Verschiebungen der wirtschaftlichen Aktivität zwischen den Branchen eines Sektors (z.B. von energieintensiven Basisindustrien hin zur Produktion von Konsum- und Investitionsgütern) oder die Entstehung neuer Wirtschaftszweige bezeichnet (z.B. Abfall- und Recyclingwirtschaft). Strukturwandel ist ein bereits ökonomisch viel beachtetes und diskutiertes Thema, dessen Ursprünge gehen unter anderem auf Arbeiten von Fisher (1966) und Clark (1957) bzw. Fourastié (1969/1954) zurückgehen.



Quelle: eigene Darstellung von EUKLEMS database (2013), The World Bank Group (2014d)

Abbildung 2: Entwicklung der Wirtschaftsstruktur, Deutschland (oben) und China (unten), 1970 – 2007

1.2.2 Intra-industrieller Strukturwandel

Die Definition welche in dieser Arbeit unter dem Überbegriff intra-industrieller Strukturwandel geführt wird entspricht, in Anlehnung an Schade et al. (2009, S. 92), allen strukturellen Änderungen, welche die physische Produktion eines bestimmten Gutes innerhalb eines industriellen Subsektors betreffen. Diese intra-industriellen strukturellen Veränderungen können eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen haben. Ein bereits mehrfach diskutierter Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Dematerialisierung einer Industriebranche. So werden Anstiege der Bruttowertschöpfung einer Branche nicht notwendigerweise durch eine entsprechende Produktionssteigerung verursacht (Entkopplung ökonomischer und physischer Größen). Gerade in westlichen Industrienationen - verursacht durch Konkurrenzdruck aus Niedrig-Lohn- bzw. Schwellenländern - kann es beispielsweise zu Änderungen der Produktpalette durch Nachfrageveränderungen hin zu **höherwertigen Produkten** (z.B. durch Qualitätsverbesserungen) bzw. zu **Trends zu höherer Wertschöpfung** (z.B. durch produktbegleitende Dienstleistungen, z.B. Transportbeton statt reine Zement- und Sandproduktion) kommen, und somit zu einem Anstieg der Wertschöpfung ohne einen entsprechenden Anstieg der physischen Produktion. Ein weiterer Aspekt des hier definierten intra-industriellen Strukturwandels sind **Prozesswechsel** von der energieintensiveren Primärproduktion hin zur Sekundärproduktion von Grundstoffen (z.B. von Oxygenstahl- zu Elektrostahlproduktion in der Eisen- und Stahlindustrie). Gründe für derartig strukturelle Veränderungen können vielfältig sein, angefangen bei verschärften Umweltstandards (Recycling), höheren Energie- und Rohstoffpreisen, bis zu technologischen Neuerungen und Änderungen der Materialstrategien der Abnehmerbranchen. Veränderungen in den zukünftigen Materialstrategien eines Landes umfassen sowohl Veränderungen des Aufkommens von Recycling-fähigen Abfallstoffen und des **Recyclingverhaltens** als auch Änderungen in Bezug auf die **Materialeffizienz und – substituierbarkeit** eines Produktmaterials. Diese können zu einer verminderten Produktion energieintensiver Grundstoffen führen. (Herbst et al. 2012a, S. 412–413; Herbst et al. 2013; siehe auch Jochem et al. 2007, S. 102; Jochem et al. 2009, S. 85; Schade et al. 2009, S. 92–93)

1.3 Bedeutung makroökonomischer Treiber und deren Plausibilität

Grundsätzlich gilt es in der Modellierung der Energienachfrage zwei Fälle zu unterscheiden, Projektionen welche auf beschränkten (makroökonomischen) Rahmenannahmen basieren (was in der Praxis häufig der Fall ist), und Projektionen welche innerhalb eines hybriden Modellsystems bzw. in Kooperation mit einem makroökonomischen Modell durchgeführt werden (Herbst et al. 2013). Dieser Abschnitt wurde bereits in einer früheren Version vom Autor als Hauptautor als Konferenzbeitrag (Herbst et al. 2013) für die *IAEE International Con-*

ference in Daegu, Südkorea im Jahr 2013 eingereicht und präsentiert¹⁰; er sei hier kurz erläutert im Hinblick auf die Ausprägung dieser Fallunterscheidung, da diese im methodischen Teil dieser Arbeit weiterverfolgt wird.

1.3.1 Fall 1: Beschränkte Verfügbarkeit makroökonomischer Information

Oft beschränken sich die verfügbaren Informationen, welche als Basis für Energiebedarfsprojektionen eines Landes genutzt werden, auf die Rahmendaten Wirtschaftswachstum (hier insbesondere die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes über den Projektionshorizont), Bevölkerungsentwicklung und eventuell den Preisen für fossile Brennstoffe. Eine weitere Aufschlüsselung dieser aggregierten Information in Wirtschaftssektoren (Landwirtschaft, Fertigungsindustrie, Dienstleistungssektor, Bauwirtschaft und Energiewirtschaft) ist oft nicht verfügbar, ebenso wenig wie Annahmen zur Alterskohortenentwicklung und Migration. Ohne die detaillierten Informationen von makroökonomischen Modellen müssen die bottom-up Wissenschaftler, welche häufig über eine technische Ausbildung verfügen, zu relativ simplen Methoden (z.B. Trend Extrapolation, Schätzungen) oder starren Annahmen (z.B. Input-Output Modelle mit konstanter Struktur des Basisjahres) greifen, um den für die bottom-up Modelle notwendigen Detaillierungsgrad dieser Rahmendaten zu erreichen. (Herbst et al. 2013)

Diese einfachen Methoden bieten oft keine adäquate und vor allem keine transparente Abbildung von inter- und intra-sektoralen strukturellen Veränderungen (vgl. Abschnitt 1.2) aber auch anderen wichtigen Einflussfaktoren wie zum Beispiel die Entwicklung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit, Außenhandel, oder auch Unterschiede in der Ressourcenausstattung der unterschiedlichen Länder. Dies kann dazu führen, dass die getroffenen Annahmen der Autoren von bottom-up Modellen unzureichend transparent für die Zielgruppe/Auftraggeber der Studien sind und ein Verständnis der Ergebnisse und deren Qualität maßgeblich erschwert werden. Des Weiteren können Annahmen über starre Zusammenhänge in der Tendenz zu einer Überschätzung der zukünftigen Energienachfrage führen. Hier können auch zu optimistische Wachstumsannahmen, welche in der Praxis wegen der Annahmen konstanter Wachstumsraten häufig der Fall sind, diese Problematik weiter verschärfen. (Herbst et al. 2013)

In Zukunft sinkende Produktionen von Papier oder Ethylen in Europa sind nicht aus dem Trend der Vergangenheit ableitbar, sondern durch Analyse der zukünftigen Nachfrage (z.B.

¹⁰ Herbst, Andrea; Fleiter, Tobias & Jochem, Eberhard 2013. Mutually linking bottom-up energy demand models with macroeconomic models: Dealing with inter- and intra-sectoral structural change. Conference Contribution and Presentation. Daegu, South Korea.

nach Zeitungsdruckpapier) oder des Aufbaus neuer Produktionskapazitäten in anderen Regionen der Welt (z.B. Ethylen), was in beiden Fällen zu Überkapazitäten in Europa führen kann.

Ein einfacher Lösungsansatz für die Problematik der strukturellen Verteilung der Wirtschaftssektoren für den Fall des gesamten Verarbeitenden Gewerbes (als Aggregat) wird in Kapitel 4 diskutiert. Der dort gewählte ökonometrische Ansatz trägt zu der geforderten Transparenz der Ergebnisse maßgeblich bei, dennoch beherbergt auch dieser Ansatz Schwächen, welche nicht außer Acht gelassen werden dürfen (vgl. Abschnitt 4.3.2).

1.3.2 Fall 2: Kopplung eines bestehenden makroökonomischen Modells mit einem bottom-up Energienachfragemodell für die Industrie

Im Falle einer Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem bottom-up Energienachfragemodell für die Industrie befinden sich die Modellierer in einer weitaus komfortableren Situation als im vorherigen Fall. Hier werden als Rahmendaten meist, zusätzlich zur Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und der Bevölkerung, auch Projektionen der Wirtschaftsstruktur als Bruttowertschöpfung der unterschiedlichen Sektoren und Subsektoren eines oder mehrerer Länder geliefert sowie die Aufteilung der Bevölkerung in Alterskohorten oder Erwerbstätige. Des Weiteren liefern makroökonomische Modelle oft noch eine Vielzahl weiterer Indikatoren (z.B. Importe, Exporte, Investitionen, usw.) (siehe auch Herbst et al. 2013)

Die Übertragung bzw. Verarbeitung dieser Informationen kann dann, wie bereits in Abschnitt 1.1.4 erwähnt, mit Hilfe eines „soft-“ oder „hard-links“ zwischen dem makroökonomischen Modell und dem bottom-up Energienachfrage Modell gewährleistet werden. Die dem makroökonomischen Modell zugrundeliegende Methodik - oft handelt es sich dabei um Gleichgewichts- oder ökonometrische Modelle - kann umfassende und transparente Annahmen zu inter- und intra-sektorialem Strukturwandel umsetzen und für jeden Betrachter ausweisen. Die Aufgabe der weiteren Übersetzung dieser ökonomischen Informationen zur Produktion der Grundstoff-Industriebranche in physische Treiber eines industriellen Energienachfragemodells unter Berücksichtigung von intra-industriellem Strukturwandel und von zukünftigen Veränderungen des Bedarfs und der Produktion von energieintensiven Grundstoffen kann jedoch von makroökonomischen Modellen nicht bewältigt werden (siehe auch Herbst et al. (2013), Übertragung beispielhaft gezeigt für die Stahlindustrie in Herbst et al. (2014b)).

Verschiedene Lösungsansätze zur Behandlung von intra-industriellem Strukturwandel, insbesondere der zukünftigen Entwicklungen von Materialeffizienz und -substitutionen, werden in Kapitel 5 näher beleuchtet.

2. Zielsetzung der Arbeit

In dieser Arbeit soll eine konzeptionelle Brücke zwischen dem makroökonomischen Modul des top-down Modells ASTRA (ASsessment of TRANsport Strategies), einem Systemdynamischen-Modell, und dem technologie-spezifischen bottom-up Energienachfrage Modell FORECAST Industry (FORecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool) geschlagen werden. Wie bereits im vorherigen Kapitel 1 detailliert erläutert, trägt ein derartiger Brückenschlag zur Verbesserung der gesamten Modellqualität durch die Überwindung spezifischer Schwächen und Nutzung spezifischer Stärken der beiden genannten Modelltypen bei (vgl. Abschnitt 1.1.3). Motivation für diesen Brückenschlag ist aus praktischer Sicht die oft unübersichtliche und intransparente Darstellung bzw. Erläuterung der Annahmen zur Entwicklung der ökonomischen Treibergrößen in den industriellen bottom-up Energienachfrage Modellen und diversen Studien. Diese Praxis erschwert sowohl die Anwendung bei Szenarien-Varianten als auch die Interpretation bzw. den Vergleich der Ergebnisse in Szenario-Analysen. Gleichzeitig beeinflussen diese Aktivitätsveränderungen die industrielle Energienachfrage zumindest mittelfristig deutlicher als ein häufig sehr detailliert simulierter Fortschritt der technischen Energieeffizienz und können maßgeblich für die Erreichung von klimapolitischen Zielen sein. Insbesondere die oft fehlende, mangelhafte oder sehr simple Übersetzung ökonomischer und demographischer Information in physische Treibergrößen (z.B. Tonnen) führt zu intransparenten und im schlechtesten Fall sogar zu unplausiblen Projektionsergebnissen des Energiebedarfs energieintensiver Grundstoffindustrien.

Die sich aus dieser Fragestellung ergebenden **Hypothesen** lauten wie folgt:

- Intra-industrieller Strukturwandel kann nicht von reinen makroökonomischen Modellen abgebildet werden.
- Es ist möglich, ein konzeptionelles und methodisches Gerüst zu entwickeln und beispielhaft zu implementieren, welches die Lücke zwischen den beiden Modelltypen schließt.
- Veränderungen in den zugrundeliegenden Rahmendaten und Szenario-Annahmen sowie deren Auswirkungen auf Projektionsergebnisse zum industriellen Energiebedarf werden, im Vergleich zu den bisherigen Expertenschätzungen, durch die entwickelte Methodik transparenter, verständlicher und konsistenter sowie bei Szenario-Varianten zeiteffizienter berechnet.

Somit ist es **Ziel** dieser Arbeit, einen **methodisch konzeptionellen Ansatz zur Kopplung der zwei Modelltypen** - makroökonomisches top-down Modell und technologieorientiertes bottom-up Modell - zu entwickeln, welcher sowohl das Kriterium der **Transparenz** als auch das Kriterium der **Konsistenz** erfüllt. In diesem Zusammenhang erfolgt die Übersetzung/Transformation der ökonomischen und demographischen Größen in physische Treiber

für ausgewählte energieintensive Massenprodukte unter der Berücksichtigung von zwei Aspekten:

- Berücksichtigung von **inter- und intra-sektorem Strukturwandel** durch explizite Modellierung (seitens des makroökonomischen Modells) oder für das jeweilige Szenario konsistente Modellannahmen.
- Berücksichtigung von **intra-industriellem Strukturwandel** energieintensiver Massenprodukte mit primärer und sekundärer Produktionsroute unter Berücksichtigung von Stoffströmen oder für das jeweilige Szenario konsistente Modellannahmen.

Für den ersten Aspekt wurde in dieser Arbeit eine Fallunterscheidung eingeführt, welche einerseits auf der bereits erwähnten Kopplung des Modells ASTRA und FORECAST Industry basiert und andererseits kurz den praxisnahen Fall der beschränkten Verfügbarkeit von makroökonomischer Information betrachtet (d.h. ohne Zurückgreifen auf die Ergebnisse eines gesamtwirtschaftlichen Modells, vgl. Erläuterung in Abschnitt 1.3.1).

Die Berücksichtigung von intra-industriellem Strukturwandel (z.B. Materialstrategieverbesserungen, Trends zu höherer Wertschöpfung, Prozesswechsel; Erläuterung in Abschnitt 1.2.2) erfolgt methodisch durch die Modellierung der Nachfrage- und Produktionsentwicklung und den dazugehörigen Stoffströmen bzw. durch die Möglichkeit diese Effekte durch entsprechende Szenario-Parameter zu berücksichtigen.

Zusätzliche Einflussgrößen, wie zum Beispiel der Außenhandel mit Halb- und Fertigerzeugnissen oder örtliche Skalenerträge durch Verbundproduktion, können jedoch im Umfang dieser Arbeit nicht quantitativ modelliert werden (Erläuterung in Abschnitt 5.1.1).

Die konzeptionelle Kopplung in dieser Arbeit erfolgt für ausgewählte energieintensive Basisprodukte der europäischen Stahlindustrie und wird exemplarisch für vier Schwerpunktländer durchgeführt: Frankreich, Deutschland, Italien, Polen. Durch die methodischen und konzeptionellen Arbeiten sollen verbesserte, transparentere, plausiblere und auch konsistentere Energienachfrageprojektionen ermöglicht werden sowie die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von Materialstrategieverbesserungen ermittelt werden.

Diese Dissertation ist ein erster Schritt zur Überwindung der zuvor genannten Schwächen der unterschiedlichen Modelltypen und ein weiterer Schritt in Richtung der Bildung eines hybriden Modellsystems zwischen den beiden Modellen ASTRA und FORECAST Industry unter Berücksichtigung einer transparenten Modellierung von Strukturwandel und Materialstrategieverbesserungen.

Die Arbeit setzt sich aus 8 Kapiteln zusammen, wobei das erste Kapitel Motivation, Problemstellung und grundlegende Begriffsklärungen, welche für das Verständnis der nachfolgenden notwendig sind, vereint. Kapitel 2 beschreibt die Zielsetzung der Arbeit. In Kapitel 3 wird die Modellumgebung dieser Arbeit vorgestellt und ein kurzer Vergleich mit existierenden Mo-

dellsystemen gezeigt. Kapitel 4 widmet sich dann dem erwähnten Fall der „beschränkten Verfügbarkeit von makroökonomischer Information“. Hier wurden Panel-Ökonometrische Regressionsanalysen durchgeführt, um trotz geringer makroökonomischer Information eine grobe Ableitung der Entwicklung des Verarbeitenden Gewerbes zu ermöglichen. Kapitel 5, welches das methodische Hauptkapitel darstellt, widmet sich dann der tatsächlichen Modellkopplung durch die Transformation der makroökonomischen Information aus dem top-down Modell ASTRA in die physischen Treibergrößen der europäischen Stahlindustrie für das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry. Das Kapitel beschreibt die methodische Vorgehensweise und Modellbildung zur physischen Produktion der Fallstudie für die europäische Stahlindustrie exemplarisch für die Schwerpunktländer Frankreich, Deutschland, Italien und Polen. Des Weiteren wird der für die Transformation gewählte methodische Ansatz vorgestellt, die Szenario- und Rahmendaten werden diskutiert und kritisch hinterfragt. In Kapitel 6 werden dann die Simulationsergebnisse der Nachfrage- und Schrottverfügbarkeitsprojektionen bis 2035, der physischen Produktionsprojektionen bis 2035, die Ergebnisse der Energienachfragesimulation mit FORECAST Industry bis 2035 und der Simulation der gesamtwirtschaftlichen Effekte mit ASTRA dargestellt und diskutiert. In Kapitel 7 werden sowohl der methodische Ansatz als auch die Modellergebnisse kritisch diskutiert. Den Abschluss bildet dann Kapitel 8 mit Schlussfolgerungen und Ausblick.

3. Modellumgebung: Einordnung und Abgrenzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, das makroökonomische Modell (ASTRA) mit einem Energienachfragemodell für die Industrie (FORECAST Industry) zu verknüpfen (vgl. Kapitel 2 bzw. Kapitel 5). Wie bereits in Abschnitt 1 beschrieben, benötigen die unterschiedlichen bottom-up Energienachfragemodelle dazu, je nach Sektor, exogen vorgegebene physikalische Treibergrößen (z.B. Quadratmeter pro Beschäftigte, physische Tonnen energieintensiver Produkte, Personen pro Haushalt, usw.) zur Projektion der Energienachfrage. In dieser Arbeit wird der Fokus auf die industrielle Energienachfrage und folglich auf industrielle energieintensive Basisprodukte gelegt. Diverse Forschungsgruppen betonen bereits seit längerem die Relevanz der angemessenen Treiberwahl und deren Projektionsmethodik (Kopplung an Wirtschafts- oder Bevölkerungsentwicklung, De-Materialisierung in der Industrie, usw.) für die Schaffung transparenterer und verbesserter Energiebedarfsprojektionen (Groenenberg et al. 2005; de Vries, H.J.M. de et al. 2006; Schade et al. 2009; Herbst et al. 2012b). Einige industrielle Energienachfragemodelle nutzen bereits physische Tonnen als Treiber der Energienachfrage, Methode und Komplexität variieren jedoch stark, je nach Forschungsteam und Forschungsansatz (für eine Auswahl mit anschließendem Vergleich siehe Abschnitt 3.1).

3.1 Vergleich verschiedener Modellsysteme

Vorbereitend für die in dieser Arbeit getroffene Modellauswahl, wird im nachfolgenden Abschnitt ein Überblick über ausgewählte Energienachfragemodelle für die Industrie gegeben und diese mit Bezug auf folgende Fragestellungen beleuchtet:

- a) Bilden diese Modelle bereits Teil eines hybriden Energiemodellsystems, und wenn ja in welcher Ausprägung? Wird ein integriertes makroökonomisches Modul mit einer externen Kopplung genutzt? Oder wird ein Szenario-Ansatz verwendet (Haupttreiber werden exogen festgelegt und können sich aus Studien, die eventuell auch auf Ergebnisse eines makroökonomischen Modells zurückgreifen, Annahmen und Expertenschätzungen zusammensetzen)?
- b) Gibt es eine makroökonomische Rückkopplung der Ergebnisse, um Effekte auf Wirtschaftswachstum, Strukturentwicklung und Beschäftigung, etc. abzubilden?
- c) Sind bei der Modellierung der industriellen Energienachfrage physische Treibergrößen, wie zum Beispiel produzierte Tonnen Stahl berücksichtigt worden?
- d) Wurde bei der Modellierung der industriellen Energienachfrage Strukturwandel in seinen verschiedenen Ausprägungen (intersektoral, intra-sektoral, intra-industriell: vgl. 1.2) berücksichtigt?

- e) Wurden bei der Modellierung der industriellen Energienachfrage Faktoren wie Material- und Recyclingstrategien sowie Außenhandel mit Bezug auf die physischen Tonnen der energieintensiven Industrien berücksichtigt?

Die nachfolgende Analyse basiert auf öffentlich zugänglicher Information (Internetseiten, Modellbeschreibungen, Projektberichten, Präsentationen, etc.) und gibt die Einschätzung des Autors auf Basis dieser Informationsgrundlage wieder. Diese Analyse erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass einzelne Kriterien in der Modellierung doch stärker berücksichtigt wurden, als aus dieser Analyse bzw. der vorhandenen Informationsgrundlage hervorgeht. Grund hierfür kann sein, dass die hier genannten Aspekte der Modellierung oft nicht die Kernaufgabe der dargestellten Modelle und Veröffentlichungen sind, bzw. entsprechende Informationen von den Verantwortlichen vertraulich behandelt werden.

Bei der Wahl der Quellen wurde versucht, aktuelle, öffentlich zugängliche, Information zu nutzen (vorrangig zu älteren/erstmaligen Modellbeschreibungen), da im Kontext dieser Analyse der aktuelle Stand der Modellierung (Ausgangslage inklusive Modellverbesserungen) relevant ist; denn oft befinden sich derartige Modelle unter ständiger Weiterentwicklung. Die gesamte Bandbreite an Energie(-nachfrage)Modellen abzudecken, war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Jedoch wurden neun gezielt ausgewählte Modelle näher betrachtet. Die Modelle wurden anhand ihrer Relevanz/Bekanntheit, regionaler Abdeckung, der verschiedenen Modellansätze und der verfügbaren Information ausgewählt. Hierbei wurde Wert darauf gelegt, dass eine heterogene Auswahl an Modellen getroffen wurde.

Die ersten sechs der in Tabelle 1 dargestellten Kriterien zum Modellvergleich sind eher beschreibender Natur und sollen einen groben Überblick über Methodik, Detaillierungsgrad und Umfang der betrachteten Modelle liefern. Kriterien sieben bis zwölf sind speziellere Kriterien, welche sich mit der Problematik der o.g. Fragestellungen c) bis e) auseinandersetzen.

Alle Modellansätze verfügen über einen mittel- bis langfristigen Projektionshorizont (d.h. über mindestens 10 Jahre) während die regionale Abdeckung der Modelle recht unterschiedlich ist (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 1: Kriterien des Modellvergleichs

Kriterium	Definition/Bedeutung
Modellansatz	Unterscheidung zwischen hybriden und nicht-hybriden Ansätzen bzw. der Form des Modells.
Makroökonomische Rahmen- daten	Grundlage der makroökonomischen Treiber (Modell-basiert oder Schätzungen bzw. Annahmen).
Zeithorizont	Projektionshorizont des Modells.
Regionale Abdeckung	Geographische Abdeckung des Modells (Region-/Länderebene).
Subsektorale Abdeckung	Betrachtete Subsektoren der (Fertigungs-)Industrie. Dies schließt nicht die Betrachtung weiterer Sektoren (z.B. des tertiären Sektors oder der Energieangebotsseite) innerhalb des Modells aus, diese werden aber für diese Analyse als vernachlässigbar erachtet.
Haupttreiber/ Exogene Variablen	Haupttreiber, welche als exogener Input in das Modell einfließen (z.B. Preise, Bruttowertschöpfung, etc.), dieser „exogene“ Input kann sowohl aus einem makroökonomischen Modell als auch anderen Quellen stammen. Hier werden nicht alle exogenen Inputs berücksichtigt, sondern im Wesentlichen die Haupttreiber der Energienachfrage.
Physische Treibergrößen	Berücksichtigung physischer Größen wie zum Beispiel Tonnen Stahl, Aluminium, Zement, etc. als Treiber des Energienachfragemodells.
Endogenisierter Strukturwandel	Endogene Modellierung von intersektoralen und inter-/intra-industriellem Strukturwandel.
Recycling	Explizite und endogene Modellierung von Recycling(-strategien) (z.B. Recyclingquoten, Schrottverfügbarkeit, etc.). Die reine Modellierung von Technologieverschiebungen, z.B. von Oxygenstahl hin zu Elektro Stahlproduktion ist hier nicht gemeint (dies fällt eher unter endogenisierten Strukturwandel).
Materialstrategien	Endogene Modellierung von Materialeffizienz, Materialsubstitution, verändertem Nutzerverhalten.
Außenhandel/ internationaler Wettbewerb	Endogene Modellierung/Berücksichtigung von Aspekten des Außenhandels (z.B.: Schrott-Nettoexporte) bzw. internationaler Wettbewerbsfähigkeit (z.B.: RCA) der physischen Treibergrößen.
Makroökonomische Rückkopplung	Iterative Berechnung durch Rückkopplung ausgewählter „bottom-up“ Ergebnisse in das zugrunde liegende makroökonomische Modell um gesamtwirtschaftliche Effekte und/oder Strukturwandel abzubilden.

Um Fragestellungen a) und b) zu beantworten, lässt sich tendenziell feststellen, dass aus Sicht des Autors alle betrachteten Modelle deren zugrundeliegende makroökonomische und demographische Szenario-Entwicklung aus öffentlichen Studien oder Projektionen (denen eventuell ein makroökonomisches Modell hinter liegt) beziehen. Die Verarbeitung dieser Basisannahmen erfolgt jedoch dann recht unterschiedlich (vgl. Tabelle 2):

- Die Modellsysteme NEMS und CIMS verfügen über ein komplett integriertes Hybridenergiesystem mit einem endogenen makroökonomischen Modul. Das „*Makroökonomische Aktivitäts Modul*“ in NEMS besteht aus drei Modellen, welche die ökonomische Aktivität Nordamerikas auf die in NEMS benötigten Regionen und Branchenebenen herunter bricht (EIA 2013a, S. 2). In der Regel startet CIMS mit einer exogenen Projektion der physischen Treiber (Bataille et al. 2006, S. 99; Murphy 2013, S. 22), verfügt jedoch auch über ein makroökonomisches Modul (Murphy 2013, S. 23), welches für iterative Berechnungen nach Einführung von Politikmaßnahmen genutzt werden kann (Bataille et al. 2006, S. 100–102; Murphy 2013, S. 28–30). Folglich sind sowohl NEMS als auch CIMS fähig, makroökonomische Effekte/Rückkopplungen von (Energie-)Politiken und deren Effekte auf die Wirtschaft endogen abzubilden (Bataille et al. 2006, S. 100–102; Murphy 2013, S. 28–30).
- Das partielle Gleichgewichts-Modell PRIMES bezieht seine makroökonomischen Rahmendaten unter anderem von einem externen makroökonomischen Modell GEM-E3, ist aber allein nicht zu einer endogenen Berechnung von Feedbacks auf Wirtschaft, Beschäftigung, etc. fähig (E3MLab/ICCS at National Technical University 2014, S. 15; Capros o.J., S. 7). Feedbackeffekte können jedoch mit Hilfe einer Verbindung zu dem makroökonomischen Modell einfach berechnet werden (Capros o.J., S. 22; European Commission 2011c, S. 5; E3MLab/ICCS at National Technical University 2014, S. 2; European Commission 2011c).

Tabelle 2: Zusammenfassung ausgewählter Modellansätze

Name	Modellansatz	Makro- ökonomische Rahmendaten	Zeithorizont	Regionale Abdeckung	Subsektorale Abdeckung	Haupttreiber (exogen)	Makroökono- mische Rückkopplung	Quellen
WEM	Simulations- Modell	Annahmen und externe Studien	2035	Global: 25 Re- gionen, 12 Län- der	5 Industriesek- toren	Wirtschaftswachstum, De- mographie, Technologische Entwicklungen	+	IEA (2013a, 2012)
POLES	Rekursives Simulations- Modell	Annahmen und Studien	2050	Global: 57 Län- der/Regionen ¹¹	4 Hauptindus- triesektoren	Bruttoinlandsprodukt, Be- völkerung, Kohlenstoffbe- schränkung, Ressourcen	+	Kitous et al. (2013); Kitous et al. (2010); IPTS (2010)
NEMS	Dynamisches Accounting- Modell	Makro- ökonomisches Modul (hybrides System)	2040	Nordamerika	12 Fertigung- sindustrien	Lieferwert industrieller Aktivität, Beschäftigung, Brennstoffpreise	+++	EIA (2013a, 2013b)
CIMS	Integriertes Energie- Wirtschaft- Gleichgewichts Modell	Makro- ökonomisches Modul (hybrides System)	30-50 Jahre	Kanada /Nordamerika	6 Fertigungsindus- trien ¹²	Einkommen, Wirtschafts- leistung, Strukturwandel, Charakteristika der Energie- dienstleistungstechnologien	+++	Jaccard (2009); Jaccard und Associates (2014); Murphy (2013); Bataille et al. (2006)

+++ endogene Rückkopplung; ++ „Verlinkung“ zu externem Modell; + Harmonisierung; - keine Rückkopplung

¹¹ Erweiterung der regionalen Abdeckung durch Enerdata 2017.

¹² ohne Bergbau (Bataille et al. 2006, S. 100)

Tabelle 2: Zusammenfassung ausgewählter Modellansätze (Fortsetzung)

Name	Modellansatz	Makro- ökonomische Rahmendaten	Zeithorizont	Regionale Abdeckung	Subsektorale Abdeckung	Haupttreiber (exogen)	Makroökono- mische Rückkopplung	Quellen
PRIMES	Partielles Gleichgewichts Modell	GEM-E3 (kann hybrid genutzt werden)	2050 (5-Jahresschritte)	35 Europäische Länder (EU28+NO+CH+TR+westl. Balkan)	9 Hauptindustriesektoren (24 Subsektoren)	BIP/Wirtschaftliche Aktivität, Demographie, Energieträger Weltmarktpreise, Technologieparameter, Politiken/ Richtlinien und Maßnahmen	++	E3MLab/ICCS at National Technical University (2014) ¹³ ; Capros (o.J.); National Technical University of Athens (NTUA) (o.J.a); National Technical University of Athens (NTUA) (o.J.b)
SAVE-Production¹⁴	Bottom-up Energienachfrage Modell	Athena Model (CPB)	20 Jahre (evtl. mehr)	Niederlande	35 Industriesektoren	Wirtschaftswachstum je Sektor; Strom- und Gaspreise, Dampflieferung zur Industrie (endogen aus der NEOMS Perspektive)	-	Daniëls und van Dril (2007); Boonekamp (2013)

+++ endogene Rückkopplung; ++ „Verlinkung“ zu externem Modell; +) Harmonisierung; -) keine Rückkopplung

¹³ Hauptquelle: aktuellste Informationen zur Modellstruktur.

¹⁴ Teil des NEOMS Modellsystems (Volkers o.J.)

Tabelle 2: Zusammenfassung ausgewählter Modellansätze (Fortsetzung)

Name	Modellansatz	Makro- ökonomische Rahmendaten	Zeithorizont	Regionale Abdeckung	Ab- Subsektorale Abdeckung	Haupttreiber (exogen)	Makroökono- mische Rückkopplung	Quellen
China Energy End Use Model	Bottom-up, end-use Modell ¹⁵	Annahmen und externe Studien	2030	China	7 Fertigungsindustrien	Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerung, sektorspezifische Treiber (z.B. bebaute Bodenfläche, gepflasterte Fläche), etc.	-	Fridley et al. (2012)
MAED-2	Simulations-Modell	Annahmen und externe Studien	mittellangfristig	Nutzer-abhängig	bis zu 10 Fertigungsindustrien	Sozioökonomische und technologische Szenario-Annahmen, substituierbare energetische Nutzung, Prozesseffizienz, etc.	-	IAEA (2006)

+++ endogene Rückkopplung; ++ „Verlinkung“ zu externem Modell; + Harmonisierung; - keine Rückkopplung

¹⁵ LEAP Software Plattform.

- Auch für die beiden Weltmodelle WEM und POLES bilden oft ökonomische und demographische Projektionen großer internationaler Organisation (z.B. Vereinte Nationen, Weltbank, Internationaler Währungsfond), Studien oder eigene Annahmen die Ausgangsbasis für deren Energiebedarfsprojektionen (IEA 2013a, S. 9; Kitous et al. 2010, S. 52–54; Kitous et al. 2013, S. 6). Auch diese Modelle sind allein nicht zu einer endogenen Berechnung von makroökonomischen Rückkopplungen fähig, es können jedoch durch die parallele Nutzung zusätzlicher makroökonomischer Modelle Rückkopplungen für einzelne Länder oder Weltregionen berechnet werden (IEA 2012; Kitous et al. 2013). Dies geschieht jedoch nicht durch eine „direkte Verbindung“ der Modelle, sondern eher durch eine Harmonisierung von Szenario-Annahmen/-Resultaten der jeweils verwendeten Modelle (IEA 2012, S. 1–2; Kitous et al. 2013, S. 8). Dass bei Modellen, die den globalen Energiebedarf abbilden sollen, eine direkte Ankopplung an viele makroökonomische Modelle mit begrenztem Aufwand nicht machbar ist, lässt sich leicht nachvollziehen.
- Die übrigen analysierten Modelle nutzen einen eher Szenario-orientierten Ansatz, bei dem sie zwar gegebenenfalls auch auf die sozioökonomischen Projektionen eines makroökonomischen Modells oder Studien zugreifen (in Kombination mit Annahmen, Expertenschätzungen), dies jedoch als streng exogener Input mit recht unterschiedlichem Detaillierungsgrad in das Modell fließt und keine makroökonomischen Rückkopplungen berechnet werden. (Boonekamp 2013; Daniëls und van Dril 2007; Fridley et al. 2012; IAEA 2006)

Fragestellung c) ob bei der Berechnung des industriellen Energiebedarfs physische Treibergrößen verwendet wurden, konnte für alle Modelle bis auf zwei, MAED-2 und POLES (Ausnahme Stahlindustrie) (IAEA 2006, S. 9; IPTS 2010, S. 7), mit ja beantwortet werden (vgl. Tabelle 3). Jedoch gilt bei Modellen mit hohem sektoralem Detaillierungsgrad, wie zum Beispiel NEMS und PRIMES, eine Einschränkung auf ausgewählte energieintensive Industrien/Produkte (EIA 2013b, S. 47; Capros o.J., S. 10; E3MLab/ICCS at National Technical University 2014, S. 32–34); was letztlich für alle bottom-up Modelle gilt, da die Anzahl energieintensiver Produkte zu hoch ist und Daten für die spezifischen Energieverbräuche kaum öffentlich zugänglich sind.

Die Beantwortung von Fragestellung d) „Wurde bei der Modellierung der industriellen Energienachfrage Strukturwandel in seinen verschiedenen Ausprägungen (intersektoral, intra-sektoral, intra-industriell: vgl. 1.2) berücksichtigt?“ gestaltete sich um einiges schwieriger. Strukturwandel in der Industrie kann wie in Abschnitt 1.2 definiert auf verschiedenen Ebenen (intersektoral, intra-sektoral, intra-industriell) und in unterschiedlichen Ausprägungen stattfinden. Dabei hängt der intra-sektorale Strukturwandel auch von der Anzahl der gewählten Branchen des Verarbeitenden Gewerbes ab: je geringer ihre Anzahl, desto mehr Struktur-

wandel muss in den intra-industriellen Strukturveränderungen beinhaltet sein. Wenn z.B. die Eisen- und Stahlindustrie von der Nicht-Eisen-Metall-Industrie getrennt in ihrer ökonomischen Entwicklung ausgewiesen ist, hat man zu diesen Veränderungen nicht die Frage dieser strukturellen Verschiebungen als intra-industriellen Strukturwandel zu beantworten, beim gemeinsamen Sektor Metallerzeugung aber sehr wohl.

Diese Thematik wird von den Modellen jedoch oft nur oberflächlich und meist nur auf intersektoralen und intra-sektoralen Strukturwandel beschränkt angesprochen. Eine Diskussion bzgl. des intra-industriellen Strukturwandels unterbleibt in der Regel, d.h. er wird der Entwicklung der Energieintensität zugeschlagen und als Energieeffizienz-Verbesserung interpretiert. Die Gründe für diese Vereinfachung sind u.a. die Tatsache, dass die Einflüsse des intra-industriellen Strukturwandels quantitativ häufig nicht erfasst werden und meist nicht bekannt sind (z.B. ein zunehmender Anteil hoch qualitativer Produkte mit geringerem spezifischen Energiebedarf in der Gebrauchsgüter- und Verbrauchsgüter-Industrie, ein wachsender Anteil von produktbegleitenden Dienstleistungen z.B. in der Investitionsgüter-Industrie (Planung, Finanzierung, Contracting)).

Eine Einschätzung des Autors zur Berücksichtigung von Strukturwandel der unterschiedlichen Ebenen in den verschiedenen Modellen findet man in Tabelle 3. Tendenziell scheinen Modelle, welche auch zu makroökonomische Rückkopplungen befähigt sind (unabhängig von der Ausprägung dieser Rückkopplung), intersektoralen und intra-sektoralen (in der Industrie) Strukturwandel - zumindest bei iterativen Berechnungen von Politik-Szenarien - zu berücksichtigen (Bataille et al. 2006, S. 100; EIA 2013a, S. 47). Intra-industrieller Strukturwandel, wie zum Beispiel Trends zu höherer Wertschöpfung (qualitative Produktverbesserungen, zusätzliche produktbegleitende Dienstleistungen, etc.) wird von den meisten Modellsätzen nicht oder kaum behandelt und wird dementsprechend sehr einfach (z.B. durch top-down Annahmen, (Fridley et al. 2012, S. 28; Daniëls und van Dril 2007, S. 852)) oder gar nicht abgebildet.

Bei den energieintensiven Grundstoffen sind u.a die Entwicklung der Materialeffizienz und -substitution mitbestimmend für ihre Nachfrage wie auch die Wiederverwendung der in den Prozessstufen und als post-consumer-Abfällen anfallenden Schrotte oder Abfallstoffe. Trotz dieses erheblichen Einflusses wurde eine detaillierte Modellierung von Materialeffizienz- und -substitution sowie Recyclingstrategien (z.B. Erhöhung von Recyclingraten, intensivere Wiederverwendung, etc.) in keinem der Modelle durchgeführt¹⁶ (vgl. Tabelle 3).

Zwar wird in den meisten Modellen zwischen Primär- und Sekundärprozessen bei den Hauptmetallen unterschieden, diese werden jedoch nicht explizit mit Bezug auf Recycling-

¹⁶ Einschätzung des Autors basierend auf gelisteter Literatur in Tabelle 3. Detailliertere Abbildung ohne Dokumentation kann nicht hundertprozentig ausgeschlossen werden.

quoten, Schrottverfügbarkeit und Stoffflüssen, sondern eher in der Thematik von Technologiewechseln modelliert (vgl. Tabelle 3):

- Das „China Energy End Use Model“ trifft eine Reihe von top-down Annahmen über die zukünftigen Anteile der Sekundärproduktion in der Stahl- und Aluminiumindustrie (Fridley et al. 2012, S. 5).
- In MAED-2 kann der Anteil der nicht-elektrischen Stahlproduktion über den Projektionshorizont als Nutzer-Input eingegeben werden, die Thematik Recyclingquoten, Schrottverfügbarkeit und Schrottqualität werden jedoch nicht angesprochen (IAEA 2006, S. 43).
- Auch das WEM erwähnt zwar Prozesswechsel in der Stahlindustrie durch mehr Schrottverwendung und entsprechend sich erhöhende EAF Produktion, sowie höhere Anteile von Recyclingpapier in der Papier- und Pappenproduktion; es wird jedoch eine Modellierung nicht näher beschrieben (IEA 2013a, S. 12).
- In POLES wird die Elektrostahlproduktion mit Hilfe eines Technologietrends und der projizierten Gesamtmenge an Stahl modelliert, die Oxygenstahlproduktion bildet dann die Differenz zwischen diesen beiden Größen. Ähnlich wie in MAED-2 werden Themen wie Schrottverfügbarkeit, etc. nicht angesprochen (IPTS 2010, S. 31).
- Auch die untersuchte Literatur zu CIMS erwähnt keine explizite Modellierung in diesem Zusammenhang (Jaccard 2009; Jaccard und Associates 2014; Murphy 2013; Bataille et al. 2006).
- Das PRIMES Modell behandelt bei der Modellierung von Sekundärproduktionen, z.B. der Hauptmetalle, die Verschiebung der Technologien abhängig von: Preisen, Politikmaßnahmen, ökonomischen Faktoren und maximalen Recyclingmöglichkeiten durch Kosten-Potential-Kurven (E3MLab/ICCS at National Technical University 2014, S. 26). Es scheinen aber nicht die Ursachen dieser Verschiebung, z.B. durch eine detaillierte Modellierung von Recyclingraten der entsprechenden Metallschrotte (z.B. Altschrott und Neuschrott) oder deren Stoffflüsse, abgebildet zu werden.
- Das industrielle Energienachfrage Modell NEMS unterscheidet die physische Produktion, z.B. von Aluminium, zwischen primärer und sekundärer Produktion am detailliertesten. Die primäre und sekundäre Produktion werden dabei in Abhängigkeit der historischen Produktion, der Energiepreise, Kapazitätsentwicklungsannahmen, und der Outputs aus dem makroökonomischen Modell detailliert modelliert. (EIA 2013b, S. 95–97)

Materialstrategien, wie zum Beispiel erhöhte Materialeffizienz und Materialsubstitution oder intensivere Produktnutzung, werden in den betrachteten Modellen nicht explizit berücksichtigt (vgl. Tabelle 3). Allein das niederländische Modell SAVE-Production erwähnt den As-

pekt der Dematerialisierung kurz, ohne eine explizite Modellierung zu erwähnen (Daniëls und van Dril 2007, S. 852).

Das „China Energy End Use Modell“ nutzt zwar Materialintensitäten in der Modellierung der zukünftigen Zement- und Aluminiumproduktion, gibt jedoch keinerlei Indikation, ob diese sich über die Zeit verändern. Dies lässt vermuten, dass die Materialintensitäten über der Zeit als konstant angenommen werden. (Fridley et al. 2012, S. 27)

Das Kriterium Handel und internationale Wettbewerbsfähigkeit ist sehr schwer einzuschätzen (weshalb es auch nicht in Tabelle 3 dargestellt wurde). Bei Modellen, welche in Interaktion mit einem makroökonomischen Modell stehen, kann davon ausgegangen werden, dass dadurch Außenhandel zumindest zu einem gewissen Grad abgebildet wird (tendenziell sind dies in makroökonomischen Modellen jedoch eher Wertangaben als physische Größen). Das „China Energy End Use Modell“ berücksichtigt explizit, wenn auch auf konstantem Niveau, den physischen Import und Export einiger energieintensiver Grundstoffe wie z.B. von Tonnen Zement, Stahl, Aluminium, Ammoniak, und Ethylen (Fridley et al. 2012, S. 27).

Die Hauptproblematik dieser Analyse der Energiemodelle waren die oft oberflächlich und nicht ausreichend detailliert dokumentierten Modellbeschreibungen und Veröffentlichungen. Dies lässt nicht immer eine eindeutige Bewertung der verschiedenen Kriterien mit hundertprozentiger Sicherheit zu. Zusätzlich ist festzustellen, dass die Modellierung der physischen Produktion energieintensiver Grundstoffe, als ein wichtiger Treiber der industriellen Energienachfrage, oft nicht als ein Schwerpunkt der Modellierung betrachtet wurde. Damit stehen sie weder im Zentrum des Interesses der Modell-Autoren noch in den Beschreibungen und Dokumentationen. Dennoch versuchte der Autor, einen möglichst ganzheitlichen und objektiven Vergleich der verschiedenen Modelle zu geben, wobei jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, dass unbekannte Modellverbesserungen/-Eigenschaften oder -Dokumentationen den genannten Kriterien besser entsprechen, als hier berücksichtigt werden konnte.

Dennoch kommt diese Analyse zweifelsfrei zu dem Schluss, dass es besonders in Bezug auf die transparente Modellierung von Recycling- und Materialeffizienz- und -substitutions-Strategien noch weiterer Anstrengungen bedarf, was die Vielfalt der Stoffströme und ihre Effizienzentwicklung in verschiedenen Anwendungsgebieten angeht. Auch die Modellierung bzw. eine transparente Darlegung von Annahmen zum intra-industriellem Strukturwandel (wie oben definiert) erscheint dem Autor erforderlich, um Fehleinschätzungen des zukünftigen Energiebedarfs (insbesondere von zu hohen Werten) in einzelnen Branchen des Verarbeitenden Gewerbes zu vermeiden.

Tabelle 3: Zusammenfassung ausgewählte Kriterien zum Strukturwandel, Materialeffizienz

Name	Physische Treibergrößen	Endogenisierter Strukturwandel	Recycling	Materialeffizienz	Quellen
WEM	Ja	Annahmen zum intersektoralen und intra-sektoralen Strukturwandel ¹⁷ werden nicht endogen modelliert, können aber in den exogenen Szenario-Annahmen berücksichtigt sein. Durch die Rückkopplung mit dem OECD ENV-Linkages Modell können Auswirkungen auf Wirtschaftswachstum und Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industrien analysiert werden. Da die physischen Produktionen mit Hilfe historischer Daten und sozioökonomischer Treiber geschätzt werden, wird zwar historisch beobachteter intra-industrieller Strukturwandel durch die Trends bis zu einem gewissen Grad berücksichtigt, jedoch keine Abweichungen von diesen Trends für die Zukunft modelliert, d.h. keine Veränderungen des intra-industriellen Strukturwandels. Prozesswechsel, beispielsweise zwischen primärer und sekundärer Produktionsroute in der Stahlindustrie werden berücksichtigt, diese Berücksichtigung erscheint aber Annahmen getrieben und wird nicht im Detail erläutert.	+	-	IEA (2013a, 2012)
POLES	Nein ¹⁸	Annahmen zum intersektoralen und intra-sektoralen Strukturwandel ¹⁹ werden nicht endogen modelliert, können aber in den exogenen Szenario-Annahmen berücksichtigt sein. Durch die Rückkopplung mit GEM-E3 Modell könnte derjenige Strukturwandel, welcher durch Politikmaßnahmen verursacht wird, abgebildet werden. Intra-industrieller Strukturwandel, z.B. Trends zu höherer Wertschöpfung aufgrund qualitativ höherwertigerer Produkte, wird nicht detailliert berücksichtigt ²⁰ .	-/+	-	Kitous et al. (2010); IPTS (2010)

+++)) detaillierte/transparente Modellierung; ++)) oberflächliche/nachvollziehbare Modellierung (z.B. top-down Annahmen); +) Erwähnung aber keine klar ersichtliche Modellierung (z.B. keine weitere Erwähnung von Methodik oder von top-down Annahmen); -) keine Erwähnung

¹⁷ (in der Industrie)

¹⁸ Ausnahme Stahlproduktion.

¹⁹ (in der Industrie)

²⁰ (keine physische Produktion als Treiber mit Ausnahme einfacher Annahmen zur Entwicklung der Stahlproduktion)

Tabelle 3: Zusammenfassung ausgewählte Kriterien zum Strukturwandel, Materialeffizienz (Fortsetzung)

Name	Physische Treibergrößen	Endogenisierter Strukturwandel	Recycling	Materialeffizienz	Quellen
NEMS	Ja	Intersektoraler Strukturwandel ist durch makroökonomische Rahmendaten und MAM abgebildet. Intra-sektoraler Strukturwandel ²¹ erscheint beschränkt (Berechnung im MAM mit Hilfe einer Brückenmatrix aus dem Jahr 2002). Intra-industrieller Strukturwandel wie z.B. Trends zu höherer Wertschöpfung, etc. werden nicht berücksichtigt (das Verhältnis physischer Output zu industriellem Lieferwert bleibt konstant auf dem Niveau von 2006). Technologiewechsel werden durch Parameter für autonomen technologischen Fortschritt, einen „Vintage-Ansatz“ und weitere Annahmen wie z.B. dass alle neuen Zementkapazitäten auf dem Trockenverfahren basieren abgebildet. Prozesswechsel zw. primärer und sekundärer Produktion werden detailliert (siehe Beispiel Aluminiumindustrie-Recycling) abgebildet.	++/+++	-	EIA (2013a, 2013b)
CIMS	Ja	Intersektoraler und intra-sektoraler Strukturwandel kann durch initiale Szenario-Annahmen berücksichtigt sein. Intersektoraler und intra-sektoraler Strukturwandel ²² welcher, durch Politikmaßnahmen verursacht wird, kann durch Feedback mit MAM abgebildet werden. Intra-industrieller Strukturwandel, wie Trends zu höherer Wertschöpfung, scheint nicht berücksichtigt zu werden. Endogene Änderungen in den Charakteristika der verschiedenen Technologien werden unter anderem über eine sinkende Kapitalkostenfunktion und eine sinkende immaterielle Kostenfunktion für neue Technologien dargestellt.	-	-	Jaccard (2009); Jaccard und Associates (2014); Murphy (2013); Bataille et al. (2006)

+++) detaillierte/transparente Modellierung; ++) oberflächliche/nachvollziehbare Modellierung (z.B. top-down Annahmen); +) Erwähnung aber keine klar ersichtliche Modellierung (z.B. keine weitere Erwähnung von Methodik oder von top-down Annahmen); -) keine Erwähnung

²¹ (in der Industrie)

²² (in der Industrie)

Tabelle 3: Zusammenfassung ausgewählte Kriterien zum Strukturwandel, Materialeffizienz (Fortsetzung)

Name	Physische Treibergrößen	Endogenisierter Strukturwandel	Recycling	Materialeffizienz	Quellen
PRIMES	Ja	Intersektoraler und intra-sektoraler Strukturwandel ²³ kann in den Projektionen des makroökonomischen Modells GEM-E3/Szenario-Annahmen berücksichtigt werden, wird jedoch nicht endogen in PRIMES modelliert. Durch die Rückkopplung mit GEM-E3 kann auch Politik-induzierter intersektoraler und intra-sektoraler Strukturwandel abgebildet werden. Parameter in Kosten-Preis-Modulen können zwischen den Szenarien variiert werden um Strukturwandel zu reflektieren. Technologiewechsel werden unter anderem durch einen „Vintage-Ansatz“, technologische Charakteristika und „Lerneffekte“ abgebildet. Laut Modellbeschreibung wird die physische Produktion unter Berücksichtigung von Material und Effizienz modelliert, es findet jedoch keine explizite Erklärung bzw. Erwähnung der Modellierung von Trends zu höherer Wertschöpfung, Materialstrategien, etc. statt. Somit ist unklar ob der Begriff „Effizienz“ sich hier auf Energie- oder Materialeffizienz bezieht. Prozesswechsel beispielsweise zwischen primärer und sekundärer Produktionsroute werden jedoch berücksichtigt (z.B. Kosten-Potential-Kurven).	++	+/-	E3MLab/ICCS at National Technical University (2014); Capros (o.J.); National Technical University of Athens (NTUA) (o.J.a); National Technical University of Athens (NTUA) (o.J.b)
SAVE-Production	Ja	Annahmen zum intersektoralen und intra-sektoralen ²⁴ Strukturwandel werden nicht endogen modelliert, können aber in den exogenen Szenario-Annahmen berücksichtigt sein. Intra-industrieller Strukturwandel und Dematerialisierung (z.B. Verschiebungen von Chemikalien mit niedrigem Wert zu Chemikalien mit höherem Wert) können durch unterschiedliche Verhältnisse von Wirtschaftswachstum zu physisches Wachstum abgebildet werden, dazu kommen teilweise exogene Annahmen zum physischen Wachstum. Technologiewechsel werden unter anderem durch einen „Vintage-Ansatz“ und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen abgebildet.	-	+	Daniëls und van Dril (2007); Boonekamp (2013)

+++)) detaillierte/transparente Modellierung; ++)) oberflächliche/nachvollziehbare Modellierung (z.B. top-down Annahmen); +)) Erwähnung aber keine klar ersichtliche Modellierung (z.B. keine weitere Erwähnung von Methodik oder von top-down Annahmen); -)) keine Erwähnung

²³ (in der Industrie)

²⁴ (in der Industrie)

Tabelle 3: Zusammenfassung ausgewählte Kriterien zum Strukturwandel, Materialeffizienz (Fortsetzung)

Name	Physische Treibergrößen	Endogenisierter Strukturwandel	Recycling	Materialeffizienz	Quellen
China Energy End Use Model	Ja	Annahmen zum intersektoralen und intra-sektoralen ²⁵ Strukturwandel werden nicht endogen modelliert, können aber in den exogenen Szenario-Annahmen berücksichtigt sein. In dieser Studie wurden Verschiebungen zu einem größeren Beschäftigungsanteil im tertiären Sektor, d.h. eine Abkehr von weiterer Industrialisierung angenommen. Intra-industrieller Strukturwandel wird zu einem gewissen Maß berücksichtigt (z.B. Trends zu hochwertigen Stählen, Verschiebung zu Sekundärproduktion, etc.), diese Berücksichtigung erscheint aber tendenziell Annahmen getrieben. Der Detaillierungsgrad ist abhängig von dem betrachteten Sektor (z.B. wird die Stahlproduktion in Abhängigkeit von der BWS der „sonstigen Industrien“ und der Zementproduktion - hängt seinerseits von der Entwicklung der bebauten Bodenfläche, etc. ab - mittels eines Verhältnisses geschätzt, welches anhand von Annahmen für die zukünftige Projektion angepasst wird).	++	-/+	Fridley et al. (2012)
MAED-2	Nein ²⁶	Annahmen zum Strukturwandel werden nicht endogen modelliert, diese kommen aus exogenen Szenario-Annahmen (User Input).	-/+	-	IAEA (2006)

+++ detaillierte/transparente Modellierung; ++ oberflächliche/nachvollziehbare Modellierung (z.B. top-down Annahmen); + Erwähnung aber keine klar ersichtliche Modellierung (z.B. keine weitere Erwähnung von Methodik oder von top-down Annahmen); - keine Erwähnung

²⁵ (in der Industrie)

²⁶ Ausnahme Stahlproduktion und Petrochemie.

Einen methodischen Ansatz zur Integration dieser Aspekte für den Energiebedarf in der Stahlindustrie sowie die konzeptionelle Kopplung eines makroökonomischen Modells (ASTRA) mit einem technologieorientierten Energienachfrage Modell (FORECAST Industry) wird in nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

3.2 Die Modelle

Für den in dieser Arbeit vorgestellten konzeptionellen Brückenschlag, wurden zwei Modelle des Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) ausgewählt: das makroökonomische Modul des system-dynamischen Modells ASTRA (ASsessment of TRAnsport Strategies; siehe nachfolgende Beschreibung) und das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry (FORecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool; siehe nachfolgende Beschreibung).

Mehrere Gründe sprachen für die Auswahl genau dieser beiden Modelle:

- Transparente Modellannahmen, Methodik und Modellstruktur durch Entwicklung und Nutzung beider Modelle in derselben Forschungseinrichtung.
- Passende geografische Auflösung, sowie gemeinsamer Zeithorizont bei Szenarioberechnungen.
- Nahezu passende subsektorale Struktur der Bruttowertschöpfungsentwicklung in der Industrie.
- Teilweise bereits bekannte potentielle Herausforderungen der Modellkopplung durch gemeinsame Modellhistorie.

Die Kopplung des bottom-up Energienachfragemodells FORECAST Industry hätte jedoch auch an jedes andere makroökonomische Modell mit gleicher geographischer Auflösung und gleichem Zeithorizont erfolgen können, solange das Modell die Bruttowertschöpfung der einzelnen Länder auf einer ausreichend detaillierten Industriebranchenebene zur Verfügung stellt. Eine mögliche Alternative zu dem makroökonomischen Modell ASTRA wären dann zum Beispiel das zuvor erwähnte GEM-E3 (vgl. Abschnitt 3.1) oder das E3ME Modell (vgl. Jochem et al. 2007).

Das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry wäre in diesem Modellverbund nicht so einfach zu ersetzen, da es aktuell mit zu den detailliertesten Modell-Darstellungen der europäischen Energienachfrage gehört (vgl. Abschnitt 3.1).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das makroökonomische Modell ASTRA - durch die Transparenz seiner Annahmen, Struktur, und Methodik, sowie durch die Nähe zu dessen Modellentwicklern - die attraktivste und sinnvollste Wahl für die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse war.

3.2.1 Das makroökonomische top-down Modell ASTRA

ASTRA (ASsessment of TRAnsport Strategies) ist ein system-dynamisches, integriertes Bewertungsmodell der langen Frist (bis 2050) für die EU27 plus Norwegen und die Schweiz, mit speziellem Modellierungsschwerpunkt auf dem Transportsektor. Besonders an dem top-down Modell ASTRA ist, dass es sowohl den Einfluss von Transportstrategien und Maßnahmen auf die Ökonomie, als auch auf die Umwelt abbilden kann und iterative Berechnungen dieser und anderer Maßnahmen auf Wirtschaft und Beschäftigung (durch Feedbackschleifen) ermöglicht. ASTRA setzt sich aus neun Modulen zusammen, welche unter anderem ein Modul zur Berechnung der Bevölkerungsentwicklung und ein makroökonomisches Modul beinhalten. Dabei berücksichtigt ASTRA unter anderem Angebot und Nachfrage, Beschäftigung, Investitionen, und Außenhandel für 25 ökonomische Sektoren. (Fraunhofer ISI und TRT Trasporti e Territorio srl 2015)

Für die nachfolgenden Analysen sind insbesondere die Bruttowertschöpfungsprojektionen des makroökonomischen Moduls in ASTRA relevant, welche jedoch in ASTRA selbst nur eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu anderen Größen, wie zum Beispiel den Investitionen, spielen. Diese Problematik wird in Kapitel 5.2.1 bei der Analyse der Szenario-Annahmen noch einmal kurz aufgegriffen. Die von ASTRA modellierte Bruttowertschöpfungsentwicklung beinhaltet bereits modellendogene Annahmen zu inter- und intra-sektorialem Strukturwandel (vgl. 1.2.1). Da es jedoch nur ökonomische und demographische Informationen als Modelloutput liefert, ist das Modell nicht in der Lage Projektionen der physischen Treiber der Energienachfrage zu liefern, und somit intra-industriellen Strukturwandel (vgl. 1.2.2) wie zum Beispiel Prozessverschiebungen (primär zu sekundär Produktion) zu modellieren.

Entwickelt wurde ASTRA in Kooperation des Fraunhofer ISI²⁷ und dem TRT Trasporti e Territorio für detaillierte Informationen siehe <http://www.astra-model.eu/>.

²⁷ Wolfgang Schade: kürzliche Ausgründung M-Five GmbH.

3.2.2 Das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry

Das FORECAST (FORecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool) (EU-) Modell ist ein bottom-up Energienachfragemodell der langen Frist, für die EU27 plus Norwegen, Schweiz und die Türkei. Es wurde am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelt und unterlag in den vergangenen Jahren ständigen Weiterentwicklungen (Fraunhofer ISI 2015; Herbst et al. 2013; Fleiter et al. 2012).

Durch den bottom-up Modellierungsansatz ermöglicht FORECAST eine technologiespezifische Berechnung des Strom- und Brennstoffverbrauchs sowie der zugehörigen Emission für die Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Industrie und Haushalte. Dies bedeutet, dass technologischer Fortschritt aber auch die Diffusion und Auswirkungen von Energieeinspartetechnologien bzw. Energiepolitikmaßnahmen explizit modelliert werden können. Die Haupttreiber der Energienachfrage, neben Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung, sind die Aktivitätsgrößen der unterschiedlichen Sektoren (z.B. Quadratmeter pro Beschäftigten, physische Tonnen energie-intensiver Produkte, etc.), welche bisher zumeist Modell exogene Inputparameter darstellten. (Öko-Institut et al. 2013, S. 107)

Da für diese Arbeit in erster Linie das Modul zur Berechnung der industriellen Energienachfrage (FORECAST Industry) relevant ist, wird nur dieses nachfolgend etwas detaillierter beschrieben (vgl. Fraunhofer ISI 2015): Eine Besonderheit von FORECAST Industry (EU-Modell) ist dessen hohe sektorale aber auch technologische Auflösung. Je nach Datenverfügbarkeit und Indikator (z.B. Bruttowertschöpfung, Beschäftigte) kann zwischen acht und elf Industriebranchen unterschieden werden. Haupttreiber des Energiebedarfs dieser Branchen ist einerseits deren Wertschöpfungsentwicklung (bei nicht energie-intensiven Industriezweige) und andererseits die industrielle Produktion in physischen Tonnen (energie-intensive Industriezweige). FORECAST Industry berechnet auf Basis dieser physischen Industrieproduktionsprojektionen den Energieverbrauch nach Energieträger für eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesstechnologien und ausgewählte Querschnittstechnologien. Dabei findet die Abgrenzung zwischen diesen beiden Kategorien laut Fleiter et al. (2013, S. 21–22) auf Basis deren Zuordenbarkeit statt: Prozesstechnologien stellen sehr charakteristische, eindeutig zuordenbaren Technologien dar (z.B. Elektroofenroute in der Stahlproduktion), während Querschnittstechnologien branchen- und verfahrensübergreifend eingesetzt werden können (z.B. Beleuchtung). Es kann jedoch in manchen Anwendungsfällen auch zu Überschneidungen der beiden Kategorien kommen (Fleiter et al. 2013, S. 21).

Die Auswahl der unterschiedlichen Prozesstechnologien - welche sowohl eine Kette von Verarbeitungsschritten als auch einzelne Verarbeitungsschritte darstellen können - wird bestimmt von der Relevanz der Technologie in der Zusammensetzung des Energieverbrauchs der Branche/des Produktionsverfahrens, aber auch von den verfügbaren Daten für den Model-

lierungsansatz (Fleiter et al. 2013, S. 25). Eine detailliertere Diskussion der in FORECAST Industry abgebildeten Produktgruppen erfolgt in Abschnitt 3.4. Weitere Informationen zu FORECAST Industry - Methodik, Datenbasen und Publikationen - sind verfügbar auf der Modellhomepage: <http://www.forecast-model.eu> (Fraunhofer ISI 2015).

3.2.3 Gemeinsame Modellhistorie

Wie bereits zuvor in Herbst et al. (2013) diskutiert, ist die Idee der Kopplung des makroökonomischen Modells ASTRA und FORECAST Industry nicht neu und entstand bereits innerhalb des ADAM (Adaptation and Mitigation Strategies) Projektes (Jochem et al. 2007; Jochem et al. 2009; Schade et al. 2009) - das Projekt kombinierte, unter anderem, das makroökonomische Modul ASTRA mit einer Reihe von bottom-up-Modellen für die vier Endenergiesektoren: Industrie (FORECAST Industry), Dienstleistungen, Verkehr und private Haushalte. Dieses hybride Energiemodellsystem wurde vor rund zehn Jahren konzipiert, um die Energienachfrage und das Energieangebot bzw. die Treibhausgasemissionen, für 29 europäische Länder bis zum Jahr 2050 unter Berücksichtigung verschiedener Politik-Szenarien zu projizieren (Jochem et al. 2007, S. 7). Die Kopplung von ASTRA an das Industrie-Modell erfolgte jedoch nur rudimentär. Das dort beschriebene Transformationsmodul diente in erster Linie als Datenbasis, da die Übersetzung noch nicht ausgereift und methodische Verbesserungen (z.B. ökonometrische Methoden) noch notwendig waren (Jochem et al. 2007, S. 17–18). Auch das dort beschriebene MATEFF-Modell, dessen Aufgabe die Projektion von Produktionsmengen energieintensiver Produkte und der Berücksichtigung von Materialeffizienz und -substitution war (Jochem et al. 2007, S. 18), war zu diesem Zeitpunkt methodisch nicht ausgereift und basierte in erster Linie auf von den beteiligten Wissenschaftlern durchgeführten Expertenschätzungen. Eine detaillierte Modellierung von intra-industriellem Strukturwandel wurde nicht explizit verfolgt (z.B. in der Stahlproduktion (Jochem et al. 2007, S. 103) oder der Aluminiumproduktion (Jochem et al. 2007, S. 108)).

3.3 Berücksichtigung unterschiedlicher Modellstruktur

Um die von ASTRA zur Verfügung gestellte makroökonomische Information in physische Treiber des bottom-up Modells FORECAST Industry zu übersetzen, wurde die jeweilige Sektor-Struktur der Modelle für die Industrie einander gegenüber gestellt (Tabelle 4). FORECAST Industry differenziert den industriellen Energieverbrauch in 8 Subsektoren²⁸. Das makroökonomische Modell ASTRA differenziert hingegen 12 Subsektoren der industriellen Bruttowertschöpfung. Interessant ist hierbei, dass das makroökonomische Modell insbesondere für die weniger energieintensiven Sektoren (z.B. Maschinenbau, Fahrzeugbau, sonstige

²⁸ Die Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes wird für FORECAST Industry je nach Anwendung in bis zu 11 Subsektoren differenziert.

Industrie) eine weitaus differenzierte Darstellung ermöglicht, während das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry energieintensive Branchen (z.B. Eisen und Stahl, Nicht-Eisen Metalle) differenzierter abbildet. Dieser Gegensatz spiegelt zum Teil den unterschiedlichen Charakter der Modelle wieder: den Fokus des bottom-up Modells auf die Nachfrage der energieintensiven Grundstoffindustrien, das Gewicht des makroökonomischen Modells auf die weniger energieintensiven Gebrauchs- und Konsumgüterindustrien.

Tabelle 4: Gegenüberstellung Industriezweige FORECAST Industry und ASTRA

ID	FORECAST Industry (EU-Modell)	ASTRA (EU-Modell)
1	Eisen und Stahl	Metallprodukte
2	Nicht-Eisen Metalle	Metallprodukte
3	Papier-, Druck- und Verlagsgewerbe	Papier
4	Nicht-metallische Mineralstoffindustrie	Mineralien ²⁹
5	Chemische Industrie	Chemie
6	Nahrungs- und Genussmittelindustrie	Ernährung
7	Maschinenbau und andere metallverarbeitende Industrien ³⁰	Industrielle Maschinen, Fahrzeuge, Computer, Elektronik
8	Sonstige Industrie	Textilien, Plastik, Sonstige Industrie

Quelle: ASTRA-EC, FORECAST Industry

3.4 Typisierung von energieintensiven Grundstoffen bzw. Zwischenprodukten für Energiebedarfsprojektionen

Folglich wurde auch bei der Entwicklung von FORECAST Wert auf die Nutzung adäquater Treiber, wie zum Beispiel physische Produktionen für die Grundstoffindustrie, gelegt. FORECAST Industry berücksichtigt 64 energieintensive Prozesse deren Treiber die physische Produktion ausgewählter Produkte in Tonnen ist (Fleiter et al. 2013; Fleiter et al. 2012). Die Modellierung dieser Produkte gestaltet sich als komplexe Aufgabe, wie sich in der vorliegenden Arbeit herausstellen wird, da diese Produkte in ihrer Nachfragestruktur und ihren Eigenschaften in der Wertschöpfungskette sehr heterogen sein können. Hierdurch gelingt es nicht immer, sie explizit aus Produktverbänden herauszulösen. Der nachfolgende Abschnitt soll

²⁹ Beinhaltet Gewinnung Steine Erden Bergbau

³⁰ Beinhaltet nicht Medizin, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Optik

deshalb einen kurzen Überblick über diese Grundstoffe und Produkte und deren Unterschiede geben und die Schwerpunktwahl der Arbeit auf der Produktebene begründen. Eine detaillierte Diskussion zur Wahl der Fallstudie erfolgt in Abschnitt 5.1.

Die in FORECAST Industry zugrunde liegenden Prozesstechnologien können grob 41 Produkten zugeordnet (siehe Tabelle 5) und in vier Produktgruppen aufgeteilt werden:

I. (Basis-) Massenprodukte

Hierunter werden Grundstoffe verstanden, zu deren Erzeugung keine Halb- und Fertigerzeugnisse benötigt werden, sondern in der Regel ausschließlich Rohstoffe (z.B. Eisenerz, Bauxit, Mineralöl, Erdgas). Diese Grundstoffe werden direkt aus den zugrundeliegenden Rohstoffen erzeugt, können jedoch selbst als Zusatz- oder Hilfsstoff in die Produktion anderer Produkte einfließen (z.B. Ethylen zusammen mit Chlor für PVC-Mono- oder Polymere).

II. (Basis-) Massenprodukte mit primärer und sekundärer Produktionsroute³¹

Hier handelt es sich um Grundstoffe, zu deren Erzeugung mindestens zwei Produktionsrouten zur Verfügung stehen. Während in der primären Produktionsroute das Produkt auf Basis von herkömmlichen Rohstoffen, meistens unter höherem Energieeinsatz, erzeugt wird, basiert die sekundäre Produktionsroute hauptsächlich auf der Verwertung von Sekundärmaterial (z.B. Stahlschrott in der Elektro-stahlerzeugung, analog Kupfer, Zink und Aluminium).

III. Basisendprodukte aus Grundstoffen mit Hilfs- und Zusatzstoffen

Diese Produkte benötigen zu deren Erzeugung nicht nur Rohstoffe, sondern auch bereits bearbeitete Hilfs- und Zusatzstoffe (z.B. Papier aus Zellstoff und Holzschliff mit Füllstoffen und Bleichmittelzusätzen). Zur Produktion dieser Vorprodukte stehen oft verschiedene Prozesse zur Verfügung.

IV. (Halb-) Erzeugnisse aus Grundstoffen bzw. Basisendprodukten/-materialien

Hierunter versteht man die weiterverarbeitete Produkte aus Grundstoffen bzw. Basisendprodukten zu Halb- oder Fertigerzeugnissen (z.B. Walzstahl aus Rohstahl, Aluminiumhalbzeug aus Aluminiumblöcken), aber auch die Produktion von Halb- oder Fertigerzeugnissen aus Grundstoffen und Rohstoffen (z.B. Glas, Keramik, etc.).

³¹ Begriff erstmals verwendet in Herbst et al. 2014b, S. 202.

Tabelle 5: Typisierung von Industrieprodukten

Produkt	Branche	Homogenitätsgrad	Durchschnittspreise [US\$/t]	EEV [GJ/t]	Außenhandel
(Basis-) Massenprodukte					
Chlor	Grundstoffchemie	Hoch	163	10,7-11,8 ³²	0,00%
Ethylen	Grundstoffchemie	Hoch	1416	17,5-47,0 ³³	-0,14%
Sauerstoff	Grundstoffchemie	Hoch	142	0,9	-0,01%
Ammoniak	Grundstoffchemie	Hoch	508	10,2-17,0 ³⁴	-0,03%
Methanol	Grundstoffchemie	Hoch	537	6,9-18,9 ³⁵	-0,19%
Soda	Grundstoffchemie	Hoch	773 ³⁶	11,6	-0,01%
(Industrie-)Ruß	Grundstoffchemie	Hoch	2.541	66,5	-0,01%
Salpetersäure	Grundstoffchemie	Hoch	189	0,1	0,01%
Polypropylen, -ethylen	Grundstoffchemie	Mittel	vgl. Gummi-/Kunststoffe	1,9-2,6	vgl. Gummi-/Kunststoffe
Polysulfone	Grundstoffchemie	Mittel	vgl. Gummi-/Kunststoffe	27,6	vgl. Gummi-/Kunststoffe
Titandioxid	Grundstoffchemie	Hoch	3540	18,8-43,3 ³⁷	0,11%
Stärke	Ernährungsgewerbe	Hoch	847	4,5	0,07%
Zucker (raffiniert)	Ernährungsgewerbe	Hoch	819	5,2	0,07%
Klinker	Verarb. Steine Erden	Hoch	61	3,6-4,2	0,01%
Branntkalk	Verarb. Steine Erden	Hoch	131	3,8	0,01%
Koks	Eisen- und Stahl	Hoch	309	3,3	-0,25%
Sinter	Eisen- und Stahl	Hoch	k.A.	2,3	0,00%
Zellstoff	Papierindustrie	Hoch	898	15,8	-0,18%
Holzstoff	Papierindustrie	Hoch	541	5,6	-0,01%
(Basis-) Massenprodukte mit primärer und sekundärer Produktionsroute					
Stahl	Eisen- und Stahl	Hoch	385	17,3/2,6	-0,03%
Aluminium	Nicht-Eisen Metalle	Hoch	1905	58,8/10,7	-1,82%
Zink	Nicht-Eisen Metalle	Hoch	2185	16,9/1,6	-0,28%
Kupfer	Nicht-Eisen Metalle	Hoch	6786	10,8/6,3	-1,31%
Basisendprodukte aus Grundstoffen mit Hilfs- und Zusatzstoffen					
Zement	Verarb. Steine Erden	Hoch	95	0,2	0,14%
Papier	Papierindustrie	Hoch ³⁸	1.434	7,4	3,27%
Gips	Verarb. Steine Erden	Hoch	51	1,2	0,01%

³² Prozessabhängig (Diaphragma-Verf., Membran-Verf., ohne Amalgan-Verf.)³³ Prozessabhängig (gasförmige KW, Naptha, andere KW)³⁴ Prozessabhängig (Erdgas, andere KW)³⁵ Prozessabhängig (Erdgas, erdölbasierte KW, Klärschlamm)³⁶ Importpreis, da keine Exporte verfügbar³⁷ Prozessabhängig (Chlor, Sulfat)³⁸ Für die Modellierung der Papierproduktion, mussten aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit, Durchschnittswerte verwendet werden (Fleiter et al. 2012, S. 88; Fleiter et al. 2013, S. 360). Deshalb wird in dieser Tabelle das „Durchschnittsprodukt“ Papier als homogenes Produkt kategorisiert. In der Praxis unterscheiden sich jedoch die unterschiedlichen Papierprodukte stark in Qualität und Verwendungszweck (Fleiter et al. 2012, S. 88; Fleiter et al. 2013, S. 359–360).

(Halb-) Erzeugnisse aus Grundstoffen bzw. Basisendprodukten/-materialien

Walzstahl	Eisen- und Stahl	Mittel	880	1,9 ³⁹	0,14%
HW Aluminium	Nicht-Eisen Metalle ⁴⁰	Niedrig	5.339	7,6-12,8	1,54%
HW Zink	Nicht-Eisen Metalle	Mittel	2.625 ⁴¹	k.A.	-0,07%
HW Kupfer	Nicht-Eisen Metalle	Niedrig	7.478	5,8	1,89%
Hohlglas	Nicht-Metall. Min.	Mittel	952	7,2	0,34%
Flachglas	Nicht-Metall. Min.	Mittel	741	14,2	0,18%
übrige Glasprodukte	Nicht-Metall. Min.	Mittel	3.990	7,8	0,12%
Glasfasern	Nicht-Metall. Min.	Mittel	4.751	14,2	-0,16%
Keramik	Nicht-Metall. Min.	Niedrig	1.189	6,2-36,5 ⁴²	0,36%
Gummi-/Kunststoffe	Kunststoffindustrie	Niedrig	3916	vgl. Polypropylen, -ethylen, -sulfone	7,68%
Kalkprodukte ⁴³	Verarb. Steine Erden	Mittel	k.A.	0,1-0,2	k.A.
Ziegel	Verarb. Steine Erden	Mittel	1.642	1,6	0,00%
Bier	Ernährungsgewerbe	Mittel	906	1,4	0,30%
Backwaren	Ernährungsgewerbe	Niedrig	3.210	3,8	0,72%
Milcherzeugnisse	Ernährungsgewerbe	Niedrig	2.024	2,1	1,50%
Fleischwaren	Ernährungsgewerbe	Niedrig	5.312	3,5	0,18%

Quelle: United Nations 2014b, 2014c, 2014d, 2014a, 2014e, 2014f; United Nations 2016; Börse Frankfurt 2014a, 2014b, 2014c; Stahlpreise.eu 2014; Fleiter et al. (2013)

Bei den betrachteten (Basis-) Massenprodukten (Gruppe I) handelt es sich durchgängig um sehr homogene Produkte (vgl. Tabelle 5; Ausnahme Polymere und -sulfone), dies auch bedingt durch deren sehr geringen Aggregations- bzw. Weiterverarbeitungsgrad (z.B. energieintensive Produkte der Grundstoffchemie: Chlor, Salpetersäure, Ammoniak, etc.).

Auch bei den Basismassenprodukten mit primärer und sekundärer Produktionsroute sowie den Basisendprodukten aus Grundstoffen (z.B. Zement oder Papier) handelt es sich in erster Linie um relativ homogene Produkte (vgl. Tabelle 5), welche auch an der Börse gehandelt werden können. Ein Beispiel hierfür sind Massenhähle, welche mehrheitlich im Baugewerbe nachgefragt werden und allgemeinen Standards und Normen unterliegen.

Die Produkte der Gruppe der Erzeugnisse (IV) hingegen zeichnen sich durchgängig durch einen mittleren bis geringen Homogenitätsgrad aus. Hierbei handelt es sich meist um Pro-

³⁹ Hierbei handelt es sich um einen Wert, welcher alle Prozesse die an die Flüssigstahlerzeugung anschließen zusammenfasst. Da Walzwerke in diesem Zusammenhang der größte Energiekonsumenten sind, wurde der Überbegriff „Walzstahl“ gewählt. (Fleiter et al. 2013, S. 286)

⁴⁰ Aluminium, Kupfer und Zink gehören zu den energie-intensivsten Nicht-Eisen-Metallen mit relevanter Jahresproduktion, weshalb in FORECAST Industry der Fokus nur auf diese Produkte gelegt wurde. (Fleiter et al. 2013, S. 317)

⁴¹ Importpreis (Halbwaren Zink ohne 7906)

⁴² Feuerfestkeramik, Fliesen, Platten und andere, Haushaltwaren, Sanitärkeramik, techn. Keramik und Sonstige

⁴³ Aufbereitung von Kalkstein bzw. Kalkmahlen

duktgruppen mit einem sehr hohen Aggregationsniveau, was bedeutet, dass verschiedenste und eben sehr heterogene Erzeugnisse unter einem Oberbegriff zusammengefasst werden (z.B. Fabrikate der Keramikindustrie: Haushaltskeramik, Sanitärkeramik, technische Keramik, etc.; Fertigerzeugnisse der Stahl- und Aluminiumindustrie: Schrauben, Bleche, Rohre, Verpackungen, Tisch- und Küchenartikel, etc.).

Die Durchschnittspreise der unterschiedlichen Produkte (siehe Tabelle 5) wurden auf Basis der UN Comtrade Datenbank der United Nations (2014b, 2014c, 2014d, 2014a, 2014e, 2014f) und deren HS 1992 Kategorisierung ermittelt (für eine Zuordnung der HS Codes zu den jeweiligen Produkten siehe Anhang Tabelle 63), wobei als Referenzwerte die Daten der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2013 gewählt wurden. Berechnet wurden Exportpreise (Exportwert des Produktes dividiert durch das Nettogewicht der Exporte dieses Produktes) in USD pro Tonne. Für ausgewählte Produkte (Aluminium, Stahl, Kupfer, Zink) wurden Marktpreise (Börse Frankfurt 2014a, 2014b, 2014c; Stahlpreise.eu 2014) herangezogen, welche sich auch ungefähr im Bereich der mittels der UN Comtrade Daten berechneten Preise befanden. Der Wert der betrachteten Produkte pro Tonne unterscheidet sich sehr stark voneinander (unter anderem aufgrund des Aggregationsniveaus). Das teuerste Produkt in dieser Zusammenstellung ist Kupfer sowie Halbwaren (HW) daraus, gefolgt von Halbwaren aus Aluminium und Fleischwaren. Den niedrigsten Durchschnittspreis hat Gips, gefolgt von weiteren zwei Produkten der Branche Verarbeitung von Steinen und Erden: Klinker und Branntkalk. Auch Produkte der Grundstoffchemie (Sauerstoff, Chlor, und Salpetersäure) haben einen relativ niedrigen Wert pro Tonne. Zu berücksichtigen ist, dass es sich bei diesen kostengünstigen Produkten in erster Linie um Massen- oder Basisendprodukte mit einem sehr niedrigen Aggregationsniveau handelt.

Aus dem Sammelwerk Fleiter et al. (2013), wurden außerdem die spezifischen Energieverbräuche (GJ/t) für Strom und Brennstoffe der verschiedenen Produkte aggregiert um den Endenergieverbrauch⁴⁴ zu ermitteln. Für ausgewählte Produkte können unterschiedliche Produktionsprozesse verwendet werden. Ein Beispiel hierfür ist Aluminium, welches mittels einer primären oder sekundären Produktionsroute hergestellt werden kann, aber auch Massenprodukte (wie z. B. Zement-Klinker) können in unterschiedlichen Verfahren produziert werden (trocken-, halbtrocken-, nass-Verfahren). Zusätzlich dazu können noch unterschiedliche Produktuntergruppen in einem Überbegriff zusammengefasst sein. Bei Produkten, wo dies zutrifft wurden in Tabelle 5 die spezifischen Energieverbräuche in ‚von‘ ‚bis‘ Angaben gemacht, primär und sekundär Produktion werden durch einen Schrägstrich getrennt. Zu den energieintensivsten Prozessen gehört unter anderem die Produktion von Primäraluminium; grundsätzlich gilt für die Nicht-Eisen Metallindustrie, aber auch für die Eisen- und Stahlin-

⁴⁴ EEV auf eine Kommastelle gerundet.

dustrie, dass die Primärproduktion einen weitaus höheren Endenergieverbrauch verzeichnet als die Sekundärproduktion. Aber auch die Herstellung von Titandioxid im Sulfatverfahren, Polysulfonen und -sulfiden, Ammoniak als Destillationsrückstand, Flachglas, usw. gehört zu den energieintensiven Industrieprozessen. (Fleiter et al. 2013)

Für eine detaillierte Branchenanalyse (inklusive möglicher Einsparpotentiale) siehe Fleiter et al. (2013).

Als Indikator für den relativen Außenhandel wurde der Wert der Nettoexporte des jeweiligen Produkts mit dem Wert der gesamten Nettoexporte Deutschlands für das Jahr 2013 ins Verhältnis gesetzt (auf Basis der UN Comtrade Datenbank der United Nations (2014b, 2014c, 2014d, 2014a, 2014e, 2014f) und deren HS 1992 Kategorisierung). Umso höher der Prozentsatz, umso wichtiger ist das Produkt für den Nettoaußenhandel Deutschlands. Positive Werte stehen für Nettoexporte, negative Werte für Nettoimporte. Den höchsten Anteil der hier betrachteten Produkte am Nettoaußenhandel von Deutschland im Jahr 2013 hatte die Kunststoffindustrie mit 7,7%, gefolgt von der Papierindustrie (3,3%), sowie Halbwaren aus Kupfer (1,9%) und Aluminium (-1,8%) und Halbwaren daraus (1,5%) (vgl. Tabelle 5).

Die in der nachfolgenden Arbeit vorgestellte Methodik konzentriert sich als Fallstudie auf ein ausgewähltes energieintensives Produkt: Stahl mit der Unterscheidung zwischen Elektro- und Oxygenstahl auf Prozessebene. Basierend auf der vorherigen Analyse wurde speziell dieses Produkt ausgewählt, weil es sich (siehe auch Tabelle 5):

- um ein Produkt mit hohen Produktionsmengen;
- um ein Produkt, welches sowohl über eine primäre als auch sekundäre Produktionsroute verfügt;
- um ein Produkt mit hohen spezifischen Energieverbräuchen;
- und um ein Produkt mit einem relativ hohen Homogenitätsgrad handelt.

Nur für relativ homogene Produkte, wie zum Beispiel Roh- und Massentähle, können verallgemeinerte Annahmen zur zukünftigen Entwicklung innerhalb Europas auf Länderebene getroffen werden. Eine detaillierte Disaggregation der Produkte, zum Beispiel in unterschiedliche Stahlqualitäten (z.B. Edelstahl, Hochfeste Stähle, Weißblech, Profilstahl) übersteigt den Rahmen dieser Arbeit, da hier eine Vielzahl an Aspekten, zusätzlich zu deren Wirtschaftsstruktur, die Produktionsentscheidungen der Unternehmen und Länder beeinflussen kann, wie zum Beispiel Ressourcenausstattung, Infrastruktur, Produktionsgewohnheiten, Traditionen, und internationaler Wettbewerb.

4. Fall 1: Modellierung der Wertschöpfung des Industriesektors bei beschränkter Verfügbarkeit makroökonomischer Information

Um den Energiemodellierern im bereits erwähnten Fall der beschränkten Verfügbarkeit makroökonomischer Information zumindest ein einfaches Werkzeug zur Projektion der industriellen Sektorentwicklung in die Hand zu geben, wurde im nachfolgenden Kapitel versucht, eine einfache, aber auch begrenzte Methodik für diesen Zweck zu entwickeln. Basierend auf Studien und ökonometrischen Ansätzen von Haraguchi und Rezonja (2010a, 2010b, 2011) wurde versucht, die Entwicklung des Anteils des industriellen Sektors (hierunter wird nur das Verarbeitendes Gewerbe verstanden) an der Gesamtwirtschaft und dessen subsektorale Entwicklung mittels Regressionsgleichungen herzuleiten, aber auch deren Qualität kritisch zu beleuchten. Da im Laufe der Arbeit die Einschränkungen dieses limitierten methodischen Zuganges offensichtlich wurden, mussten jedoch die Ergebnisse beziehungsweise Grenzen der ermittelten Projektionsgleichungen kritisch hinterfragt und diskutiert werden und erwiesen sich als nur eingeschränkt für den hier vorgesehenen Zweck nutzbar.

4.1 Historische Entwicklung

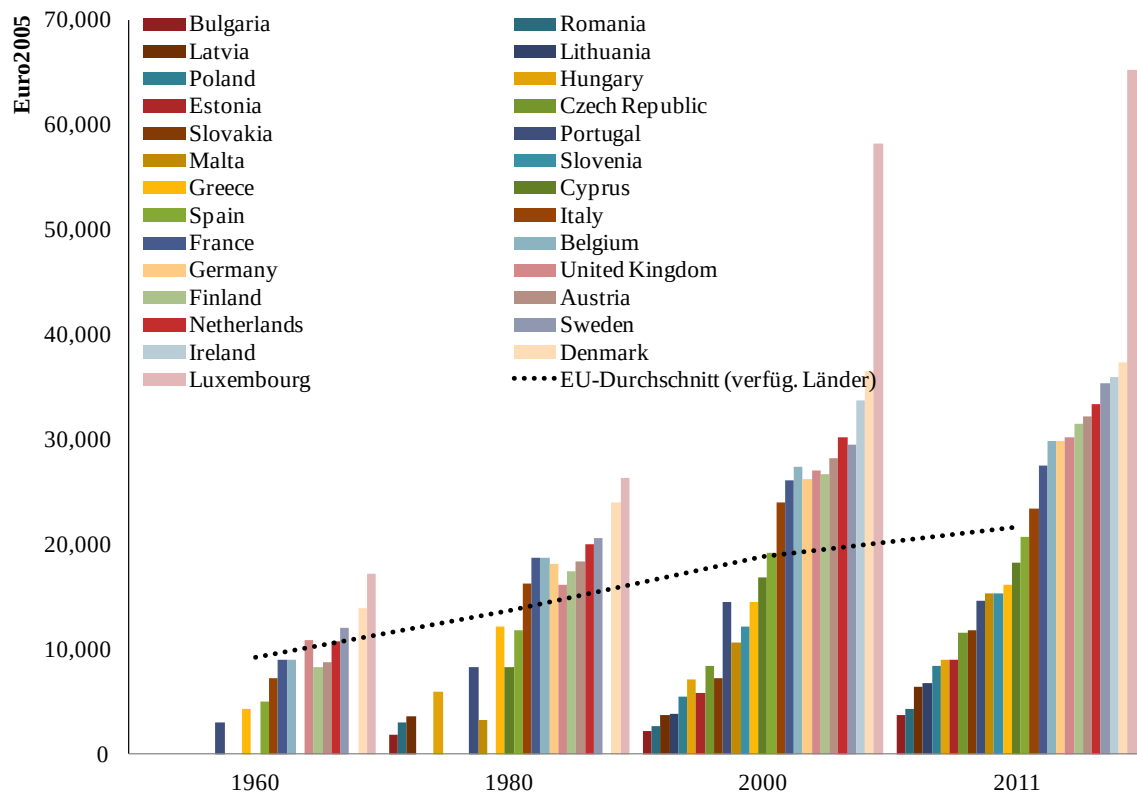
Europa war innerhalb der letzten Dekaden - mit Ausnahme von Konjunkturzyklen, der Finanzkrise in 2009 und der darauffolgenden Eurokrise - von positivem Wirtschaftswachstum, kombiniert mit schwächer steigenden bzw. in der jüngsten Vergangenheit (bis 2011) auch stagnierenden und fallweise rückläufigen (z.B. in Lettland, Litauen, Ungarn) Bevölkerungszahlen geprägt. Dies hatte einen stetigen Anstieg des Bruttoinlandsproduktes pro Kopf für die meisten europäischen Länder zur Folge hatte (vgl. Abbildung 3). Jedoch halbierte sich das Wachstum des EU Durchschnitts aufgrund der Krise von rund 550⁴⁵ auf 260 Euro pro Kopf und Jahr für die beiden Jahrzehnte 1990 bis 2000 bzw. 2000 bis 2010 (vgl. Abbildung 3; The World Bank Group 2012a; 2012b, 2012d, 2012e, 2012g, 2012h, 2012j, 2012k, 2014a). Dies bedeutet eine Annäherung an das Wachstum des Durchschnitts der neuen Mitgliedsstaaten, welche von 97⁴⁶ Euro pro Kopf und Jahr auf 259 Euro pro Kopf und Jahr in denselben Zeiträumen gestiegen ist (vgl. Abbildung 3; The World Bank Group 2012a; 2012b, 2012d, 2012e, 2012g, 2012h, 2012j, 2012k, 2014a).

Wie bereits in Herbst et al. (2013) diskutiert, ist es für Energiebedarfsprojektionen wichtig, die Plausibilität der oft wenig geprüften Wachstumsraten des Bruttoinlandsproduktes als wichtigen makroökonomischen Treiber zu prüfen und an den empirischen Entwicklungen zu

⁴⁵ EU-15 ohne Irland

⁴⁶ NMS ohne Estland

messen. Häufig werden noch immer bei langfristigen Wirtschafts- und Energiebedarfsprojektionen hohe jährliche Wachstumsraten angenommen (unterstelltes exponentielles Wachstum; siehe auch Abschnitt 5.2.1), welche das in der jüngeren Vergangenheit zu beobachtende lineare Pro-Kopf-Wachstum des BIP nicht beachten (vgl. Abbildung 2: Deutschland und Abbildung 3).

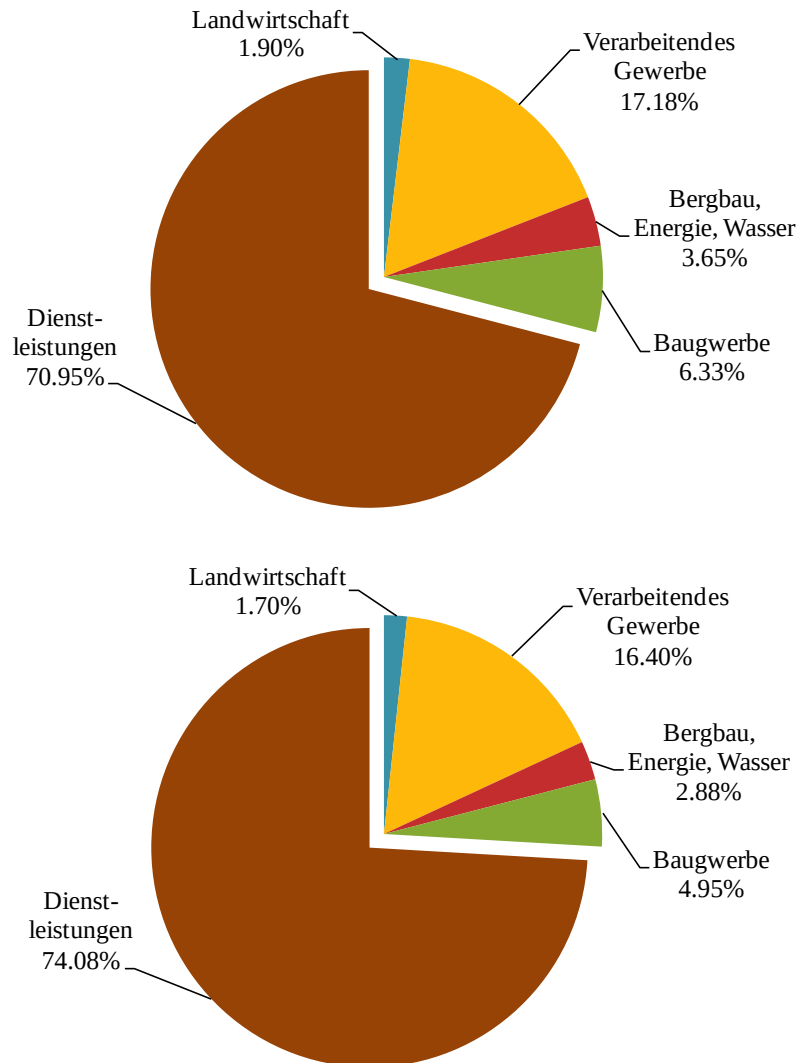


Quelle: eigene Darstellung von The World Bank Group (2012a, 2012b, 2012d, 2012e, 2012g, 2012h, 2012j, 2012k, 2014a) umgerechnet in Euro 2005 mit den Euro-Referenzkursen der EZB (Deutsche Bundesbank 2013)⁴⁷

Abbildung 3: Bruttoinlandsprodukt pro Kopf 1960, 1980, 2000, 2011 (in Euro 2005)

Auch für die neuen Mitgliedsstaaten und die Schwellen-Länder ist eine Annäherung an die westlichen Länder mit einem linearen BIP-pro-Kopf-Zuwachs ab einem Niveau von etwa 15.000 € pro Kopf wahrscheinlich (vgl. Abbildung 2 oben). Der lineare Zuwachs des BIP pro Kopf wird begleitet von einer zunehmenden De-Industrialisierung der Volkswirtschaften zugunsten des tertiären Sektors. Der Anteil des Verarbeitenden Gewerbes der EU-28 lag laut Eurostat (2015f) im Jahre 2014 bei rund 16,4%; 14 Jahre zuvor hatte er noch bei 17,2% gelegen (Abbildung 4).

⁴⁷ Je nach Verfügbarkeit passender Informationen konnte das BIP pro Kopf des World Bank-Datensatzes verwendet werden bzw. wurde das BIP pro Kopf durch Division des BIPs durch die Bevölkerung berechnet. Wo notwendig wurde eine Umrechnung in Euro 2005 durchgeführt.



Quelle: Eurostat (2015f)

Abbildung 4: Struktur der Wirtschaft EU-28 für das Jahr 2000 (oben) und 2014 (unten)

In den typischen Energiebedarfsprojektionen werden häufig zwischen etwa 9 und 14 Industriebranchen unterschieden (vgl. Tabelle 4), wobei energieintensive Branchen einzeln und die übrigen, weniger energieintensiven Branchen der Investitionsgüter, Gebrauchsgüter und Verbrauchsgüter oft in Gruppierungen zusammengefasst werden. In aller Regel haben die energieintensiven Grundstoffindustrien ein unterdurchschnittliches Wachstum gemessen an der Wachstumsrate des Verarbeitenden Gewerbes. Eine Ausnahme bildet die chemische Industrie, solange die Grundstoffchemie nicht von den anderen Sparten der chemischen Industrie getrennt ausgewiesen wird. Auch gibt es in den anderen Industriegruppen unterdurchschnittliches Wachstum, z.B. wegen Auslagerung der Produktion nach Asien (z.B. die Textil- und Bekleidungs- oder die Spielwarenindustrie).

Dieser interindustrielle Strukturwandel führt – je nach BIP-pro-Kopf-Niveau und speziellen nationalen Gegebenheiten einzelner EU-Länder - seit einigen/wenigen Jahrzehnten tendenziell zu einer geringeren Energieintensität des Verarbeitenden Gewerbes.

Herbst et al. (2013) haben die Endenergieintensitäten für sieben Branchen des Verarbeiteten Gewerbes in Frankreich, Deutschland und Italien zwischen 2000 und 2010 verglichen und gezeigt, dass die stärkste Reduktion der Energieintensität bei den Gebrauchs- und Konsumgütern stattgefunden hat. Die Entwicklungen der anderen Sektoren gestalten sich jedoch zwischen den Ländern unterschiedlich. Während in Deutschland die Energieintensitäten aller verbleibenden Sektoren zwischen den Jahren 2000 und 2010 einen Zuwachs (z.B. durch mehr Automatisierung, suboptimale Auslastung von Produktionskapazitäten nach der Wirtschaftskrise, etc.) verzeichneten, so kam es in Frankreich zu einem starken Rückgang der Energieintensität in den Sektoren Metallprodukte und Papier-, Druck- und Verlagsgewerbe. (Herbst et al. 2013)

4.2 Methodisches Vorgehen und Daten

Im nachfolgenden Abschnitt wird, basierend auf Studien und ökonometrischen Ansätzen von Haraguchi und Rezonja (2010a, 2010b, 2011), eine Methode vorgestellt, welche die Entwicklung des Anteils der Industrie (nur Verarbeitendes Gewerbe) an der gesamten Bruttowertschöpfung eines Landes für die EU-27 beschreibt. Die vorgestellte Methodik zur Projektion der industriellen Entwicklung innerhalb der Europäischen Union stellt jedoch keinen Ersatz zu der Nutzung eines makroökonomischen Modells und dessen konsistenten Wirtschaftsentwicklungsprojektionen dar. Die Simulationsgleichungen wurden lediglich entwickelt, um eine methodisch empirisch fundierte Alternative zu meist nicht dokumentierten (Experten-) Schätzungen der Sektorentwicklungen zu liefern (allgemeine Problematik dieser Schätzungen wurde bereits in Herbst et al. (2013) diskutiert).

Analog dazu wurde versucht einen Ansatz zur Projektion der industriellen Branchenentwicklung herzuleiten, welcher nur in der kritischen Diskussion dieses Kapitels erörtert wird, da er für die praktische Nutzung nicht empfohlen werden konnte (auf Anfrage können die Ergebnisse dieser Analysen vom Autor zur Verfügung gestellt werden).

Da es sich bei dem verwendeten Ansatz um ein komplexes Methodenfeld, der Analyse von Paneldaten handelt, können vereinzelte methodische Schwächen nicht zur Gänze ausgeschlossen werden, dennoch wurde versucht, die wichtigsten Aspekte der Analyse in diesem und den folgenden Abschnitten zu berücksichtigen (z.B. durch Prüfung der Modellqualität). Teile der nachfolgenden Vorgehensweise zur Analyse der Methodik wurden in Anlehnung an die Strukturierung von Murphy (2013, 88ff) durchgeführt.

4.2.1 Verwendete ökonometrische Methoden

Die erforderlichen Gleichungen wurden unter der Verwendung ökonometrischer Methoden ermittelt. Hierbei konnte zwischen Zeitreihenanalyse und Panel-Ökonometrie gewählt werden. Im nachfolgenden wurde ein einfacher Makro-Panel-Ansatz für die Europäische Union verfolgt. Die Verwendung von Paneldaten zur Modellierung der Entwicklung des gesamten Industriesektors hat unter anderem den Vorteil, dass länderspezifische Unterschiede besser berücksichtigt werden können als in der Zeitreihenanalyse, auch wenn die Gründe zu derartigen Unterschieden nicht genau bekannt sind (z.B. traditionelle Stärken aufgrund von technischen Hochschulen, innovativen Familien-Unternehmen, Kfz-Unternehmen; früherer Steinkohlebergbau, geringeres Lohnniveau in den neuen EU-Mitgliedsländern, etc.) (Baltagi 2013, S. 6; Torres-Reyna 2013). Des Weiteren stellt Multikollinearität laut Baltagi (2013, S. 7) bei Paneldaten ein geringeres Problem als in der Zeitreihenanalyse dar, da durch die Betrachtung der verschiedenen Länder in einem Panel zusätzliche Information genutzt wird, welche die Parameterschätzung, unter der Voraussetzung verbessern kann, dass die Daten zusammenfassbar sind. Eine weit verbreitete Schwierigkeit der Makro-Panel-Ökonometrie sind, wie nachfolgend noch gezeigt, Querschnittsabhängigkeiten in den Daten (Baltagi 2013, S. 10). Für eine ausführliche Diskussion siehe Baltagi (2013, S. 6–11).

Das theoretische Gerüst dieser relativ einfachen Simulationsgleichungen basiert auf zwei Säulen:

- Einerseits der Entwicklung der **Systemgrenze** durch die bereits in Abschnitt 1.3.1 diskutierte erhebliche Beschränkung der verfügbaren makroökonomischen Information auf Wirtschaftswachstum (Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes) und Bevölkerungsentwicklung. Grund für diese Begrenzung der Treiber des industriellen Energiebedarfs ist, dass in der Praxis den Modellierern meist keine zusätzlichen Informationen zur Entwicklung des Verarbeitenden Gewerbes und seiner strukturellen Entwicklung zur Verfügung gestellt werden. So soll die hier abgeleitete Modellgleichung eine Unterstützung für die Modellierer gerade in diesem besonderen Fall sein, ohne jedoch die Modellierer (mit oft lediglich technologischem oder naturwissenschaftlichem Hintergrund) damit zu überfordern, weitere - eventuell noch komplexere - makroökonomische Parameter zu beachten.
- Andererseits auf dem **theoretisch-methodischen Konzept**, welches auf Arbeiten von Haraguchi und Rezonja (2010a, 2010b, 2011) aufbaut (erklärt in nachfolgendem Absatz). In drei Studien untersuchen Haraguchi und Rezonja (2010a, 2010b, 2011) Muster in der Entwicklung des Verarbeitenden Gewerbes für mehr als 85 Länder und einen Zeithorizont von 42 Jahren mit verschiedenen ökonometrischen Modellen/Methoden.

Das im folgenden Abschnitt vorgestellte theoretisch-methodische Konzept dieser Arbeit basiert auf zwei Gleichungen zur Analyse der Struktur des Verarbeitenden Gewerbes von Haraguchi und Rezonja (2010a, S. 10), welche von diesen wie folgt dargestellt für die unterschiedlichen Industriebranchen (basierend auf empirischer branchenspezifischer Information) definiert und analysiert wurden:

$$\ln VASHARE_{it} = \alpha_1 + \alpha_2 * \ln RGDPL_{it} + \alpha_3 * \ln RGDPL_{it}^2 + \alpha_4 * \ln POPD_{it} + \alpha * \ln RPC_{it} + countrydummy_{ies} + e_{it}^d \quad (i)$$

$$\ln VASHARE_{it} = \alpha_1 + \alpha_2 * \ln RGDPL_{it} + \alpha_3 * \ln RGDPL_{it}^2 + \alpha_4 * \ln POPD_{it} + \alpha_5 * \ln POPD_{it}^2 + \alpha_6 * \ln RPC_{it} + \alpha_7 * \ln RPC_{it}^2 + countrydummies + e_{it}^d \quad (ii)$$

Haraguchi und Rezonja (2010a, S. 10) erklären die abhängige Variable den Logarithmus ($\ln$) des $VASHARE$, Anteil der Bruttowertschöpfung des jeweiligen Subsektors (i) des Verarbeitenden Gewerbes am Bruttoinlandsprodukt, durch den Logarithmus ($\ln$)

- des BIP pro Kopf ($RGDPL$), BIP pro Kopf zum Quadrat ($RGDPL^2$)
- die Bevölkerungsdichte ($POPD$), Bevölkerungsdichte zum Quadrat ($POPD^2$)
- die Ressourcenausstattung pro Kopf (RPC), Ressourcenausstattung pro Kopf zum Quadrat (RPC^2) und
- Länder-Dummies ($countrydummy^{48}$ s) der betrachteten Nationen sowie einem Fehlerterm (e). (Haraguchi und Rezonja 2010a, S. 10–12)

4.2.1.1 Methode für den gesamten Sektor Verarbeitendes Gewerbe

Zur Entwicklung des theoretischen Konzepts für die Entwicklung des Verarbeitenden Gewerbes als Aggregat⁴⁹ wurden - basierend auf den zuvor gezeigten Gleichungen von Haraguchi und Rezonja (2010a, S. 10) - sehr vereinfachte vorläufige lineare Simulationsansätze betrachtet. Diese Vereinfachungen sind den Systemgrenzen des Modells und der Zielsetzung geschuldet, dass ein Nutzer mit den gewählten wenigen erklärenden Variablen die strukturellen Entwicklungen von Wirtschaft und Verarbeitendem Gewerbe für ein bis zwei Jahrzehnte transparent projizieren kann.

⁴⁸ Länder-Dummies werden eingesetzt um länderspezifische Effekte (z.B. kulturelle Gepflogenheiten, etc.) in der Regression abzufangen (vgl. Haraguchi und Rezonja 2010a, S. 12–13; Haraguchi und Rezonja 2011, S. 6–7). Dabei werden dem Panel-Datensatz Länder-Dummies hinzugefügt, welche z.B. entweder den Wert „null“ oder „eins“ annehmen können. So ist z.B. im Fall des Datensatzes für Österreich der Länder-Dummy Österreich gleich „eins“, der Länder-Dummy Belgien und aller anderen Länder gleich „null“. Dies verhält sich analog für alle weiteren Länder. Die Koeffizienten der Länder-Dummies werden dann im Regressionsmodell geschätzt.

⁴⁹ Für die Entwicklung der einzelnen Subsektoren/Branchen des Verarbeitenden Gewerbes wurden ebenfalls Panel-Daten basierte Schätzungen durchgeführt, welche jedoch nicht zu den gewünschten Ergebnissen führten. Dies kann in Abschnitt 4.3.2 nachgelesen werden.

Die getesteten, vereinfachten, theoretischen linearen Simulationsgleichungen wurden wie folgt für die abhängige Variable in diesen Gleichungen als der Anteil der Bruttowertschöpfung des gesamten Verarbeitenden Gewerbes (Summe der Bruttowertschöpfung aller Subsektoren) an der gesamten Bruttowertschöpfung des betrachteten Landes (*BWSAnteilVG*) über alle Länder (Panel-Daten-Ansatz) mit $i = 1, \dots, N$ (Anzahl der Länder) und $t = 1, \dots, T_i$ (Anzahl der Jahre) formuliert:

$$\begin{aligned} BWSAnteilVG_{i(t)} = \\ \beta_1 + \beta_2 * BIPpK_{i(t)} + \beta_3 * BIPWe_{i(t)}[+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \end{aligned} \quad (I)$$

$$\begin{aligned} BWSAnteilVG_{i(t)} = \\ \beta_1 + \beta_2 * BIP_{i(t)} + \beta_3 * BEV_{i(t)} + \beta_4 * BIPWe_{i(t)}[+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \end{aligned} \quad (II)$$

Die erklärenden Variablen sind

- das reale Bruttoinlandsprodukt pro Kopf (*BIPpK*) und
- das reale Welt-Bruttoinlandsprodukt (*BIPWe*; für alle Länder gleich).
- t beschreibt eine Trendvariable welche optional in den unterschiedlichen Modellen geschätzt werden kann.
- *LD* bezeichnen Länder-, *ZD* bezeichnen Zeit-Dummies, welche optional in den unterschiedlichen Modellen geschätzt werden können.

Um eventuell den Erklärungsgehalt von Gleichung (I) zu erhöhen wurde auch eine weitere Gleichung (II) geschätzt, in welcher das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf durch das Bruttoinlandsprodukt (BIP) und die Bevölkerung (BEV) ersetzt wurden. Des Weiteren wurden Modelle unter Berücksichtigung einer zeitlich verzögerten Wirkung (time-lag 1) geschätzt (Gleichungen III und IV).

$$\begin{aligned} BWSAnteilVG_{i(t)} = \\ \beta_1 + \beta_2 * BIPpK_{i(t-1)} + \beta_3 * BIPWe_{i(t-1)}[+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \end{aligned} \quad (III)$$

$$\begin{aligned} BWSAnteilVG_{i(t)} = \\ \beta_1 + \beta_2 * BIP_{i(t-1)} + \beta_3 * BEV_{i(t-1)} + \beta_4 * BIPWe_{i(t-1)}[+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \end{aligned} \quad (IV)$$

Um die Elastizitäten zwischen der abhängigen und den unabhängigen Variablen zu schätzen, und eventuelle Spezifikationsprobleme zu umgehen, wurden Gleichungen (I) bis (IV) transformiert und noch einmal mit der Anwendung eines beidseitigen Logarithmus geschätzt (Gleichungen V bis VIII):

$$\ln BWS_{AnteilVG_{i(t)}} = \beta_1 + \beta_2 * \ln BIP_{pK_{i(t)}} + \beta_3 * \ln BIP_{We_{i(t)}} [+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \quad (V)$$

$$\ln BWS_{AnteilVG_{i(t)}} = \beta_1 + \beta_2 * \ln BIP_{pK_{i(t-1)}} + \beta_3 * \ln BIP_{We_{i(t-1)}} [+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \quad (VI)$$

$$\ln BWS_{AnteilVG_{i(t)}} = \beta_1 + \beta_2 * \ln BIP_{i(t)} + \beta_3 * \ln BEV_{i(t)} + \beta_4 * \ln BIP_{We_{i(t)}} [+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \quad (VII)$$

$$\ln BWS_{AnteilVG_{i(t)}} = \beta_1 + \beta_2 * \ln BIP_{i(t-1)} + \beta_3 * \ln BEV_{i(t-1)} + \beta_4 * \ln BIP_{We_{i(t-1)}} [+t][+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \quad (VIII)$$

Wie auch bei Haraguchi und Rezonja (2010a, S. 10–13) werden länderspezifische Effekte, welche die Entwicklung des *BWSAnteilVG* beeinflussen, erwartet. Durch die optionale Nutzung von Länder-Dummies (*LD*) in den Modellen soll diesem Aspekt Rechnung getragen werden. Um auch eventuelle Zeit-fixe-Effekte nicht zu vernachlässigen, wurden auch optionale Zeit-Dummies (*ZD*) eingeführt.

Die erwarteten Zusammenhänge zwischen der abhängigen und der erklärenden Variable werden in Tabelle 6, in Anlehnung an das Vorgehen in Murphy (2013, S. 96–97), erläutert.

Tabelle 6: Erwartete Zusammenhänge gesamtes Verarbeitendes Gewerbe

Variable	Zusammenhang	Begründung
Bruttoinlandsprodukt pro Kopf (<i>BIPpK</i>)	negativ	Es wird erwartet, dass steigendes BIP pro Kopf, und folglich steigendes Einkommen, in entwickelten Ökonomien in Europa den Trend zur Dienstleistungsgesellschaft und folglich einer De-Industrialisierung der Wirtschaft begünstigt (wie in Abschnitt 4.1 gezeigt). Denn ein nicht unerheblicher Teil entsteht aus der Kommerzialisierung der Arbeiten in privaten Haushalten zu marktgängigen Dienstleistungen, weiterer Informations- und Kommunikations-Dienstleistungen oder durch weiteren Aufwuchs des Bildungs- und Gesundheitssektors. Auch für die neuen Mitgliedsländer, sollte sich eine Verlagerung zu mehr wirtschaftlicher Aktivität im tertiären Sektor (nach der die Industrie unterstützenden Planwirtschaft im Kommunismus) mit steigenden BIP pro Kopf abzeichnen.
Bruttoinlandsprodukt (<i>BIP</i>)	negativ	Es wird erwartet, dass weiteres Wirtschaftswachstum bei moderatem Bevölkerungszuwachs durch weitere Arbeitsproduktivitätsfortschritte in der gesamten Wirtschaft höheren Wohlstand nach sich zieht, was (analog zur Argumentation für den Zusammenhang des BIP pro Kopf) eine De-Industrialisierung zur Folge haben kann, zumal die Arbeitsproduktivitätsfortschritte im Verarbeitenden Gewerbe größer sind als im Dienstleistungssektor.
Bevölkerung (<i>BEV</i>)	negativ	Lt. Haraguchi und Rezonja (2010b, S. 20) Näherungsgröße für die Größe eines Landes mit negativem Vorzeichen (nicht immer signifikant).
Bruttoinlandsprodukt Welt (<i>BIPWe</i>)	positiv oder negativ	Es wird erwartet, dass eine wachsende Weltwirtschaft einher geht mit einem Anstieg der globalen Nachfrage (z.B. nach Konsum- und Investitionsgütern, qualitativ höherwertigen Halberzeugnissen, etc.) und einen Anstieg der Handelsaktivität der europäischen Union verursachen dürfte. Zum Beispiel könnten durch steigende Exporte höherwertiger Produkte die Nettoexporte ansteigen, folglich könnte die industrielle Aktivität als Wertschöpfung zunehmen, was einen Anstieg des Anteils des Industriesektors an der gesamten Wirtschaftsleistung eines Landes zur Folge haben könnte. Wenn aber die Wachstumskräfte in den Dienstleistungssektoren noch deutlicher ausfallen (siehe oben), könnte der Anteil des Industriesektors dennoch stagnieren oder sogar abnehmen.

Die Korrelationskoeffizienten der abhängigen und unabhängigen Variablen (Tabelle 7⁵⁰) bestätigen nicht alle der vermuteten Zusammenhänge aus Tabelle 6, wie anhand niedriger Korrelationskoeffizienten und divergierender Vorzeichen festgestellt werden kann. Dies kann sich jedoch auf Länderebene etwas differenzierter verhalten (vgl. Tabelle 8⁵¹). Das Beispiel Deutschland zeigt eine hohe Korrelation zwischen der abhängigen und den erklärenden Variablen mit den erwarteten Vorzeichen (Ausnahme *BIPWe*). Die hohen Korrelationskoeffizien-

⁵⁰ Vorgehen in Anlehnung an Murphy 2013, S. 107.

⁵¹ Vorgehen in Anlehnung an Murphy 2013, S. 107.

ten unter den unabhängigen Variablen für Deutschland könnten jedoch auf Schwierigkeiten mit Multikollinearität hindeuten⁵². Wie jedoch bei Baltagi (2013, S. 7) erwähnt, könnten durch die höhere Anzahl der Beobachtungen in der Paneldaten-Analyse Probleme mit Multikollinearität gesenkt werden (wie in Tabelle 7 ersichtlich). Die verschiedenen Aspekte der Modellqualität werden im Abschnitt 4.3.1 noch näher betrachtet.

Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten Verarbeitendes Gewerbe: gesamter Datensatz

	<i>BWS Anteil VG</i>	<i>BIPpK</i>	<i>BIP</i>	<i>BEV</i>	<i>BIPWe</i>
<i>BWS Anteil VG</i>	1				
<i>BIPpK</i>	-0,1431	1			
<i>BIP</i>	0,1703	0,2404	1		
<i>BEV</i>	0,1812	0,0688	0,9381	1	
<i>BIPWe</i>	-0,0096	0,2786	0,0972	0,0296	1

Quelle: berechnet mit Stata 11

Tabelle 8: Korrelationskoeffizienten Verarbeitendes Gewerbe: Deutschland

	<i>BWS Anteil VG</i>	<i>BIPpK</i>	<i>BIP</i>	<i>BEV</i>	<i>BIPWe</i>
<i>BWS Anteil VG</i>	1				
<i>BIPpK</i>	-0,9425	1			
<i>BIP</i>	-0,9482	0,9985	1		
<i>BEV</i>	-0,8956	0,8764	0,9014	1	
<i>BIPWe</i>	-0,9189	0,9827	0,9854	0,8854	1

Quelle: berechnet mit Stata 11

⁵² BIP pro Kopf wird jedoch in der Praxis dieser Analyse nie gemeinsam mit BIP und Bevölkerung regressiert, die Probleme zwischen BIP pro Kopf und BIP-Welt sind jedoch sehr wohl Praxis relevant.

4.2.2 Daten

Grundlage für die empirischen Schätzungen der sektoralen (und subsektoralen⁵³) Anteilsentwicklung des Verarbeitenden Gewerbes bildet die EUKLEMS database (2013), aus der Datensätze für 23 Länder⁵⁴ mit einem Zeithorizont von meist 27 Jahren (1970-2007) für die Länder der EU-15 bzw. von meist 12 Jahren (1995-2007) für die neuen Mitgliedsstaaten genutzt wurden. Die vorhandenen Datensätze für Malta und Zypern wurden, aufgrund deren höheren Industriebranchen-Aggregationsgrad, nicht verwendet. Die Nutzung eines Datensatzes, welcher „nur“ bis zum Jahr 2007 reichte, macht Sinn, weil dadurch die verzerrenden Einflüsse zweier „Schocks“ (Wirtschaftskrise und Eurokrise) der jüngsten Vergangenheit die Ergebnisse der ökonometrischen Analyse nicht beeinflussen. Die Wertschöpfungsentwicklung der Subsektoren und des Sektors Verarbeitendes Gewerbe (durch Bildung der Summe der Subsektoren) wurden von EUKLEMS database (2013) in Euro zu jeweiligen Herstellungspreisen für die Länder der europäischen Währungsunion angegeben bzw. in lokaler Währung zu jeweiligen Herstellungspreisen für Länder außerhalb der europäischen Währungsunion. Zusätzlich dazu wurden Preisindizes für das Basisjahr 1995 der jeweiligen Wirtschaftssektoren und Branchen angegeben.

Da die Qualität dieser Branchenpreisindizes jedoch mit höherem Disaggregationsgrad des Sektors abnimmt, wurde für die Umrechnung in reale Werte sowohl auf Sektor- als auch auf Subsektor-Ebene auf den Preisindex für das gesamte Verarbeitende Gewerbe zurückgegriffen. Dies führt zu geringfügigen Ungenauigkeiten, welche jedoch im Vergleich zu dem Qualitätsverlust durch die Nutzung der detaillierten Information für ausgewählte Sektoren aus Sicht des Autors vertretbar sind. Um nun die nominalen Werte in reale Werte mit dem Basisjahr 2005 umzurechnen, wurde zuerst der Preisindex des jeweiligen Landes auf das Jahr 2005 umgerechnet und dann die realen Werte mit der Preisbasis 2005 berechnet. Für die Länder außerhalb der europäischen Währungsunion wurde zusätzlich eine Umrechnung in Euro mit Hilfe von durchschnittlichen Euro-Referenzkursen für das Jahr 2005 (Deutsche Bundesbank 2013) durchgeführt.

Werte zur Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes, der Bevölkerung, des Bruttoinlandsproduktes pro Kopf und der Bevölkerungsdichte stammen aus der Datenbasis der Welt Bank bzw. deren „*World Development Indicators*“ The World Bank Group (2012a, 2012b, 2012c, 2012d, 2012e, 2012f, 2012g, 2012h, 2012i, 2012j, 2012l, 2012k, 2014a, 2014b, 2014c). Entsprechend der Länge der Bruttowertschöpfungsdatenreihen wurden hier die Werte für die

⁵³ Subsektorale Regressionsergebnisse wie in Abschnitt 4.3.2 diskutiert, wurden in dieser Arbeit aufgrund deren geringen Qualität nicht explizit dargestellt.

⁵⁴ Österreich, Belgien, Frankreich, Dänemark, Deutschland, Ungarn, Irland, Italien, Großbritannien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Niederlande, Finnland, Estland, Polen, Portugal, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Griechenland.

Jahre 1970-2007⁵⁵ für die entsprechenden Länder extrahiert. Die Niederlande, gefolgt von Großbritannien, Deutschland und Italien haben die höchste Bevölkerungsdichte unter den betrachteten Ländern. Hierbei handelt es sich sowohl um Länder mit ausgeprägten sekundären (Deutschland) als auch ausgeprägtem tertiärem (Großbritannien) Sektor. Dies unterstützt die zuvor getroffene Vermutung, dass die Bevölkerungsdichte innerhalb der Europäischen Union nicht maßgeblich ausschlaggebend für die Entwicklung des Verarbeitenden Gewerbes ist.

Die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes Welt (1970 – 2007) wurde aus der Datenbasis der United Nations (2013) extrahiert und ebenfalls mit den Wechselkurs der Deutsche Bundesbank (2013) in Euro 2005 umgerechnet.

Tabelle 9: Verwendete Datenquellen

Variable	Anzahl der Beobachtungen	Bemerkung	Quelle
Euro-Referenzkurse	-	Referenzkurs der EZB für das Jahr 2005	Deutsche Bundesbank (2013)
Bruttowertschöpfung des Sektors Verarbeitendes Gewerbe	675	Euro 2005	EUKLEMS database (2013)
Bruttoinlandsprodukt pro Kopf	725	Euro 2005	The World Bank Group (2012a, 2012b, 2012d, 2012e, 2012g, 2012h, 2012j, 2012k, 2014a)
Bruttoinlandsprodukt	725	Euro 2005	The World Bank Group (2012a, 2012d, 2012g, 2012j, 2014a)
Bevölkerung	874	Personen	The World Bank Group (2012b, 2012e, 2012h, 2012k, 2014b)
Welt-Bruttoinlandsprodukt	874	Euro 2005; für jedes Land gleich	United Nations (2013)

⁵⁵ Vereinzelt Datenreihen kürzer, z.B. ausgewählte neue Mitgliedsstaaten.

4.3 Ergebnisse Verarbeitendes Gewerbe gesamt

Die Modelle (a) bis (x) in Tabelle 10 entsprechen den zuvor beschriebenen methodischen Gleichungen (I), (III), (V) und (VI), berücksichtigen jedoch in unterschiedlichen Ausprägungen Länder- und Zeit-Dummies als auch eine Trendvariable. Analog gilt dies für die Modelle (1) bis (24) in Tabelle 11, und die methodischen Gleichungen (II), (IV), (VII) und (VIII). Es handelt sich hierbei um gepoolte Regressionen in den zuvor genannten verschiedenen Ausprägungen. Eine einfache Schätzung der Gleichungen zeigt, dass das adjustierte Bestimmtheitsmaß der Modelle (R^2) (vgl. Tabelle 10 und Tabelle 11) ohne die Berücksichtigung von Länder-Dummies nur sehr gering ist. Somit lässt sich analog zu Haraguchi und Rezonja (2010a, S. 13) vermuten, dass länderspezifische Unterschiede eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des industriellen Sektors in der Europäischen Union spielen (z.B. die Bedeutung der petrochemischen Standorte an großen Häfen (Rotterdam, Antwerpen) oder großen Flüssen (Ludwigshafen, Leverkusen) oder der Stahlwerke in Steinkohlegebieten Europas). Auch die zusätzliche Einführung von Zeit-Dummies bringt nur eine sehr geringe Erhöhung des Bestimmtheitsmaß, woraus sich schließen lässt, dass zeitspezifische Effekte weniger relevant sind als standortgebundene Gegebenheiten.

Betrachtet man die Modelle im Detail so erkennt man, für die Modelle (a) bis (l) den erwarteten negativen Zusammenhang des BIP pro Kopfs bzw. den erwarteten positiven Zusammenhang des BIP Welt mit dem Anteil des Verarbeitenden Gewerbes an der gesamten Bruttowertschöpfung. Letzteres ist jedoch nur in Kombination mit einer zusätzlichen Trendvariable signifikant (Tabelle 10). Die Ergebnisse der beidseitig logarithmierten Gleichungen (Tabelle 10: Modelle (m) bis (x)) sind weniger eindeutig. Die geringeren Signifikanzniveaus und wechselnden Vorzeichen der erklärenden Variablen sprechen gegen die weitere Verwendung dieser Modelle. Zusätzlich dazu ist das adjustierte Bestimmtheitsmaß (R^2) in den nicht logarithmierten Modellen höher als in den doppelseitig logarithmierten. Ausgewählt nach den Kriterien: erwarteter kausaler Zusammenhang, Bestimmtheitsmaß und Signifikanz der erklärenden Variablen kommen als potentielle „beste Modelle“ (basierend auf den Gleichungen (I), (III), (V), (VI)) die Modelle (f), (k) und (l) in Frage. Zu bemerken ist, dass für die Modelle (a) bis (l) keine F-Statistik berechnet werden konnten (dies lag an der Option „robust“, welche in STATA gewählt wurde (StataCorp. 2016b) – ohne diese Option wären F-Statistiken berechnet worden), da der Erklärungsgehalt (R^2) jedoch von Null hinreichend verschieden ist, wird dies als nicht ausreichend gravierend empfunden, um die Modelle (f), (k) und (l) sofort zu verwerfen. Die Modelle könnten auch ohne die Option „robust“ geschätzt werden, wären dann jedoch anfällig gegenüber Heteroskedastizität, weshalb diese Variante der Modelle ausgeschlossen werden musste. Die Koeffizienten der erklärenden Variablen und das R^2 sind aber in beiden Schätzvarianten diesselben. Nur Gütekriterien wie z.B. Standardfehler, p-Werte und F-Werte unterscheiden sich in den beiden Fällen. Die Modelle (1) bis

(12) bestätigen den negativen Zusammenhang des Bruttoinlandsproduktes mit dem Anteil des Verarbeitenden Gewerbes an der gesamten Bruttowertschöpfung (Tabelle 11). Für die weiteren erklärenden Variablen sind die Ergebnisse jedoch nicht eindeutig und von wechselnden Vorzeichen und Signifikanzniveaus gekennzeichnet (vgl. Tabelle 11). Analoge Beobachtungen konnten für die doppelseitig logarithmierten Modelle (13) bis (24) gemacht werden (bei niedrigerem Signifikanzniveau für das BIP). Zusätzlich dazu ist das adjustierte Bestimmtheitsmaß der Modelle (1) bis (24) nur gering höher als in den Modellen (a) bis (x).

Aus dieser ersten Analyse lässt sich schließen, dass (f), (k) und (l) die geeigneten Modelle als Ausgangsbasis für die Verhaltensgleichungen zu Projektion der Wertschöpfungsentwicklung des gesamten Verarbeitenden Gewerbes sein dürften. Die Vorzeichen entsprechen den Erwartungen, die unabhängigen Variablen haben ein hohes Signifikanzniveau, das R^2 ist relativ hoch. Um jedoch valide Aussagen über die Qualität der Regressionen treffen zu können, muss eine Reihe weitere Tests durchgeführt werden. Die Tests und deren Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert

Tabelle 10: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichung I, III, V, VI)

<i>BWSAnteilVG</i>	Modell a	Modell b	Modell c	Modell d	Modell e	Modell f	Modell e	Modell h	Modell i	Modell j	Modell k	Modell l
BIP pro Kopf	-6,161e-07***	-6,164e-07***	-1,750e-06***	-1,588e-06***	-1,582e-06***	-1,588e-06***						
BIP Welt	4,091e-17	6,142e-15***	2,107e-16	3,403e-16	4,772e-15***	6,092e-15***						
BIP pro Kopf (t-1)							-6,859e-07***	-6,904e-07***	-1,701e-06***	-1,511e-06***	-1,551e-06***	-1,511e-06***
BIP Welt (t-1)							5,742e-17	6,976e-15***	1,765e-16	4,125e-16	5,246e-15***	5,206e-15**
Trend		- 0,00439554 ***			- 0,00336341 ***	- 0,00429317 ***		- 0,00485654 ***			- 0,00362563 ***	- 0,00347155 **
Länder-Dummies	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeit-Dummies	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
Konstante	0,18598632 ***	0,12651628 ***	0,41173286 ***	0,40855882 ***	0,36014028 ***	0,34211918 ***	0,18611805 ***	0,12168863 ***	0,41001156 ***	0,40109264 ***	0,35538112 ***	0,34908435 ***
R ²	0,02054329	0,04636328	0,73208057	0,75139199	0,7469563	0,75139199	0,02522623	0,05119134	0,73890988	0,75859469	0,75314056	0,75859469
Root MSE	0,04266163	0,04212839	0,02270485	0,02253531	0,02208334	0,02253531	0,04181476	0,04128708	0,02203137	0,0218264	0,02144031	0,0218264
F-Wert ⁵⁶	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Anzahl Beobachtungen	645	645	645	645	645	645	629	629	629	629	629	629

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

⁵⁶ Keine Angabe durch die Nutzung der Option „robust“ in StataCorp. 2009. Bei Abwahl dieser Option wird F-Statistik berechnet. Dies gilt auch für alle nachfolgenden Tabellen.

Tabelle 10: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichung I, III, V, VI) (Fortsetzung)

BWSAnteilVG	Modell m	Modell n	Modell o	Modell p	Modell q	Modell r	Modell s	Modell t	Modell u	Modell v	Modell w	Modell x
ln BIP pro Kopf	- 0,04770138 ***	- 0,04923076 ***	0,03016354	-0,07946545	0,02040762	-0,07946545						
ln BIP Welt	- 0,05342562 *	0,32352995	- 0,17671422 ***	-0,05249126	0,52286037	(entfallen)						
ln BIP pro Kopf (t-1)							- 0,05014864 ***	- 0,04993673 ***	0,00080488	-0,10576163	-0,00157551	-0,10576163
ln BIP Welt (t-1)							- 0,05561364 *	-0,10886313	- 0,15629873 **	-0,02375429	0,11445899	(entfallen)
Trend		-0,01131022			- 0,02086711 **	-0,00167027		0,00159345			-0,00808625	-0,00075079
Länder-Dummies	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeit-Dummies	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
Konstante	0,33974304	-11,014814	4,1533553* **	1,4571603	-16,846297	-0,12327783	0,42609548	2,0285708	3,8221824* **	0,83206906	-4,3109027	0,11760635
R ²	0,02131399	0,02210834	0,67272463	0,6868648	0,6753974	0,6868648	0,02341495	0,02343104	0,68264049	0,69745845	0,68305013	0,69745845
Root MSE	0,23113256	0,23121888	0,13600904	0,13707759	0,13556189	0,13707759	0,22901932	0,22920058	0,13291119	0,13370284	0,13293548	0,13370284
F-Wert	4,50	3,11	317,04	111,45	270,50	111,45	4,87	3,32	278,35	106,96	263,24	106,96
Anzahl Beobachtungen	645	645	645	645	645	645	629	629	629	629	629	629

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

Tabelle 11: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichungen II, IV, VII, VIII)

<i>BWSAnteilVG</i>	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5	Modell 6	Modell 7	Modell 8	Modell 9	Modell 10	Modell 11	Modell 12
BIP	-3,912e-14***	-3,718e-14***	-2,624e-14***	-2,571e-14**	-2,507e-14**	-2,571e-14**						
Bevölkerung	1,227e-09***	1,189e-09***	-1,656e-09	-8,502e-10	-1,025e-09	-8,502e-10						
BIP Welt	3,427e-16	6,239e-15***	-3,116e-16	-1,749e-16	4,197e-15***	5,463e-15***						
BIP (t-1)							-4,084e-14***	-3,930e-14***	-2,696e-14***	-2,621e-14**	-2,674e-14***	-2,621e-14**
Bevölkerung (t-1)							1,262e-09***	1,233e-09***	-2,170e-09**	-1,371e-09	-1,447e-09	-1,371e-09
BIP Welt (t-1)							3,738e-16	7,085e-15***	-2,430e-16	2,083e-17	4,659e-15***	4,604e-15**
Trend		- 0,00426143 ***			- 0,00331245 ***	- 0,00420804 ***		- 0,00472215 ***			- 0,00350026 ***	- 0,00331937 **
Länder-Dummies	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeit-Dummies	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
Konstante	0,15556279 ***	0,09839352 ***	0,3750113* **	0,37433161 ***	0,3271485* **	0,30920952 ***	0,15410923 ***	0,09177337 ***	0,37415357 ***	0,36799748 ***	0,32360717 ***	0,31826915 ***
R ²	0,07587634	0,10008733	0,73019144	0,7486554	0,74446495	0,7486554	0,08186375	0,10637556	0,74035648	0,75889104	0,75344919	0,75889104
Root MSE	0,04147137	0,04095647	0,02280315	0,02267842	0,02220973	0,02267842	0,04061425	0,04010052	0,02198847	0,02183219	0,02144469	0,02183219
F-Wert	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Anzahl Beobachtungen	645	645	645	645	645	645	629	629	629	629	629	629

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

Tabelle 11: Vorbereitende Regressionen Verarbeitendes Gewerbe (Gleichungen II, IV, VII, VIII) (Fortsetzung)

BWSAnteilVG	Modell 13	Modell 14	Modell 15	Modell 16	Modell 17	Modell 18	Modell 19	Modell 20	Modell 21	Modell 22	Modell 23	Modell 24
ln BIP	- 0,04664138 ***	- 0,04768865 ***	-0,06934657	- 0,14887325 *	-0,07461697	- 0,14887325 *						
ln Bevölkerung	0,08587326 ***	0,08678804 ***	- 1,6867063* **	- 1,5507378* **	- 1,6565735* **	- 1,5507378* **						
ln BIP Welt	-0,03947291	0,21772421	0,12580784 *	0,21995354 **	0,60047669 *	(entfallen)						
ln BIP (t-1)							- 0,04967537 ***	- 0,04892174 ***	-0,10388421	- 0,17542047 **	-0,10430322	- 0,17542047 **
ln Bevölkerung (t-1)							0,09173225 ***	0,09108117 ***	- 1,6713186* **	- 1,5438543* **	- 1,6674382* **	- 1,5438543* **
ln BIP Welt (t-1)							-0,04016137	-0,22920523	0,14987859 **	0,24843475 ***	0,22015914	(entfallen)
Trend		-0,00771839			-0,01428631	0,00699893 **		0,0056581			-0,00211678	0,0078521* **
Länder-Dummies	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeit-Dummies	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
Konstante	-0,73749482	-8,4825006	22,482667* **	19,548987* **	7,8460992	26,17148** *	-0,73721465	4,9501161	22,368908* **	19,219588* **	20,203708* *	26,69181** *
R ²	0,07246417	0,07283352	0,71406955	0,72411384	0,71531405	0,72411384	0,083036	0,08323851	0,72331978	0,73409465	0,723347	0,73409465
Root MSE	0,22518698	0,22531796	0,12723067	0,1287768	0,12705616	0,1287768	0,22209583	0,22224917	0,12420374	0,12545663	0,12430058	0,12545663
F-Wert	10,09	7,59	178,73	103,85	175,32	103,85	12,08	9,61	199,08	119,28	191,07	119,28
Anzahl Beobachtungen	645	645	645	645	645	645	629	629	629	629	629	629

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

4.3.1 Modellqualität

Zusätzlich zu den bereits angesprochenen Schwierigkeiten gibt es weitere Qualitätskriterien, welche bei der Paneldatenanalyse eine wichtige Rolle spielen. Bevor Aussagen zur Nutzung der zuvor identifizierten „besten Modelle“ als weitere Projektionsbasis getroffen werden können, muss zumindest ein Minimum an weiteren Tests und Analysen, wie nachfolgend diskutiert, durchgeführt werden. Die nachfolgenden Vorgehensweise zur Analyse der Modelle wurden in Anlehnung an Torres-Reyna (2013) und Murphy (2013, 107ff) durchgeführt.

4.3.1.1 Nicht-Stationäre Reihen

Nachfolgend wurden zwei Tests auf Nicht-Stationarität, der Im-Pesaran-Shin Test (IPS) und der Fisher-type Test, durchgeführt (StataCorp. 2015b; Greene 2012, S. 1010–1011; StataCorp. 2016e; Torres-Reyna 2013). Nicht-stationäre Reihen können zu einer Überschätzung der Signifikanzniveaus der erklärenden Variablen als auch des adjustierten Bestimmtheitsmaßes führen (Murphy 2013, S. 107; Greene 2012, 982ff). Es wurden zwei Tests durchgeführt, um erstens deren Ergebnisse zu vergleichen und zweitens auch einen Test für einen unvollständigen Datensatz, bei dem nicht für jede Variable und jedes Jahr Observationen für jedes Land zur Verfügung stehen (z.B. BIP und BIP pro Kopf für die neuen Mitgliedsländer), durchzuführen (Fisher-type Test, StataCorp. 2016e).

Wie bereits erwartet, deuten die Testergebnisse in Tabelle 12 für alle Variablen auf nicht-stationäre Reihen hin. Tabelle 12 zeigt hierzu die berechneten Teststatistiken $Z_{t\sim}$ (Im-Pesaran-Shin Test) und Z (Fisher-type Test), welche mit den kritischen Werten der 1%-, 5%- und 10%-Signifikanzniveaus verglichen werden. Die zugehörigen p-Werte bestätigen mit $p > 0,05$ (5%-Signifikanzniveau) die Nullhypothese, dass sowohl bei den Originalbeobachtungen, als auch bei den, zum Logarithmus transformierten Beobachtungen, eine Einheitswurzel vorliegt (StataCorp. 2015b).

Eine Möglichkeit effizientere Schätzungen trotz nicht-stationärer Reihen zu erhalten ist die Schätzung der Regression als erste Differenzen (Greene 2012, S. 982–983). Um diese Möglichkeit zu prüfen wurden die Tests noch einmal für die ersten Zeitdifferenzen der untransformierten Variablen durchgeführt.

Tabelle 12: Test auf Nicht-Stationarität: abhängige und unabhängige Variablen

Variable	Statistik	p-Wert	
Im-Pesaran-Shin ⁵⁷			
<i>BWSAnteilVG</i>	$Z_{t\sim\sim bar}$	4,7418	1,0000
<i>BIP</i>	$Z_{t\sim\sim bar}$	18,7885	k.A.*
<i>BEV</i>	$Z_{t\sim\sim bar}$	8,2003	1,0000
<i>BIPpK</i>	$Z_{t\sim\sim bar}$	15,7296	k.A.*
<i>BIPWe</i>	$Z_{t\sim\sim bar}$	32,8961	1,0000
ln (<i>BWSAnteilVG</i>)	$Z_{t\sim\sim bar}$	4,5540	1,0000
ln (<i>BIP</i>)	$Z_{t\sim\sim bar}$	6,9568	k.A.*
ln (<i>BEV</i>)	$Z_{t\sim\sim bar}$	5,8435	1,0000
ln (<i>BIPpK</i>)	$Z_{t\sim\sim bar}$	6,4562	k.A.*
ln (<i>BIPWe</i>)	$Z_{t\sim\sim bar}$	2,6650	0,9962
Fisher ⁵⁸ [dfuller, lags(0)]			
<i>BWSAnteilVG</i>	Z	4,1404	1,0000
<i>BIP</i>	Z	10,0867	1,0000
<i>BEV</i>	Z^{59}	0,5210	0,6988
<i>BIPpK</i>	Z	9,8551	1,0000
<i>BIPWe</i>	Z	k.A.	k.A.
ln (<i>BWSAnteilVG</i>)	Z	4,2254	1,0000
ln (<i>BIP</i>)	Z	5,7838	1,0000
ln (<i>BEV</i>)	Z	-1,4149	0,0785
ln (<i>BIPpK</i>)	Z	5,4852	1,0000
ln (<i>BIPWe</i>)	Z	3,1979	0,9993

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

⁵⁷AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert

⁵⁸AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert, Drift-Term: nicht inkludiert

*) STATA „Normality of $Z_{t\sim\bar{bar}}$ requires at least 10 observations per panel with unbalanced data“ (zu wenig Observationen für ausgewählte Länder, deswegen wurde zusätzlich der Fisher-Test durchgeführt)

Tabelle 13: Test auf Nicht-Stationarität: erste Differenzen

Variable	Statistik	p-Wert	
Im-Pesaran-Shin ⁶⁰			
$\Delta BWSAnteilVG$	$Z_{t \sim \sim bar}$	11,8180	0,0000
ΔBIP	$Z_{t \sim \sim bar}$	-7,6132	k.A.*
ΔBEV	$Z_{t \sim \sim bar}$	1,6772	0.9532
$\Delta BIPpK$	$Z_{t \sim \sim bar}$	-8,5645	k.A.*
$\Delta BIPWe$	$Z_{t \sim \sim bar}$	-3,8737	0.0001
Fisher ⁶¹ [dfuller, lags(0)]			
$\Delta BWSAnteilVG$	Z	-16,8163	0,0000
ΔBIP	Z	-9,6031	0,0000
ΔBEV	Z	1,6036	0,9456
$\Delta BIPpK$	Z	-11,2449	0,0000
$\Delta BIPWe$	Z	-4,0084	0,0000

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Bis auf die Bevölkerungsentwicklung zeigen die Ergebnisse, dass keine Einheitswurzel (d.h. nicht-stationäre Reihe) mehr vorhanden ist. Dies spricht für eine Schätzung der Modelle basierend auf Gleichung (I) und (II), als erste Differenzen, welche wie folgt formuliert werden können:

$$\Delta BWSAnteilVG_{i(t)} = \beta_1 + \beta_2 * \Delta BIPpK_{i(t)} + \beta_3 * \Delta BIPWe_{i(t)}[+t][+LD + ZD] + \Delta \varepsilon_{i(t)} \quad (D.I)$$

$$\Delta BWSAnteilVG_{i(t)} = \beta_1 + \beta_2 * \Delta BIPpK_{i(t-1)} + \beta_3 * \Delta BIPWe_{i(t-1)}[+t][+LD + TD] + \Delta \varepsilon_{i(t)} \quad (D.II)$$

⁶⁰AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert

⁶¹AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert, Drift-Term: nicht inkludiert

mit

$$\Delta BWSAnteilVG_{i(t)} = BWSAnteilVG_{i(t)} - BWSAnteilVG_{i(t-1)}$$

$$\Delta BIPpK_{i(t)} = BIPpK_{i(t)} - BIPpK_{i(t-1)}$$

$$\Delta BIPWe_{i(t)} = BIPWe_{i(t)} - BIPWe_{i(t-1)}$$

$$\Delta BWSAnteilVG_{i(t-1)} = BWSAnteilVG_{i(t-1)} - BWSAnteilVG_{i(t-2)}$$

$$\Delta BIPpK_{i(t-1)} = BIPpK_{i(t-1)} - BIPpK_{i(t-2)}$$

$$\Delta BIPWe_{i(t-1)} = BIPWe_{i(t-1)} - BIPWe_{i(t-2)}$$

$$\Delta \varepsilon_{i(t)} = \varepsilon_{i(t)} - \varepsilon_{i(t-1)}$$

$$\Delta \varepsilon_{i(t-1)} = \varepsilon_{i(t-1)} - \varepsilon_{i(t-2)}$$

Wie erwartet führten die Schätzung der Gleichungen (D.I) und (D.II) zu einem erheblich gesunkenen Bestimmtheitsmaß (R^2) und niedrigeren Signifikanzniveaus (siehe ausgewählte Ergebnisse in Tabelle 14). Dennoch erscheint der Erklärungsgehalt für Modelle mit einem $R^2 > 0,2$ hinreichend unterschiedlich von Null für die weitere Analyse der geschätzten Regressionen. Überraschend war jedoch der nun mehrheitlich positive Zusammenhang des $\Delta BIPpK$ mit $\Delta BWSAnteilVG$, welcher der in Abschnitt 4.2.1.1 getroffenen Hypothese eines linearen negativen Zusammenhangs zwischen $\Delta BIPpK$ und $\Delta BWSAnteilVG$ (linearen De-Industrialisierung bei steigendem Einkommen/Wohlfahrt) den bisherigen vorläufigen Ergebnissen widerspricht.

In Anlehnung an Haraguchi und Rezonja (2010a, S. 4) wurde deshalb zusätzlich ein konkaver Zusammenhang zwischen $\Delta BWSAnteilVG$ und $\Delta BIPpK$ getestet entsprechend den nachfolgend formulierten Gleichungen (D.III) und (D.IV):

$$\Delta BWSAnteilVG_{i(t)} =$$

$$\beta_1 + \beta_2 * \Delta BIPpK_{i(t)} + \beta_3 * \Delta BIPpK_{i(t)}^2 + \beta_4 * \Delta BIPWe_{i(t)}[+t][+LD + ZD] + \Delta \varepsilon_{i(t)} \quad (D.III)$$

$$\Delta BWSAnteilVG_{i(t)} =$$

$$\beta_1 + \beta_2 * \Delta BIPpK_{i(t-1)} + \beta_3 * \Delta BIPpK_{i(t-1)}^2 + \beta_4 * \Delta BIPWe_{i(t-1)}[+t][+LD + ZD] + \Delta \varepsilon_{i(t-1)} \quad (D.IV)$$

mit

$$\Delta BWSAnteilVG_{i(t)} = BWSAnteilVG_{i(t)} - BWSAnteilVG_{i(t-1)}$$

$$\Delta BIPpK_{i(t)} = BIPpK_{i(t)} - BIPpK_{i(t-1)}$$

$$\Delta BIPWe_{i(t)} = BIPWe_{i(t)} - BIPWe_{i(t-1)}$$

$$\Delta BIPpK_{i(t-1)} = BIPpK_{i(t-1)} - BIPpK_{i(t-2)}$$

$$\Delta BIPWe_{i(t-1)} = BIPWe_{i(t-1)} - BIPWe_{i(t-2)}$$

$$\Delta \varepsilon_{i(t)} = \varepsilon_{i(t)} - \varepsilon_{i(t-1)}$$

$$\Delta \varepsilon_{i(t-1)} = \varepsilon_{i(t-1)} - \varepsilon_{i(t-2)}$$

Die Ergebnisse der signifikanteren Modelle (D8) bis (D10) bestätigen die Vermutung eines konkaven Zusammenhangs für die Länder der EU-27 (Tabelle 14). Trotz der fehlenden Signifikanz des BIP Welt erscheinen unter der Annahme eines nicht linearen Zusammenhangs die Modelle (D8) und (D9) als die „besten Modelle“ für weitere Analysen. Es liegt aufgrund der Ergebnisse nahe, sich gegen die reduzierte Form zu entscheiden, da die Inklusion von $\Delta BIPWe$ den „fit“ der Verhaltensgleichung nicht stark negativ beeinflusst und somit die Möglichkeit der Berücksichtigung eines weiteren Einflussfaktors außer dem $BIPpK$ für die Modellierer erhalten bleibt.

Tabelle 14: Ausgewählte Regressionsergebnisse Verarbeitendes Gewerbe, Differenzen (Gleichungen D.I, D.II, D.III, D.IV)

$\Delta BWS_{AnteilVG}$	Modell D1	Modell D2	Modell D3	Modell D4	Modell D5	Modell D6	Modell D7	Modell D8	Modell D9	Modell D10	Modell D11	Modell D12
ΔBIP pro Kopf	6,050e-06***	5,484e-06**	5,901e-06***	5,484e-06**				9,838e-06***	9,593e-06**	8,606e-06**		
ΔBIP pro Kopf ²								-2,265e-09*	-2,181e-09*	-1,739e-09		
ΔBIP Welt	8,904e-16	8,819e-16	2,505e-15*	4,933e-15**				1,563e-16	1,315e-15	4,199e-15		
ΔBIP pro Kopf (t-1)					-3,924e-07	-4,701e-07	2,717e-08				-1,707e-06	-1,572e-06
ΔBIP pro Kopf ² (t-1)											8,300e-10	9,460e-10
ΔBIP Welt (t-1)					2,574e-15**	3,362e-15***	1,740e-15				2,883e-15**	9,790e-16
Trend	-0,00004869		-0,00008567**	-0,00023456**		-0,00004264	-0,00005792		-0,00006004	-0,00019838*		
Länder-Dummies	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeit-Dummies	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
Konstante	-0,00906875*	-0,00841718	-0,0077305	-0,00576838	-0,0032483	-0,00248559	0,00023855	-0,00959255*	-0,00863526	-0,00709693	-0,0031622	-0,00010406
R ²	0,28050322	0,37496862	0,28779043	0,37496862	0,14753262	0,14945368	0,31183409	0,32326892	0,32678899	0,39717367	0,15324652	0,31838609
Root MSE	0,00669099	0,00642756	0,00666261	0,00642756	0,00712599	0,00712409	0,00659853	0,00649454	0,00648307	0,00631798	0,00710819	0,00657306
F-Wert	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Anzahl Beobachtungen	622	622	622	622	606	606	606	622	622	622	606	606

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

4.3.1.2 Fixed-effects oder Random-effects

Die Modelle (D8) und (D9) wurden zwar bereits unter Berücksichtigung von Länder- und Zeit-Dummies geschätzt, da man von länderspezifischen Unterschieden und eventuellen zeit-spezifischen Unterschieden ausgehen kann. Aber zur Bestätigung dieser Hypothese wurde der Hausman-Spezifikations-Test für die Modelle (D8) und (D9) durchgeführt (StataCorp. 2016a; Torres-Reyna 2013; StataCorp. 2015a). Dieser wird verwendet, um festzustellen, ob ein Modell fixen oder zufälligen Effekten unterliegt (Greene 2012, S. 419–420; StataCorp. 2015b, 2015a). Hierzu wird, wie in Tabelle 15 gezeigt, das Modell sowohl unter Berücksichtigung von fixen („fixed“) als auch zufälligen („random“) Effekten berechnet und die Ergebnisse mittels Chi-Quadrat-Statistik miteinander verglichen (Greene 2012, S. 420; StataCorp. 2015a). Die Testergebnisse $\text{Prob} > \chi^2$ gleich 0,0002 und $0,0000 < 0,05$ (5%-Signifikanzniveau) verwerfen die Nullhypothese von „random-effects“ für die beiden betrachteten Modelle, und sprechen wie erwartet für die Verwendung von einem Fixed-Effects-Modell (vgl. Tabelle 15; StataCorp. 2015a).

Tabelle 15: Hausman-Spezifikations-Test: Modelle D8 und D9⁶²

$\Delta BWS_{AnteilVG}$	Modell D8		Modell D9	
ΔBIP_{pK}	9,838e-06***	9,220e-06***	9,593e-06***	9,049e-06***
ΔBIP_{pK}^2	-2,265e-09***	-2,387e-09***	-2,181e-09***	-2,320e-09***
ΔBIP_{We}	1,563e-16	9,721e-16	1,315e-15	1,851e-15*
Trend			-,00006004*	-,00004534
Fixed-Effects	Ja	Nein	Ja	Nein
Random-Effects	Nein	Ja	Nein	Ja
Konstante	-,00377084***	-,00355576***	-,00329555***	-,0031525***
R ²	,21283008	k.A.	,2169246	k.A.
F-Wert	53,71	k.A.	41,21	k.A.
Anzahl Beobachtungen	622	622	622	622
Hausman-Spezifikations-Test				
$\chi^2(2) = (b-B)'[(V_b - V_B)^{-1}](b-B)^{63}$	17,37		93,62	
Prob> χ^2	0,0002		0,0000	

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$

Es muss jedoch erwähnt werden, dass bei der Nutzung des Hausman-Spezifikations-Test nicht immer zu hundert Prozent sicher ist, dass dieser funktioniert, somit können Zweifel an der Qualität des durchgeführten Tests bestehen (Greene 2012, S. 420). Der Autor geht aber davon aus, dass es in den Ländern Unterschiede gibt, die sowohl die abhängigen als auch die

⁶² xtreg, fe und xtreg, re ohne die Option robust (siehe Abschnitt 4.3.1.4)

⁶³ $V_b - V_B$ ist nicht positiv definit

unabhängigen Variablen beeinflussen (Torres-Reyna 2013), diese Einflüsse sollen durch das Fixed-Effects-Modell bereinigt werden.

4.3.1.3 Reihenkorelation

Reihenkorelation kann in Makro-Panels mit langen Zeitreihen zu verzerrten Standardabweichungen der Koeffizienten und zu überschätztem R^2 führen (Torres-Reyna 2013). Deshalb wurde der Lagrange-Multiplikator Test („*xtserial*“⁶⁴; Torres-Reyna 2013) durchgeführt um Modell (D8) und (D9) auf Reihenkorelation zu testen (StataCorp. 2009). Der Test bestätigt mittels F-Statistik - wenn auch sehr knapp - mit Testergebnissen von $\text{Prob} > F = 0,0948$ und $0,0947 > 0,05$ (5%-Signifikanzniveau) die Nullhypothese, dass keine Reihenkorelation vorliegt (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Lagrange-Multiplier-Test: Modelle D8 und D9

Modelle	Variablen	Ergebnis	
Modell D8	$\Delta BWS_{AnteilVG}$	F(1,22)	3,048
	ΔBIP_{pK}		
	ΔBIP_{pK}^2	Prob > F =	0,0948
	ΔBIP_{We}		
Modell D9	$\Delta BWS_{AnteilVG}$	F(1,22)	3,050
	ΔBIP_{pK}		
	ΔBIP_{pK}^2	Prob > F =	0,0947
	ΔBIP_{We}		
	Trend		

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

4.3.1.4 Heteroskedastizität

In StataCorp. (2009) gibt es die Möglichkeit, Regressionen mit der Option „robust“ (StataCorp. 2016b) zu schätzen, um die Schwierigkeiten von eventuell vorhandener Heteroskedastizität zu umgehen. Dies wurde im Falle der Modelle (D8) und (D9) durchgeführt.

4.3.1.5 Querschnittsabhängigkeit

Ebenso wie Reihenkorelation kann Querschnittsabhängigkeit, laut Baltagi (2013, 10 u. 276) und Torres-Reyna (2013), ein Problem in makroökonomischen Panels über längere Zeiträume darstellen. Deshalb werden die Modelle (D8) und (D9) mit Hilfe des Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeits-Test geprüft (Torres-Reyna 2013).

⁶⁴ Benutzer geschriebenes Programm in Stata.

Tabelle 17: Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeit-Test: Modelle D8 und D9

	Modell D8	Modell D9s
Pesaran's Querschnitts Unabhängigkeitstest	4,382	4,121
Pr	0,0000	0,0000
Durchschnittlicher absoluter Wert der nicht-diagonalen Elemente	0,214	0,210

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Die Ergebnisse des Tests lassen auf Querschnittsabhängigkeit schließen ($Pr < 0,05$), weshalb die Schätzungen der Verhaltensgleichungen mit einem der folgenden robusten Schätzverfahren durchgeführt werden sollten, welche Hoechle (2007, S. 285) in einer Übersicht zur robusten Schätzung (Heteroskedastizität, Autokorrelation, Querschnittsabhängigkeit) von linearen Panel-Daten-Modellen dargestellt hat: den GLS⁶⁵-Schätzer (StataCorp. 2016c), den PSCE⁶⁶-Schätzer (StataCorp. 2016d) und den XTSCC-Schätzer (Hoechle 2007). Der Autor entschied sich für eine Schätzung der Regressionsergebnisse mit Driscoll-Kraay Standardfehlern („xtsc“; Hoechle (2007)) und fixen Effekten (fe) für die Modelle (D8) und (D9).

Tabelle 18: Regressionsergebnisse Driscoll-Kraay Standardfehlern [xtsc] (Modelle D8 und D9)

$\Delta BWS_{AnteilVG}$	Modell D8	Modell D9
ΔBIP_{pK}	9,838e-06**	9,593e-06**
ΔBIP_{pK}^2	-2,265e-09*	-2,181e-09
ΔBIP_{We}	1,563e-16	1,315e-15
Trend		-,00006004*
Fixe Effekte	Ja	Ja
Konstante	-,00377084***	-,00329555***
Within R^2	0,2128	0,2169
F-Wert	5,25	6,14
Anzahl Beobachtungen	622	622

Quelle: berechnet mit dem Befehl xtsc in StataCorp. (2009)

* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$

Die Ergebnisse der Regression zeigen nur für Modell D8 einen signifikanten Zusammen zwischen ΔBIP_{pK}^2 und der abhängigen Variablen. Des Weiteren sind die mit dieser Methode geschätzten „within“ R^2 relativ niedrig (aber mit $R^2 > 0,2$ signifikant unterschiedlich zu null).

⁶⁵ Generalized Least Squares.

⁶⁶ Panel-Corrected Standard Errors.

Eine alternative Schätzung mit Länder-Dummies anstatt des StataCorp. (2009) *fe* Operators wäre möglich um länderspezifische Koeffizienten auszugeben.

4.3.2 Kritische Diskussion

Einfache Regressionsmodelle, wie die hier abgebildeten Modelle D8 und D9 des **gesamten Verarbeitenden Gewerbes** können generell historisch beobachteten Strukturwandel durch die Trends nur beschränkt berücksichtigen, und keine Abweichungen von diesen Trends für die Zukunft modellieren, d.h. auch keine Veränderungen des intra-industrieller Strukturwandels.

Dies könnte in Fällen geringer statistischer Gütesituation Anlass für Expertenkontrolle und -anpassungen sein. Die Regressionen sind daher nur begrenzt verwendbar. Eine bessere Lösung für die Bestimmung des Anteils des gesamten Verarbeitenden Gewerbes an der gesamten Bruttowertschöpfung wäre ein makroökonomisches Modell, aber gerade dies wird ja als nicht vorhanden vorausgesetzt, so dass diese Regressionsmodelle die Ersatz-Lösung darstellen sollen.

Es gibt eine Reihe inhaltlicher Gründe, die den relativ niedrigen Erklärungsgehalt der Modelle D8 und D9 erklären; es handelt sich hierbei um erklärende Variable, die in dem Modell nicht aufgegriffen werden konnten, so z.B.:

- Wettbewerbsfähigkeit/Außenhandel, (Innovationsintensität),
- politische Systeme, (Streik-Traditionen, effiziente Gesundheitssysteme),
- Ressourcenausstattung, (z.B. Seehafen-Anschluss (Belgien, NL), Ölfunde in der Nordsee (UK), Konzentration auf Finanzwirtschaft (London), Duales Bildungssystem in einigen europäisch Ländern),
- eventuell sich verändernde Anteile der Schattenwirtschaft.

Zu den **Regressionsergebnissen auf Branchenebene**, so musste auch diesen sehr kritisch begegnet werden, da deren „fit“ - auch wenn sie die Kriterien der Nutzung erfüllten - immer noch fragwürdig war. Mit ursächlich hierfür war, dass sie nur einen Teil der wahrscheinlich signifikanten Einflussgrößen behandeln, andere aber in den Länder- oder Zeit-Dummies unerkannt lassen. Dieser Mangel drückte sich auch in den meist relativ geringen Werten des R^2 aus. Aus diesem Grund wurde auf eine Darstellung und Diskussion der Branchenergebnisse im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, diese können jedoch auf Anfrage vom Autor zur Verfügung gestellt werden. Wenn längere/qualitativ bessere Datenreihen in Zukunft verfügbar werden, wird man anstelle der Panel-Analysen auch Zeitreihenanalysen für einzelne Länder auf Branchenebene durchführen können und damit die Zusammenhänge angemessener und mit den erforderlichen statistischen Prüfmaßen nutzen können.

5. Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

Zur Kopplung der zuvor vorgestellten Modelle ASTRA und FORECAST Industry, wurde ein Übersetzungsmodul entwickelt, welches die ökonomische und demographische Information aus dem makroökonomischen Modell in die physischen Treiber der industriellen Energienachfrage für das bottom-up Modell übersetzt (Abbildung 5). Dies ist notwendig, da das bottom-up Modell FORECAST Industry die physische Produktion energieintensiver Industrien als Input zur Berechnung der zukünftigen Energienachfrage auf Prozessebene benötigt (vgl. Abschnitt 3.4).

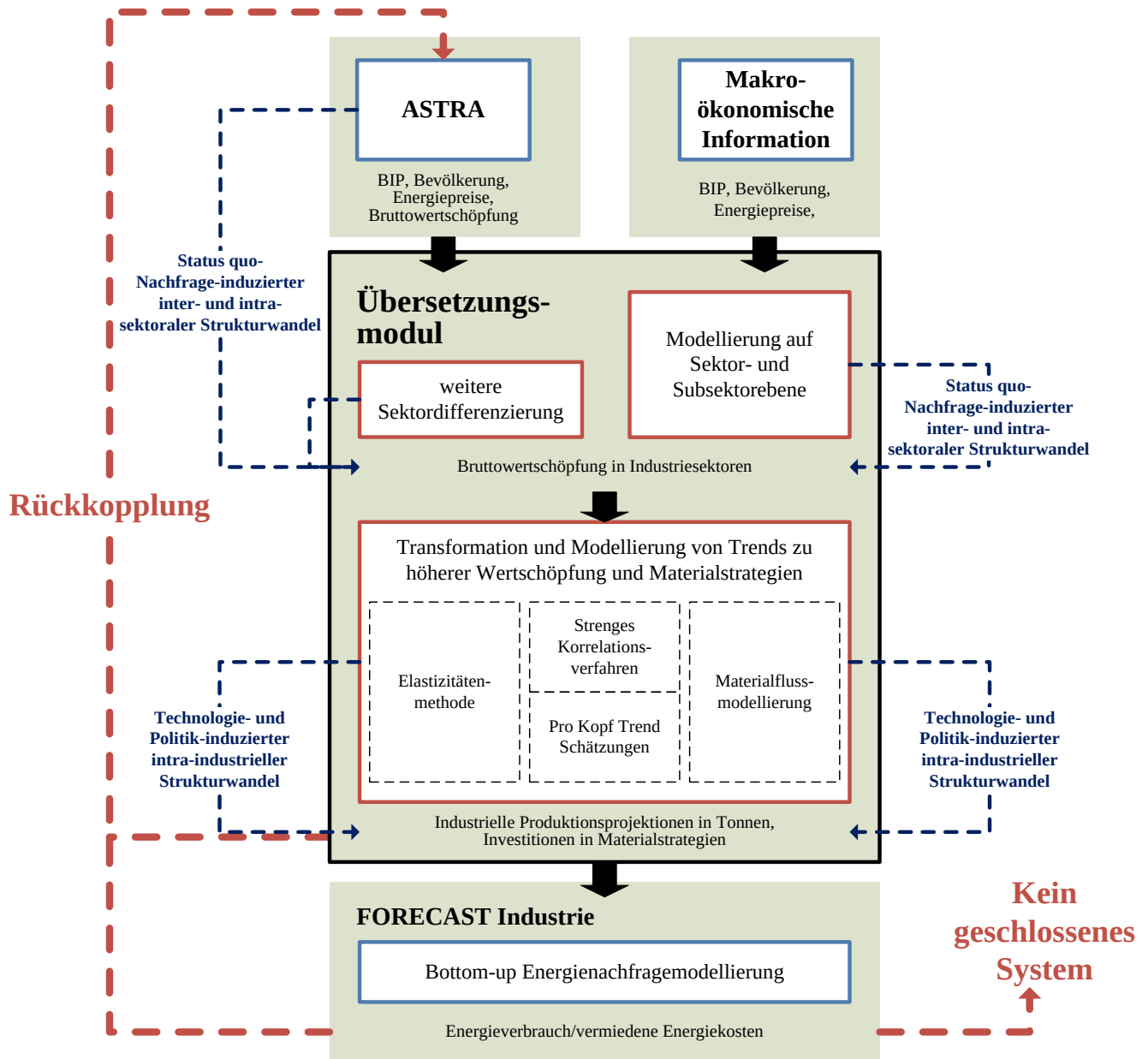
Bei der Übersetzung muss sowohl Nachfrage-induzierter inter- und intra-sektoraler Strukturwandel (vgl. Abschnitt 1.2.1) als auch Technologie- und Politik-induzierter intra-industrieller Strukturwandel (vgl. Abschnitt 1.2.2) berücksichtigt werden, um transparente und plausible Modellergebnisse generieren zu können.

Beginnend mit der notwendigen weiteren Sektordifferenzierung (von ASTRA- auf FORECAST-Sektoren) werden in diesem Kapitel drei methodische Ansätze (Elastizitäten-Methode, strenges Korrelationsverfahren, Materialflussmodellierung) vorgestellt, und deren Stärken und Schwächen kritisch beleuchtet. Die methodische Vorgehensweise und Modellbildung zur physischen Produktion wird in den nachfolgenden Abschnitten am Beispiel der europäischen Stahlindustrie illustriert. Die diskutierten Methoden können jedoch auch auf die anderen für FORECAST relevanten energieintensiven Grundstoffe (z.B. Papier, Zement, Aluminium, Ethylen, etc.) angewandt werden (vgl. Abschnitt 3.4). Die europäische Stahlindustrie wurde, vor allem aufgrund Ihrer hohen Datenverfügbarkeit, aber auch ihrer bereits intensiven Analyse durch andere Forschungsteams, als Fallstudie gewählt. Dabei wird der Modellierungsschwerpunkt dieser Arbeit auf vier der größten der Stahlproduzenten Europas (Frankreich, Deutschland, Italien und Polen) gelegt.

Die Kopplung der Modelle erfolgt in beide Richtungen und ermöglicht somit iterative Berechnungsschritte, welche auch die Auswirkungen von Veränderungen in der zukünftigen Stahlproduktion sowie Materialstrategieverbesserungen auf Wirtschaft und Beschäftigung abbilden können. In dieser Arbeit wird die Rückkopplung auf Materialstrategieverbesserungen (MSV) beschränkt. Es handelt sich dabei um zusätzliche Investitionen durch Materialeffizienz, etc. bzw. die daraus resultierenden verminderten Energiekosten (Zusatz-Impulse in den verschiedenen Industrie- und Dienstleistungssektoren und der Energiewirtschaft), sowie die erforderlichen Programmkosten auf Seiten des Staates und eventuell der Wirtschaftsver-

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

bände. Weitere Aspekte einer derartigen Rückkopplung, welche jedoch in dieser Arbeit nicht genauer betrachtet werden, können unter anderem Investitionen in Energieeffizienz und entsprechende Programmkosten von Energie- und Klimapolitik sein.



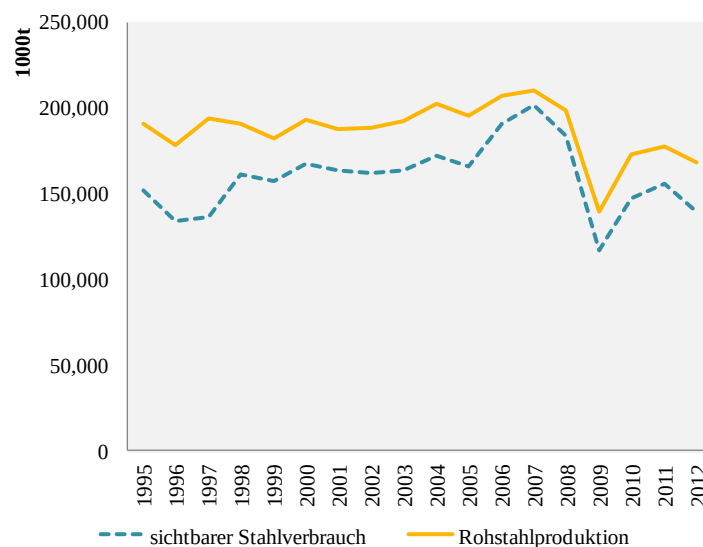
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Modellbildung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung einer entsprechenden Methodik zur Modellkopplung und Abbildung der zuvor genannten Effekte, nicht jedoch auf den tatsächlichen quantitativen Ergebnissen, da diese je nach Szenario-Annahmen stark variieren können und hier zur Veranschaulichung der Methodik dienen.

5.1 Die europäische Stahlindustrie

Herbst et al. (2014b, S. 202) typisieren Rohstahl als ein energieintensives (Basis-) Massenprodukt mit primärer und sekundärer Produktionsroute mit verhältnismäßig niedrigen Transportkosten im Vergleich zu dessen Wert. Homogene Stahlprodukte (z.B. einfache Massentähle) stehen als Konsequenz in starkem internationalem Wettbewerb, insbesondere mit Schwellenländern wie China und Indien, aber auch mit weiter entwickelten Volkswirtschaften wie Russland und Japan. Die Rohstahlproduktion (RSP) innerhalb Europas stagnierte in den letzten zwei Jahrzehnten (-0,7% p.a. 1995-2012) und verzeichnete in der jüngsten Vergangenheit (2010-2012) einen Rückgang von -1,2% p.a. (Abbildung 6, World Steel Association mehrere Ausgaben).



Quelle: eigene Darstellung von World Steel Association (mehrere Ausgaben)

Abbildung 6: Rohstahlproduktion und sichtbarer Stahlverbrauch EU-27 (1995-2012)

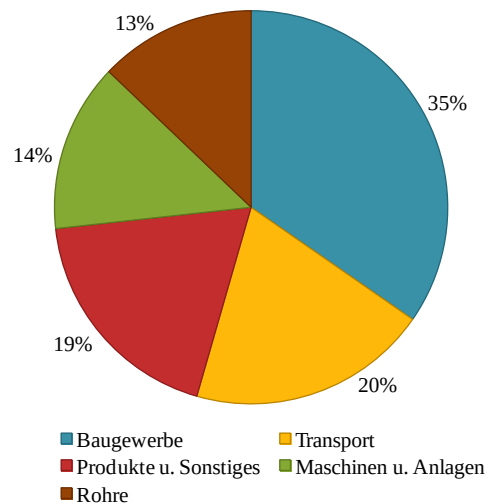
Währenddessen steigerte sich die chinesische Rohstahlproduktion im Jahr 2012 bereits auf 47% der weltweiten Rohstahlproduktion (Tendenz steigend mit 50% in 2013 (World Steel Association 2014, S. 1)), im Vergleich lag der Anteil der Rohstahlproduktion der EU-27 an der globalen Produktion nur bei rund 11% (World Steel Association 2014, S. 1–2). 2013 lag China auf Platz eins der Weltstahlexportrangliste (61,5 Mio. Tonnen; rund 15% der gesamten Top-Zwanzig Stahlexporteure), gefolgt von Japan (42,5 Mio. Tonnen) und der Europäischen Union (EU27 ohne inter-regionalen Handel; 38,7 Mio. Tonnen, rund 10% der gesamten Top-Zwanzig Stahlexporteure) (worldsteel 2014, S. 25). Die Europäische Union importierte jedoch beinahe ebensoviel Stahl wie sie exportierte (Rang 1 der weltweiten Importrangliste mit 30,8 Mio. Tonnen ohne inter-regionalen Handel), und lag somit nur auf Rang sechs (7,9 Mio. Tonnen) der weltweiten Nettostahlexporteure, welche von China mit 46,8 Mio. Tonnen im Jahr 2013 angeführt wurden (worldsteel 2014, S. 25). Zu den größten europäischen Stahlpro-

duzenten zählen im Jahr 2012 Deutschland, Italien, Frankreich, Spanien, Großbritannien und Polen (World Steel Association 2014, S. 1).

Mitte 2015 betrugen die europäischen Überkapazitäten laut Hans Jürgen Kerkhoff (im Interview mit Kirsten Bialdiga für die Süddeutsche Zeitung) rund 25 bis 30 Millionen Tonnen (Bialdiga 2015b, S. 27). Im Herbst 2015 schätzte der Präsident des Weltstahlverbands, laut Handelsblatt GmbH/dpa Deutsche Presse-Agentur GmbH (2015), die europäischen Überkapazitäten auf 30 bis 40 Millionen Tonnen (Handelsblatt GmbH/dpa Deutsche Presse-Agentur GmbH 2015).

In nachfolgender Modellierung wird ein besonderer Schwerpunkt auf vier dieser Länder gelegt, welche sich durch unterschiedliche Charakteristika auszeichnen und gemeinsam rund 56% der europäischen (EU-27 in 2012) Rohstahlproduktion ausmachen (World Steel Association 2014, S. 1): Frankreich (EU-15 Mitglied mit sinkender internationaler Wettbewerbsfähigkeit der nachfragenden Industriesektoren; z.B. Kfz und Maschinen- und Anlagenbau), Deutschland (EU-15 industriestarke Exportnation mit starker primärer Produktionsroute), Italien (EU-15 Mitglied mit Spezialisierung auf sekundäre Produktionsroute) und Polen (neuer Mitgliedsstaat). Obwohl Stahl als vielseitiger Bau- (Gebäude, Brücken, Energieversorgung) und Werkstoff (Fahrzeugbau, Maschinenbau, Konsumgüterindustrie) genutzt wird, stagnierte der europäische Stahlverbrauch in den letzten zwei Jahrzehnten (CAGR 1995-2012: -0,5%, Abbildung 6).

Laut EUROFER (2015) hatte das Baugewerbe, welches relativ einfache Stahlprodukte wie z.B. Profilstahl, Betonstahl und Stahldrähte bezieht, den größten Anteil (35%) am europäischen Stahlverbrauch im Jahr 2010. Der zweitgrößte Verbraucher war der Transportsektor, welcher von der Automobilindustrie (18%) dominiert wurde (vgl. Abbildung 7). Beinahe genauso groß wie der Anteil des Transportsektors war der Anteil des Sektors Produkte und Sonstige (19%), welcher sowohl Metallwaren, Verpackung aber auch Haushaltsgeräte beinhaltet, während Maschinen und Anlagen sowie Rohre gemeinsam noch etwas mehr als ein Viertel (27%) der europäischen Stahlnachfrage ausmachen. (EUROFER 2015)



Quelle: eigene Darstellung nach EUROFER 2015

Abbildung 7: Europäische Stahlnachfrage nach Sektoren (2010)

Produziert wird der nachgefragte Stahl mehrheitlich in zwei Verfahren, der Hochofenroute (primäre Produktion) und der Elektroofenroute (sekundäre Produktion) (Fleiter et al. 2013, S. 278–279). Während in der Hochofenroute, welche um ein mehrfaches so energieintensiv wie der Elektroofen ist (Fleiter et al. 2013, S. 281), Eisenerz, Kohle und Erdgas eingesetzt werden, sind Stahlschrott und Strom die Hauptinputfaktoren in der Elektroofenroute (für eine detaillierte Beschreibung der Produktionsprozesse siehe Fleiter et al. (2013, 277ff)).

Heutzutage werden qualitativ hochwertige Stähle noch größtenteils in der primären Produktionsroute (*OSP = Oxygenstahlproduktion*) produziert, während in der sekundären Produktionsroute (*ESP = Elektrostahlproduktion*) tendenziell einfachere Stähle (z.B. Baustahl) produziert werden. Es können jedoch auch in der sekundären Produktionsroute ähnliche Stahlqualitäten wie in der primären erreicht werden, wenn entsprechende Schrottqualitäten (DRI, HBI) im Prozess eingesetzt werden (Fleiter et al. 2013, S. 278). Eine komplette Ersetzung der primären Produktionsroute durch alternative Produktionsprozesse auf Schrottbasis kann jedoch nicht erwartet werden, da die unbekannte Schrottzusammensetzung und oft auch schlechte Schrottqualität (Verunreinigungen/Legierungen im Baugewerbe, Maschinen und Anlagen, Kraftfahrzeugen) ein Einsatz zur Produktion qualitativ hochwertiger Produkte unmöglich macht. Dennoch hat sich der Einsatzbereich von Elektrostahl in den letzten Jahrzehnten deutlich ausgeweitet.

Herbst et al. (2014b, S. 202) und Fleiter et al. (2013, S. 277–278) argumentieren, dass das zukünftige Potential der Elektrostahlproduktion insbesondere von der zukünftigen inländischen Schrottverfügbarkeit abhängt, welche unter anderem von Dynamiken bestehender und zukünftiger Infrastrukturen definiert wird. Aber auch von gesellschaftlichen Veränderungen, wie zum Beispiel der Bevorzugung von „carsharing“ gegenüber eigenen Kraftfahrzeugen

(siehe auch Jochem (2004b, S. 45–46)) und längere Nutzung von stahlhaltigen Produkten, welche Einfluss auf die zukünftige Verfügbarkeit „Rohstoffes“ für die sekundäre Produktionsroute haben (siehe auch Jochem (2004a)). Des Weiteren bestimmen auch Schrottqualität (vgl. Fleiter et al. (2013, S. 277–278)) bzw. Fortschritte in dessen Sammlung und Verwertung aber auch der Schrotthandel die zukünftige Verfügbarkeit von Stahlschrott.

5.1.1 Konzeptionelle Strukturierung der Übersetzung von Bruttowertschöpfung in physische Einheiten

Bei der methodischen Vorgehensweise zur konzeptionellen Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem bottom-up Modell für die Industrie müssen wichtige Einflussfaktoren auf die (zukünftige) industrielle Produktion berücksichtigt werden.

Ein wichtiger Treiber der Rohstahlproduktion ist die **inländische Nachfrage** nach Stahl und deren zukünftige Entwicklung. Pauliuk et al. (2013c, S. 28) zeigen in ihrer historischen Analyse von rund 200 Ländern, dass der in Verwendung befindliche Stahlbestand pro Kopf sich insbesondere in traditionellen Industrienationen bereits in einer Sättigungsphase oder auf dem Weg dahin befindet. In der nachfolgenden Arbeit werden Sättigungseffekte pro Kopf nicht explizit modelliert, da sich die Modellierung der Stahlnachfrage an der ökonomischen Entwicklung der stahlnachfragenden Industriebranchen aus dem makroökonomischen Modell orientiert, um konsistente Szenario-Analysen gewährleisten zu können. Zur Sättigung der inländischen Nachfrage trägt jedoch nicht nur die inländische Produktion, sondern auch der **Außenhandel** mit Halb- und Fertigerzeugnissen der Stahlindustrie bzw. die ausländische Stahlnachfrage (z.B. nach Spezialstählen) bei. Der Außenhandel mit Halb- und Fertigerzeugnissen wird in den nachfolgenden Modellen nicht explizit modelliert, dennoch wird der Anteil der Stahlindustrie am Außenhandel des jeweiligen Landes (RCA) in der vereinfachten Materialflussmodellierung für die Projektion/Analyse der Rohstahlproduktion berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang spielen auch örtliche **Skalenerträge durch Verbundproduktion**, d.h. die Nähe zu den stahlnachfragenden Industriebranchen (z.B. Kfz-Industrie, Maschinen- und Anlagenbau) eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Stahlindustrie. Verstanden wird hierunter, dass eine Anlage bei optimaler Auslastung durch die Nähe zu dessen Kunden bzw. durch Anbindung an strategische Infrastruktur (Fließgewässer, Schienennetz) Transportkostenvorteile realisieren kann. Ein weiterer Vorteil der Verbundproduktion, insbesondere in der sekundären Produktionsroute, ist die in der Praxis häufige Rücklieferung der Neuschrotte aus dem Fabrikationsprozess an das Elektrostahlwerk, welches dann Güte und Qualität dieser Schrotte eindeutig bestimmen kann. Zusätzlich bieten enge Kundenbeziehungen die Möglichkeit der Produktion spezialisierter Kundenprodukte, welche ebenfalls Konkurrenzvorteile nach sich ziehen. Überlegungen zu diesen Effekten können in nachfolgendem Modell nicht explizit abgebildet werden, fließen jedoch in die Szenario-Annahmen des Modells ein.

Energieintensive Industrien, zu denen auch die Stahlindustrie gehört, haben einen relativ hohen **Energiekostenanteil**, weshalb steigende Energie- und insbesondere Strompreise in der öffentlichen Diskussion oft als Wettbewerbs schädigend im Konkurrenzkampf mit Schwellenländern, welche geringeren Umweltauflagen unterliegen, gesehen werden. In der nachfolgenden Regression konnte jedoch kein eindeutiger negativ signifikanter Zusammenhang zwischen Rohstahlproduktion und der statistischen Strompreisentwicklung gezeigt werden (Beispiel Italien mit steigender Elektrostahlproduktion trotz steigender Strompreise⁶⁷). Dies bedeutet jedoch nicht, dass dieser negative Zusammenhang nicht existent wäre, denn de facto sanken die unternehmensspezifischen Strompreise für die Stahlindustrie in den letzten Jahren (European Commission 2016b). So wurden zum Beispiel in der Vergangenheit im deutschen Stromsteuergesetz energieintensive Industrien entlastet bzw. Ausnahmeregelungen für diese getroffen (z.B. Besondere Ausgleichsregelung zum EEG), aber auch in anderen Ländern konnten ähnliche Entwicklungen beobachtet werden. Durch diese länderspezifischen Entlastungen/Entwicklungen, welche aber nicht eindeutig in den statistisch verfügbaren Daten widergespiegelt werden, kann es zu Verzerrungen zwischen den realen Zusammenhängen und den Regressionsergebnissen kommen. Um tatsächlich eine belastbare Aussage über den Zusammenhang der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und den Energieträger-/Strompreisentwicklungen treffen zu können, müsste man sich auf Unternehmensebene begeben und jeden Einzelfall gesondert betrachten. Denn wo Unternehmen mit relativ einfacher, d.h. international homogener Produktpalette, eventuell Schwierigkeiten durch steigende Energiepreise im internationalen Wettbewerb erfahren könnten, könnten Unternehmen, welche stark endkundennahe (d.h. kundenspezifische) oder qualitativ hochwertige Produkte (mit Knowhow-Vorsprung) herstellen nicht nachhaltig negativ beeinflusst werden. Im Umfang der vorliegenden Arbeit konnten derartige (empirische) Einzelanalysen nicht durchgeführt werden, da es sich um einen systemisch-konzeptionellen Ansatz handelt.

Ein wichtiger Faktor, welcher oft in der Modellierung der zukünftigen Stahlproduktion zur Energienachfrageanalyse vernachlässigt wird betrifft die **strukturellen Änderungen**, welche innerhalb der bereits weit entwickelten Stahlindustrie stattfinden können (Stichwort: intra-industrieller Strukturwandel vgl. Abschnitt 1.2.2). Dazu gehören sowohl Prozesswechsel von primärer zu sekundärer Produktionsroute als auch Änderungen in der Produktpalette hin zu den zuvor beschriebenen endkundennahen bzw. qualitativ hochwertigen (Spezial-)Produkten (Herbst et al. 2012a, S. 412; Herbst et al. 2013). Diese Entwicklung hat bereits in der Vergangenheit zu einer Entkopplung von Wirtschaftsentwicklung (BIP) und Rohstahlproduktion geführt. Des Weiteren tragen auch zusätzliche produktbegleitende Dienstleistungen wie Finanzierungsdienstleistungen, aber auch Wartung von Maschinen und Anlagen, Planungstätigkeiten und Sicherheitsprüfungen zur weiteren Entkopplung von Wertschöpfung und physi-

⁶⁷ Eine ähnliche empirische Beobachtung machten auch Flues et al. 2013, S. 18.

scher Stahlnachfrage in den stahlnachfragenden Sektoren bei. In der hier vorgestellten Methode wird die Möglichkeit gegeben beide Effekte zu berücksichtigen (zusätzlich zur empirischen Trendentwicklung; vgl. Abschnitt 5.2.4.2).

Ein weiterer Aspekt, welcher ebenfalls die zukünftige Struktur der Stahlindustrie stark beeinflussen kann ist die **inländische Schrottverfügbarkeit** aber auch der zukünftige Schrottaußenhandel und die Qualität des recycelten Materials (Herbst et al. 2014b, S. 201) sowie Veränderungen in den zukünftigen **Materialstrategieentwicklungen** (Stichwort: intra-industrieller Strukturwandel, vgl. Abschnitt 1.2.2), welche sowohl effizientere und qualitativ höherwertige Produkte und Produktion/Verarbeitung umfassen, als auch die Substitution von Stahl durch alternative Werkstoffe (z.B. Aluminium, Carbon) (vgl. Jochem et al. (2004), Jochem und Reitze (2014)) und Änderungen des Nutzerverhaltens (z.B. intensivere Produktnutzung, Wiederverwendung; vgl. Milford et al. (2013), Jochem (2004a)). Bei der Betrachtung der Energienachfrage sind insbesondere die intra-industriellen Veränderungen der Stahlindustrie interessant und in der jüngsten Vergangenheit immer mehr in den Fokus der Analyse gerückt (Milford et al. 2013; Allwood et al. 2012; Allwood et al. 2011; Milford et al. 2011). Weitere Autoren welche Aspekte des intra-industriellen Strukturwandels (Sättigungseffekte, Entkopplung Wertschöpfung und physische Produktion/Energieverbrauch, Einfluss von Materialstrategieverbesserungen) bzw. die Relevanz verbesserter Projektionen der zukünftigen Produktionsentwicklung adressieren sind unter anderem: Jochem und Reitze (2014), Gielen et al. (2008), de Vries, H.J.M. de et al. (2006), Groenenberg et al. (2005), Jochem et al. (2004).

5.2 Methodische Vorgehensweise und Modellbildung zur physischen Produktion

5.2.1 Szenariobeschreibung und weitere Sektordifferenzierung

Das für die Modellkopplung verwendete Referenzszenario des makroökonomischen Modells ASTRA stammt aus dem europäischen ASSIST-(Assessing the Social and Economic Impacts of Past and Future Sustainable Transport)-Projekt, welches im Jahr 2014 abgeschlossen wurde (Krail und Schade 2014; Krail et al. 2014). Die Haupttrends dieses Referenzszenarios wurden laut Krail et al. (2014, S. 18) im Wesentlichen in Einklang mit dem PRIMES-TREMOVE 2013 Referenz Szenario der europäischen Kommission festgelegt. Das durchschnittliche jährliche Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) für die EU-27 im ASSIST-Referenzszenario beträgt rund 2,2% p.a. bis 2020, schwächt sich danach etwas ab und beträgt bis 2035 nur noch rund 1,4% p.a. (Tabelle 19). Während das BIP-Wachstum in den betrachteten EU-15 Schwerpunktländern (Frankreich, Deutschland, Italien) tendenziell unter dem EU-27 Durchschnitt liegt (Ausnahme Frankreich 2020-2035), wächst das Bruttoinlandsprodukt in Polen, als neuer Mitgliedstaat, stärker als der EU-27 Durchschnitt (Tabelle 19). Das Bevölkerungswachstum stagniert in allen Schwerpunktländern, wobei Deutschland und Polen sich rückläufigen Bevölkerungszahlen bis 2035 gegenüber sehen (Tabelle 19). (Krail und Schade 2014; Krail et al. 2014)

Tabelle 19: Bruttoinlandsprodukt und Bevölkerungsentwicklung (basierend auf ASSIST-Referenzszenario)

Region	Indikator	Milliarden Euro2005/1000 Personen			Jährliche Wachstumsrate	
		2010	2020	2035	2010-‘20	2020-‘35
EU-27	BIP	11.271	14.011	17.362	2,2	1,4
	Bevölkerung	504.184	519.080	524.904	0,3	0,1
Frankreich	BIP	1.740	2.072	2.598	1,8	1,5
	Bevölkerung	63.129	66.280	68.870	0,5	0,3
Deutschland	BIP	2.286	2.687	3.067	1,6	0,9
	Bevölkerung	82.048	81.262	77.679	-0,1	-0,3
Italien	BIP	1.421	1.727	2.082	2,0	1,3
	Bevölkerung	60.019	62.512	64.423	0,4	0,2
Polen	BIP	288	373	477	2,6	1,6
	Bevölkerung	39.294	39.339	37.734	0,0	-0,3

Quelle: ASTRA-EC, Fraunhofer-ISI

Wichtig zu bemerken, da dies nachfolgend starken Einfluss auf die Modellergebnisse haben wird, ist, dass in dem ASSIST-Referenzszenario von einem ungewöhnlich hohem Wachstum

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

(über 2% p.a. von 2010-2020, um die 2% p.a. 2020-2035) im Verarbeitenden Gewerbe (Re-Industrialisierung) aber auch dem Baugewerbe ausgegangen wird (Tabelle 20).

Tabelle 20: Bruttowertschöpfungsentwicklung Verarbeitendes Gewerbe und Baugewerbe „hohes Wachstum“ (basierend auf ASSIST-Referenzszenario)

Region	Indikator	Millionen Euro2005			Jährliche Wachstumsrate	
		2010	2020	2035	2010-‘20	2020-‘35
Frankreich	Verarbeitendes Gewerbe	236.253	315.094	440.476	2,92%	2,26%
	Baugewerbe	93.794	114.022	168.483	1,97%	2,64%
Deutschland	Verarbeitendes Gewerbe	487.771	634.450	842.956	2,66%	1,91%
	Baugewerbe	117.598	195.683	194.507	5,22%	-0,04%
Italien	Verarbeitendes Gewerbe	214.095	263.967	351.268	2,12%	1,92%
	Baugewerbe	84.472	119.200	180.106	3,50%	2,79%
Polen	Verarbeitendes Gewerbe	48.354	63.290	84.440	2,73%	1,94%
	Baugewerbe	20.459	28.035	38.211	3,20%	2,09%

Quelle: ASTRA-EC, Fraunhofer-ISI

Besonders auffällig erscheinen die extrem hohen Wachstumsraten des Baugewerbes in Deutschland (über 5% p.a.) bis 2020, aber auch in Frankreich (rund 3% p.a.), Italien und Polen (jeweils über 3% p.a.) (Krail und Schade 2014; Krail et al. 2014) (Tabelle 20). Die ungewöhnlich hohen Wachstumsannahmen dieses Szenarios betreffen auch die unterschiedlichen stahlnachfragenden Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes (Tabelle 21 „Metallprodukte, Industrielle Maschinen, Computer, Elektronik, Fahrzeugbau). Dies erscheint wenig wahrscheinlich, kann jedoch in Ermangelung eines alternativen Szenarios nicht behoben werden. Für alle weiteren Analysen und Berechnungen sollten die hohen Wachstumsannahmen in diesen Sektoren im Hinterkopf behalten werden, da diese starke Auswirkungen auf die Modellergebnisse haben.

Tabelle 21: Entwicklung der Bruttowertschöpfung (BWS) stahlnachfragender Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes „hohes Wachstum“ (2010-2035) (basierend auf ASSIST-Referenzszenario)

Region	Indikator	Millionen Euro2005			Jährliche Wachstumsrate	
	BWS	2010	2020	2030	2010-‘20	2020-‘35
Frankreich	Metallprodukte	33.191	40.696	52.631	2,06%	1,73%
	Industrielle Maschinen	23.919	37.047	68.175	4,47%	4,15%
	Computer	12.907	16.089	20.206	2,23%	1,53%
	Elektronik	13.210	17.925	27.125	3,10%	2,80%
	Fahrzeugbau	36.804	49.952	71.888	3,10%	2,46%
Deutschland	Metallprodukte	71.418	96.181	125.402	3,02%	1,78%
	Industrielle Maschinen	77.792	117.779	171.455	4,23%	2,54%
	Computer	33.295	38.675	45.708	1,51%	1,12%
	Elektronik	32.926	45.342	61.763	3,25%	2,08%
	Fahrzeugbau	94.539	125.012	186.197	2,83%	2,69%
Italien	Metallprodukte	38.147	47.843	63.729	2,29%	1,93%
	Industrielle Maschinen	29.534	43.135	72.350	3,86%	3,51%
	Computer	8.604	10.027	13.253	1,54%	1,88%
	Elektronik	9.771	11.355	15.311	1,51%	2,01%
	Fahrzeugbau	11.885	15.365	14.452	2,60%	-0,41%
Polen	Metallprodukte	5.109	5.711	8.017	1,12%	2,29%
	Industrielle Maschinen	5.804	8.145	6.868	3,45%	-1,13%
	Computer	1.925	2.864	4.742	4,05%	3,42%
	Elektronik	2.562	3.664	4.621	3,64%	1,56%
	Fahrzeugbau	3.401	4.083	4.138	1,84%	0,09%

Quelle: ASTRA-EC, Fraunhofer-ISI

Wie bereits in Abschnitt 3.3 diskutiert, nutzt das makroökonomische Modell ASTRA eine andere sektorale Auflösung als dies im bottom-up Modell FORECAST der Fall ist. Dies betrifft unter anderem auch die Metallherzeugende Industrie, welche in ASTRA unter dem Überbegriff „Metallprodukte“ zusammengefasst wird. Folglich musste diese weiter in die für FORECAST relevanten Sektoren „Metallerzeugung und -bearbeitung“⁶⁸, „Herstellung von Me-

⁶⁸ NACE 2: 24

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

tallerzeugnissen“⁶⁹ bzw. „Eisen und Stahl“⁷⁰ und „Nicht-Eisen-Metalle“⁷¹ differenziert werden.

Tabelle 22: Differenzierung des Sektors „Metallprodukte“ (in Prozent des Aggregats)

Sektor	2010	2020	2035
Eurostat (2013)			
Frankreich			
Herstellung von Metallernzeugnissen	75	77	78
Metallernzeugung und –bearbeitung	25	23	22
Eisen und Stahl	63	61	60
Nicht-Eisen-Metalle	37	39	40
Deutschland			
Herstellung von Metallernzeugnissen	70	72	75
Metallernzeugung und –bearbeitung	30	28	25
Eisen und Stahl	65	63	60
Nicht-Eisen-Metalle	36	37	40
Italien			
Herstellung von Metallernzeugnissen	75	77	81
Metallernzeugung und –bearbeitung	25	23	19
Eisen und Stahl	70	68	65
Nicht-Eisen-Metalle	30	32	35
Polen			
Herstellung von Metallernzeugnissen	75	76	78
Metallernzeugung und –bearbeitung	25	24	22
Eisen und Stahl	75	74	72
Nicht-Eisen-Metalle	25	26	28

Quelle: eigene Berechnungen/Schätzungen nach Expertenplausibilisierung

Diese weitere Sektordifferenzierung wurde bereits in einer Fallstudie von Herbst et al. (2014a, S. 6–7) methodisch entwickelt. Ansatzübergreifend ist die Unterscheidung in Eisen-

⁶⁹ NACE 2: 25

⁷⁰ NACE 2: 24.1, 24.2, 24.3; 24.51, 24.52

⁷¹ NACE 2: 24.4, 24.53, 24.54

und Stahl und Nicht-Eisen-Metalle für das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST wichtig, da die BWS genutzt wird um den Energieverbrauch einer Branche zu simulieren, der nicht über die physische Produktionsmenge erklärt wird.

Von den nachfolgend beschriebenen methodischen Ansätzen zur Produktionsprojektion benötigt nur das strenge Korrelationsverfahren (vgl. Abschnitt 5.2.3) diese Information.

Die sektoralen Anteile der zuvor genannten Branchen für 2010, wurden basierend auf empirischen Daten von Eurostat (2013) ermittelt (Herbst et al. 2014a) und deren zukünftige Entwicklung mittels eigener Annahmen und einer, eigens für diese Arbeit als Plausibilitätskontrolle durchgeführten, Expertenbefragung⁷² für den Projektionshorizont unter Berücksichtigung der makroökonomischen Rahmenbedingungen festgelegt. Es wird für alle Schwerpunkt-länder erwartet, dass es zu einer Verschiebung des Wertschöpfungsanteils zugunsten der Herstellung von Metallerzeugnissen relativ zum Wertschöpfungsanteil der Metallerzeugung und -bearbeitung kommt. So steigt zum Beispiel in Deutschland der Anteil der Metallerzeugnisse am Sektor Metallprodukte von 70 Prozent in 2010 auf 75 Prozent in 2035 (Tabelle 22). Des Weiteren wird ein relativer Rückgang im Wertschöpfungsanteil der Stahlindustrie zugunsten der Nicht-Eisen-Metalle (z.B. Aluminium, Kupfer, Zink) erwartet. Ebenfalls im Beispiel Deutschland sinkt der Anteil der Stahlindustrie von rund 65 Prozent in 2010 auf 60 Prozent in 2035 (Tabelle 22).

Als eine von mehreren Ursachen für diese Referenzentwicklung, wurde ein langsamer Rückgang der inländischen Produktion von einfachen Grundmetallerzeugnissen in Europa zugunsten der Herstellung von Metallerzeugnissen angenommen.

Durch niedrigere Lohn- und Energiekosten bzw. schwächere Umweltauflagen wird ein höherer Konkurrenzdruck aus dem außer-europäischen Ausland vermutet, insbesondere im Massenstahlbereich wie z.B. bei Baustählen. Es wird erwartet, dass die Produktion in diesem einfachen Stahlsegment deshalb zukünftig verstärkt in Nordamerika und Asien stattfinden dürfte, während sich die inländische Produktion vermehrt auf die Erzeugung qualitativ höherwertiger Stähle bzw. spezialisierte Kundenprodukte konzentrieren muss. (Hartbich und Steiger 2014; Klempert 2014)

Bereits heute schätzt man die europäischen Überkapazitäten in der Stahlerzeugung auf rund 30 bis 40 Millionen Tonnen (Handelsblatt GmbH/dpa Deutsche Presse-Agentur GmbH 2015). In welchen europäischen Ländern sich diese Kapazität abbauen könnte, hängt nicht nur von ökonomisch günstigen Gegebenheiten in den stahlerzeugenden Ländern ab, sondern auch von Einzelverhandlungen zwischen Stahlunternehmen und betroffener Mitgliedsstaaten

⁷² Bis auf geringe Abweichungen im Jahr 2035 für Frankreich wurden die im Fragebogen angenommenen Entwicklungen von allen Experten als plausibler und möglicher Entwicklungspfad angesehen. Die Empfehlungen für Frankreich 2035 wurden übernommen.

oder Regionalregierungen (z.B. Ausnahmen von Energiesteuern, -Umlagen und CO₂-Zertifikate-Zuteilungen u.a.).

Aus diesen Gründen stellen die im folgenden getroffenen Annahmen zur Produktionsentwicklung der Stahlabnehmer oder des Schrottauskommens in den vier behandelten Ländern nur einen von vielen möglichen Entwicklungspfaden der Metallprodukte bis 2035 dar. Die hier getroffenen Annahmen sind von den zugrundeliegenden Szenario-Annahmen geprägt und abgeleitet. Grundsätzlich kann es sich bei Projektionen in sozial-ökonomischen Kontexten nur um „Wenn-Dann-Aussagen“ handeln, d.h. die Unsicherheiten dieser vorgelegten Projektionen bis 2035 sind – gemessen an der später eintretenden Realität – hoch. Die Unsicherheiten wären auch durch weitere Differenzierung der vielen Einflussfaktoren kaum weiter zu vermindern. Denn für jede weitere erklärende Variable benötigt das Modell weitere „Wenn-Dann-Aussagen“, d.h. weitere Annahmen über deren zukünftige Entwicklungen.

5.2.2 Elastizitäten-Methode

Die Elastizitäten-Methode, welche in der Fallstudie von Herbst et al. (2014a, S. 8) diskutiert wurde, kann als sehr vereinfachtes Modellkopplungsverfahren zu Schätzung der zukünftigen Produktion (P) von Oxygen-, Elektro Stahl-, und Walzstahl verstanden werden⁷³. Diese Methode stellt einen rein nachfrageorientierten Ansatz dar. Haupttreiber der Elastizitäten-Methode ist die Wertschöpfungsentwicklung der stahlnachfragenden Sektoren Baugewerbe (Elektrostahlproduktion), Fahrzeugbau, Maschinenbau und Anlagenbau (Oxygenstahlproduktion⁷⁴) (Herbst et al. 2014a, S. 8). In Herbst et al. (2014a, S. 8) wurden Schätzungen der Elastizitäten zur Projektion der Oxygen- und Elektro Stahlproduktion basierend auf der historischen Entwicklung (1995-2008), wichtigen historischen Ereignissen und den (ebenfalls in dieser Fallstudie berechneten) Ergebnissen des strengen Korrelationsverfahren geschätzt.

$$P_{p,i(t)} = P_{p,i(t-1)} + (P_{p,i(t-1)} * g_{BWS(t-1,t)}^{75} * \varepsilon_{p,i(t)}) \quad \text{mit } p = OSP, ESP, WSP^{76}$$

Bei der hier vorgestellten Methode handelt es sich um einen „ad-hoc“-Ansatz mit geringem wissenschaftlichem Mehrwert, dessen Hauptvorteil in der schnellen Umsetzungsfähigkeit und dem somit niedrigen benötigten Zeitaufwand zur Generierung erster Produktionsprojektionen liegt. Die Ergebnisse dieses Ansatzes sollten jedoch stets kritisch hinterfragt werden, da sie sich in erster Linie an der Vergangenheit orientieren und somit zwar vergangene Trends (z.B. zu höherer Wertschöpfung) sehr vereinfacht widerspiegeln, jedoch Strukturbrüche, Prozess-

⁷³ Herbst et al. 2014a, S. 8 analysierten auch die zukünftige Aluminiumproduktion.

⁷⁴ Eine Erweiterung der Analyse wäre hier möglich in dem man auch die Wertschöpfungsentwicklung der Metallherzeugnisse, Computer, und Elektronik berücksichtigt.

⁷⁵ Je nach Produkt wurden die Bruttowertschöpfung (BWS) der ausgewählten stahlnachfragenden Sektoren gruppiert und deren Wachstumsrate gegenüber Vorjahr ($t-1$) ermittelt.

⁷⁶ Oxygenstahlproduktion (OSP), Elektro Stahlproduktion (ESP), Walzstahlproduktion (WSP).

wechsel und technologische Änderungen nur unzureichend bzw. gar nicht abbilden könnten. Diese sind stark von der zugrundeliegenden Expertenschätzung zur zukünftigen Elastizität abhängig und verfügen über keine explizite Modellierung von intra-sektorem Strukturwandel, wie zum Beispiel Materialstrategien oder Trends zu höherer Wertschöpfung. Folglich handelt es sich bei dieser Methode um einen Ansatz, welcher den Ansprüchen der Transparenz und der Nachvollziehbarkeit nicht komplett gerecht werden kann. Nichtsdestotrotz hat dieser Ansatz seine Existenzberechtigung durch seine Einfachheit.

Ergebnisse und Annahmen der Elastizitäten-Methode für die europäische Stahlindustrie (Frankreich, Deutschland, Italien, Polen, Spanien, Großbritannien) können in Herbst et al. (2014a) nachgelesen werden⁷⁷. Basis der dort vorgestellten Fallstudie ist wie auch in dieser Arbeit das Referenzszenario des makroökonomischen Modells ASTRA aus dem europäischen ASSIST-(Assessing the Social and Economic Impacts of Past and Future Sustainable Transport)-Projekt (Krail und Schade 2014; Krail et al. 2014).

5.2.3 Strenges Korrelationsverfahren

Das in Herbst et al. (2014a) verbesserte „*strenge Korrelationsverfahren*“ (Herbst et al. 2012a, S. 413), basiert auf einer einfachen konzeptionellen Idee zur Modellkopplung, welche erstmals im ADAM-Projekt des Fraunhofer ISI (Jochem et al. 2007; Jochem et al. 2009; Schade et al. 2009) angesprochen wurde. Zum damaligen Zeitpunkt stand jedoch noch keine weitere Modellierungskompetenz hinter dieser Idee. In einem Modul namens „*MATEFF*“ sollten die ökonomischen Informationen eines makroökonomischen Modells in physische Produktionen übersetzt werden (Schade et al. 2009, S. 27). Hierbei handelte es sich jedoch um einen trivialen Ansatz, welcher keinerlei explizite Modellierung der Annahmen zu intra-industriellem Strukturwandel beinhaltete.

Dieser simple Ansatz wurde in Herbst et al. (2014a, S. 7) zu einer detaillierten angebotsorientierten Methode für die europäische Stahlindustrie⁷⁸ auf Produktebene weiter entwickelt. Wie in Abschnitt 5.2.2 ist der Haupttreiber dieses Verfahrens die Bruttowertschöpfungsentwicklung, diesmal liegt der Fokus jedoch nicht auf den stahlnachfragenden Sektoren, sondern auf der Bruttowertschöpfungsentwicklung der Eisen- und Stahlindustrie und somit der Angebotsseite (Herbst et al. 2014a, S. 6–7). Deren Ermittlung durch weitere Sektordifferenzierung wurde bereits in Abschnitt 5.2.1 erläutert.

Die Projektion der zukünftigen Stahlproduktion auf Produktebene erfolgt in Herbst et al. (2014a, S. 7) in vier Schritten:

⁷⁷ Die in Herbst et al. 2014a getroffenen Annahmen zur Sektordifferenzierung Metallprodukte weichen geringfügig von den in dieser Arbeit verbesserten Annahmen ab.

⁷⁸ Herbst et al. 2014a verwendeten denselben Ansatz auch für eine Projektion der Aluminiumindustrie.

Im ersten Schritt, wird die Bruttowertschöpfung der Eisen- und Stahlindustrie weiter in die Wertschöpfungsanteile spezifischer Produktgruppen (Oxygenstahl, Elektro Stahl, warmgewalzte Langprodukte, warmgewalzte Flachprodukte) und den Rest der Stahlindustrie aufgeteilt. Zur Vereinfachung wurde hier in Anlehnung an Renda et al. (2013, S. 26–27) angenommen, dass warmgewalzte Flachprodukte hauptsächlich in der Hochofenroute produziert werden, während warmgewalzte Langprodukte in erster Linie aus dem Elektroofenroute stammen. Um die Wertschöpfungsanteile der jeweiligen Walz-Produkte festlegen zu können musste ein spezifischer Wert, Euro Bruttowertschöpfung pro produzierte Tonne Stahlprodukt, ermittelt werden. Dies geschah mittels einer Näherung der Kostenstruktur pro Tonne der Flach- und Langprodukte, in welcher der Kostenanteil der Vorleistungen (Rohmaterialkosten, Energiekosten) von den gesamten Produktkosten abgezogen werden musste, um nur die tatsächlich dem Produktionsprozess zuordenbaren Kosten (Arbeitskosten, Overhead, sonstige Kosten) ermitteln zu können. (Herbst et al. 2014a, S. 7)

$$Value\ added_{i,2010} = Total\ cost\ of\ production_{i,2010} - Raw\ material\ costs_{i,2010} - Energy\ costs_{i,2010}$$

Für die Oxygenstahl und Elektro Stahlproduktion wurde ein analoger Ansatz gewählt bei dem ebenfalls die Kosten der Vorleistungen pro Tonne von den Rohmaterialkosten pro Tonne der Walzprodukte (lt. Annahme: Flachprodukte für Oxygenstahl, Langprodukte für Elektro Stahl) abgezogen wurden. (Herbst et al. 2014a, S. 7)

$$Value\ added_{BOF, 2010} = Raw\ material\ costs_{Shotrolledflat,2010} - Intermediate\ inputs_{BOF, 2010}$$

$$Value\ added_{EAF, 2010} = Raw\ material\ costs_{Shotrolledlong,2010} - Intermediate\ inputs_{EAF, 2010}$$

Um eine Näherung der gesamten Wertschöpfung pro Produkt für das Basisjahr zu erhalten wurden dann diese geschätzten Euro pro Tonnen mit den Produktionswerten des jeweiligen Produktes für das Basisjahr multipliziert und der Anteil der gesamten Wertschöpfung pro Produkt (Oxygenstahl, Elektro Stahl, warmgewalzte Langprodukte, warmgewalzte Flachprodukte, Rest der Stahlindustrie) an der gesamten Wertschöpfung der Stahlindustrie berechnet. (Herbst et al. 2014a, S. 7)

$$GVA_{i, 2010} = Value\ added_{i,2010} * Physical\ production_{i,2010}$$

$$\%GVA_{i,j\ 2010} = GVA_{i, 2010} / GVA_{j,2010}$$

Im zweiten Schritt wurde die Entwicklung der so berechneten Wertschöpfungsanteile dann für den restlichen Projektionszeitraum mittels einer Schätzung, welche auch entsprechende Überlegungen zur zukünftigen strukturellen Entwicklung der Branche (Prozesswechsel von primär zu sekundär Produktion, Entkopplung von Wertschöpfung und Produktion, etc.) beinhaltete, festgelegt, und die zukünftige Bruttowertschöpfungsentwicklung in Euro auf Produktebene berechnet (Herbst et al. 2014a, S. 7).

Im vorletzten Schritt musste dann die Projektion, der in Schritt eins ermittelten, spezifischen Werte (€/t) der unterschiedlichen Produkte durchgeführt werden. Die Werte des Basisjahres

(für alle Länder gleich) wurden mittels verschiedener Abklingfunktionen bis zum Ende des Projektionshorizontes simuliert, wobei für jede Produktgruppe unterschiedliche Annahmen zur Funktionsform getroffen wurden. Diese Annahmen spiegeln dabei die Szenario-Annahmen zu Materialstrategieverbesserungen wider. (Herbst et al. 2014a, S. 7)

Im vierten und letzten Schritt konnte dann, die zukünftige jährliche Produktion in physischen Tonnen Walzstahl (Langprodukte, Flachprodukte separat), Oxygenstahl und Elektrostahl mittels einer einfachen Division der jährlichen Bruttowertschöpfung durch den entsprechenden spezifischen Wert (€/t) berechnet werden. (Herbst et al. 2014a, S. 7)

Bei dem strengen Korrelationsverfahren handelt es sich im Vergleich zur Elastizitäten Methode bereits um einen detaillierteren Ansatz, welcher sich auf die Angebotsseite konzentriert. Intensiv wird die Entwicklung der Stahlindustrie (Bruttowertschöpfung aus dem makroökonomischen Modell ASTRA) betrachtet: d.h. Annahmen zu den inländischen stahlnachfragenden Sektoren werden nur qualitativ, bei der zukünftigen Wertschöpfungsverteilung der Stahlindustrie auf die unterschiedlichen Stahlprodukte, berücksichtigt. Strukturelle Änderungen wie Prozesswechsel (primär zu sekundär) und die Entkopplung von Wertschöpfung und Produktion (z.B. durch Produktion qualitativ hochwertigerer Produkte und produktbegleitende Dienstleistungen) werden durch die Annahmen zur zukünftigen Wertschöpfungsverteilung und die Abklingfunktionen der spezifischen Werte (€/t) der unterschiedlichen Produkte berücksichtigt. Nachfrageseitige Entwicklungen (z.B. Veränderungen in der Zusammensetzung) können jedoch nicht explizit abgebildet, und somit transparent modelliert werden, ebenso wenig wie Änderungen in den zugrunde liegenden Stoffströmen (z.B. tatsächliche Schrottverfügbarkeit, Änderungen der Recycling- und Schrottraten, etc.).

Ergebnisse und Annahmen des strengen Korrelationsverfahren für die europäische Stahlindustrie (Frankreich, Deutschland, Italien, Polen, Spanien, Großbritannien) können in Herbst et al. (2014a) nachgelesen werden⁷⁹. Basis der dort vorgestellten Fallstudie ist wie auch in dieser Arbeit das Referenzszenario des makroökonomischen Modells ASTRA aus dem europäischen ASSIST-(Assessing the Social and Economic Impacts of Past and Future Sustainable Transport)-Projekt (Krail und Schade 2014; Krail et al. 2014).

⁷⁹ Die in Herbst et al. 2014a getroffenen Annahmen zur Sektordifferenzierung Metallprodukte weichen geringfügig von den in dieser Arbeit verbesserten Annahmen ab.

5.2.4 Materialflussverfahren

Der dritte betrachtete Ansatz der Modellbildung zur physischen Produktion ist ein kombinierter Ansatz aus Regressionsanalysen, Expertenbefragung, und vereinfachter Materialflussmodellierung für die EU-27. Unter den hier vorgestellten Ansätzen ist das „Materialflussverfahren“ (Herbst et al. 2014b), wie dieser Ansatz nachfolgend genannt wird, das komplexeste, transparenteste und datenintensivste Vorgehen zur Modellierung der physischen Produktion, weshalb in dieser Arbeit auch der Fokus auf dieses Verfahren gelegt wurde. Die Methode kombiniert sowohl Aspekte der nachfrage- als auch der angebotsorientierten Analyse mit transparenter Modellierung von strukturellem Wandel (intra-sektoral und intra-industriell: Veränderungen in der Struktur der Nachfrage, Entkopplung von der Wertschöpfungsentwicklung, Materialstrategieänderungen). Auch können Annahmen zur Entwicklung des Außenhandels mit stahlhaltigen Gütern, des Schrott-Außenhandels und zur Wettbewerbsfähigkeit der Stahlindustrie getroffen werden, welche es dem Modellierer ermöglichen transparente und konsistente Szenario-Varianten zu berechnen. Ein erster Ansatz der nachfolgenden Methodik wurde bereits in einer früheren, jedoch weitaus vereinfachteren Version, im Rahmen eines Konferenzbeitrags für die *ECEEE 2014 Industrial Summer Study* (Herbst et al. 2014b)⁸⁰ veröffentlicht.

Die nachfolgende Methodenbeschreibung wurde in zwei Themenbereiche aufgeteilt:

- die Regressionsanalyse des sichtbaren Stahlverbrauchs und der Rohstahlproduktion, sowie
- die Materialflussanalyse unter der Berücksichtigung von Materialstrategieverbesserungen (MSV).

Diese Trennung begründet sich in den methodischen Unterschieden dieser beiden Verfahren und trägt zur besseren Lesbarkeit des Kapitels bei.

5.2.4.1 Methodik: Regressionsanalyse

Sichtbarer Stahlverbrauch

In Anlehnung an Herbst et al. (2014b, S. 207) wurde der sichtbare Stahlverbrauch (sSV) eines Landes (*i*) in Abhängigkeit von der Entwicklung der Wertschöpfung in den stahlnachfragenden Sektoren - Baugewerbe (*Bau*), Metallerzeugung und -bearbeitung (*MEuB*), Fahrzeugbau (*FaBau*), Maschinenbau und andere metallverarbeitende Industrien (*MaBau*) – unter der Be-

⁸⁰ Herbst, Andrea; Fleiter, Tobias; Jochem, Eberhard (2014): Modelling recycling and material efficiency trends in the European steel industry. Eceee 2014 Industrial Summer Study proceedings. Papendal, Arnhem, the Netherlands.

rücksichtigung von Länder-Dummies (*LD*) bzw. fixen Effekten und optionalen Zeit-Dummies (*ZD*) bzw. Zeit-fixen-Effekten geschätzt (Gleichung M.I)⁸¹.

Dieser Ansatz wurde gewählt um die ökonomische Information aus dem makroökonomischen Modell in eine physische Größe, welche die inländische Nachfrage nach Halb- und Fertigzeugnissen der Stahlindustrie (nach Handel) widerspiegelt, zu übersetzen. Wie in Herbst et al. (2014b, S. 207) erläutert, stammt das Konzept des „sichtbaren Stahlverbrauchs“⁸² von der World Steel Association (2012, S. 2) (Definition siehe Fußnote).

Die nachfolgende Vorgehensweise zur Qualitätskontrolle der Modelle wurden in Anlehnung an Torres-Reyna (2013) und Murphy (2013, 107ff) durchgeführt.

$$sSV_{i(t)} = \beta_1 + \beta_2 * Bau_{i(t)} + \beta_3 * MEuB_{i(t)} + \beta_4 * FaBau_{i(t)} + \beta_5 * MaBau_{i(t)} [+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \quad (M.I)$$

Wie in Herbst et al. (2014b, S. 207) wird in der hier durchgeführten Regressionsanalyse ein Panel von 23 Ländern (Belgien/Luxemburg, Deutschland, Dänemark, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Lettland, Litauen, Niederlande, Polen, Portugal, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn, Österreich, Zypern) über einen Zeitraum von 33 Jahren (*t*; 1974-2007) betrachtet.⁸³ Je nach Variable und Land können die betrachteten Zeitreihen kürzer als die angegebenen 33 Jahre sein, da es sich um ein unausgeglichenes Panel handelt. (vgl. Herbst et al. (2014b, S. 207))

Erwartet wird ein positiver Zusammenhang zwischen sichtbarem Stahlverbrauch und der Wertschöpfungsentwicklung der stahlnachfragenden Branchen, welcher jedoch durch Trends zu höherer Wertschöpfung (z.B. Trend zu produktbegleitenden Dienstleistungen der Abnehmerbranchen) etwas geschwächt werden könnte (Tabelle 23⁸⁴).

⁸¹ vgl. Kapitel 4.

⁸²Definition des sichtbaren Stahlverbrauchs laut World Steel Association 2012, S. 2: Sichtbarer Stahlverbrauch (Stahl-Fertigprodukt Äquivalent) = inländ. Lieferungen (Stahl-Fertigprodukt Äquivalent) – Exporte (Stahl-Fertigprodukt Äquivalent) + Importe (Stahl-Fertigprodukt Äquivalent).

⁸³ vgl. Kapitel 4.

⁸⁴ Vorgehen in Anlehnung an Murphy 2013, S. 96–97.

Tabelle 23: Erwartete Zusammenhänge: sichtbarer Stahlverbrauch

Variable	Zusammenhang	Begründung
Baugewerbe (<i>Bau</i>)	positiv	Tendenziell wird ein positiver Zusammenhang mit der Wertschöpfung aller stahlnachfragenden Sektoren vermutet. Eventuell können Trends zu höherer Wertschöpfung diesen Zusammenhang schwächen.
Metallerzeugung und -bearbeitung (<i>MEuB</i>)	positiv	
Fahrzeugbau (Transportmittel) (<i>FaBau</i>)	positiv	
Maschinenbau und andere metallverarbeitende Industrien (<i>MaBau</i>)	positiv	

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten der abhängigen und unabhängigen Variablen bestätigt den vermuteten signifikant positiven Zusammenhang zwischen sichtbarem Stahlverbrauch (*sSV*) und der Wertschöpfungsentwicklung der stahlnachfragenden Branchen (Tabelle 24⁸⁵), deutet jedoch auch auf starke Korrelation zwischen den erklärenden Variablen hin (Multikollinearität).

Tabelle 24: Korrelationskoeffizienten sichtbarer Stahlverbrauch

	<i>sSV</i>	<i>Bau</i>	<i>MEuB</i>	<i>FaBau</i>	<i>MaBau</i>
<i>sSV</i>	1				
<i>Bau</i>	0,7155	1			
<i>MEuB</i>	0,5452	0,8755	1		
<i>FaBau</i>	0,6858	0,8247	0,8743	1	
<i>MaBau</i>	0,7660	0,8817	0,8894	0,9671	1

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Aus diesem Grund wurde ein alternativer Regressionsansatz über das Wertschöpfungsaggregat der stahlnachfragenden Branchen (*StahlNachfrager*; Summe Bruttowertschöpfung Baugewerbe, Metallerzeugung und -bearbeitung, Fahrzeugbau, Maschinenbau) gewählt (Gleichung M.II). Dies ist möglich, da der Autor nicht explizit an den Effekten der einzelnen Sektoren auf die Nachfrage interessiert ist und für alle Sektoren der gleiche positiv signifikante Zusammenhang vermutet wird.

$$sSV_{i(t)} = \beta_1 + \beta_2 * StahlNachfrager_{i(t)} [+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \quad (M.II)$$

⁸⁵ Vorgehen in Anlehnung an Murphy 2013, S. 107.

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

Da nur eine erklärende Variable verwendet wird müssen keine vorläufigen Regressionen durchgeführt werden um das „beste“ Modell identifizieren. Die Schätzung der Gleichung M.II erfolgte in ersten Differenzen, da Tests auf Nicht-Stationarität das Vorhandensein nicht stationärer Reihen bestätigte (Tabelle 25).

Tabelle 25: Test auf Nicht-Stationarität: sichtbarer Stahlverbrauch

Variable	Statistik		p-Wert
Im-Pesaran-Shin⁸⁶			
<i>sSV</i>	$Z_{t \sim bar}$	3,4715	0,9997
<i>StahlNachfrager</i>	$Z_{t \sim bar}$	17,0960	1,0000
ΔsSV	$Z_{t \sim bar}$	-15,0502	0,0000
$\Delta StahlNachfrager$	$Z_{t \sim bar}$	-6,7186	0,0000
Fisher⁸⁷ [ADF, lags(0)]			
<i>sSV</i>	<i>Z</i>	3,0067	0,9987
<i>StahlNachfrager</i>	<i>Z</i>	8,9598	1,0000
ΔsSV	<i>Z</i>	-26,2665	0,0000
$\Delta StahlNachfrager$	<i>Z</i>	-8,5602	0,0000

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Zusätzlich wurde ein Hausman-Spezifikations-Test durchgeführt, um die Notwendigkeit fixer Effekte (Länder-Effekte) zu testen.⁸⁸ Im betrachteten Fall (Tabelle 26) kann die Nullhypothese zurückgewiesen werden, was impliziert, dass das bevorzugte Modell ein Fixed-Effects-Modell ist.

⁸⁶AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert

⁸⁷AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert, Drift-Term: nicht inkludiert

⁸⁸ Durchgeführte Tests und Gütekriterien zur Überprüfung der Modellqualität wurden bereits in Kapitel 4 detailliert beschrieben.

Tabelle 26: Hausman-Spezifikations-Test: sichtbarer Stahlverbrauch

ΔsSV	Regressionsergebnis	
$\Delta StahlNachfrager$	0,0000677***	0,0000576***
Fixed-Effects	Ja	Nein
Random-Effects	Nein	Ja
Konstante	17289,68	31090,03
R^2 within	0,1301	0,1301
F-Wert	0,0000	0,0000
Anzahl Beobachtungen	571	571
Hausman-Spezifikations-Test		
$\chi^2(2) = (b-B)'[(V_b - V_B)^{-1}](b-B)^{89}$	8,94	
Prob> χ^2	0,0028	

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)⁹⁰

* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$

Beim Lagram-Multiplikator Test zur Überprüfung von Reihenkorrelation kann die Nullhypothese nicht zurückgewiesen werden (Tabelle 27), woraus geschlossen werden kann, dass keine Autokorrelation vorliegt. Die Ergebnisse des Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeits-Test lassen jedoch auf „cross sectional dependence“ schließen (Tabelle 28), weshalb die Schätzungen der Verhaltensgleichungen mit einem der folgenden robusten Schätzverfahren durchgeführt werden sollten, welche Hoechle (2007, S. 285) in einer Übersicht zur robusten Schätzung (Heteroskedastizität, Autokorrelation, Querschnittsabhängigkeit) von linearen Panel-Daten-Modellen dargestellt: den GLS⁹¹-Schätzer (StataCorp. 2016c), den PSCE⁹²-Schätzer (StataCorp. 2016d) und den XTSCC-Schätzer (Hoechle 2007). Der GLS-Schätzer ist in dem betrachteten Panel nicht anwendbar, da es sich um ein unausgeglichenes Panel handelt.

Tabelle 27: Lagram-Multiplier-Test⁹³: sichtbarer Stahlverbrauch

Variablen	Ergebnis	
ΔsSV	F(1,21)	0,246
$\Delta StahlNachfrager$	Prob > F =	0,6249

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

⁸⁹ $V_b - V_B$ ist nicht positiv definit.

⁹⁰ xtreg, fe und xtreg, re ohne die Option robust.

⁹¹ Generalized Least Squares.

⁹² Panel-Corrected Standard Errors.

⁹³ Wooldridge-Test für Autokorrelation in Paneldaten.

Tabelle 28: Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeits-Test: sichtbarer Stahlverbrauch

	Ergebnis
Pesaran's Querschnitts Unabhängigkeitstest	20,148
Pr	0,0000
Durchschnittlicher absoluter Wert der nicht-diagonalen Elemente	0,336

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Tabelle 29: Modifizierter-Wald-Test auf Heteroskedastizität: sichtbarer Stahlverbrauch

	Ergebnis
Chi2(23)	3,3e+06
Prob>chi2	0,0000

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Der modifizierte Wald-Test auf Heteroskedastizität weist die Nullhypothese (Homoskedastizität) zurück und bestätigt somit das Vorhandensein von Heteroskedastizität.

Regressionsergebnisse der unterschiedlichen Schätzverfahren mit und ohne Berücksichtigung von Zeit-Effekten (Zeit-Dummies) bestätigen den vermuteten signifikant positiven Zusammenhang zwischen der Wertschöpfung der stahlnachfragenden Sektoren und dem sichtbaren Stahlverbrauch eines Landes. Zusätzlich dazu scheint es sich um robuste Parameterschätzungen zu handeln, da trotz unterschiedlicher Schätzverfahren dieselben/sehr ähnliche Koeffizienten geschätzt wurden (Tabelle 30). Entsprechend diesem Ergebnis scheinen alle geschätzten Modelle als mögliche Verhaltensgleichung in Frage zu kommen. In der weiteren Arbeit wurde das Regressionsergebnis auf Basis der Driscoll-Kraay Standardfehler Schätzung unter der Berücksichtigung von Zeit- und Länder-Dummies (Modell a) für die Projektion des zukünftigen sichtbaren Stahlverbrauchs gewählt. Für die Projektion wird in diesem Modell ein durchschnittlicher Zeit-Dummy basierend auf den historischen Zeit-Dummies gewählt.

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

Tabelle 30: Regressionsergebnisse sichtbarer Stahlverbrauch, Differenzen

ΔsSV	Modell a	Modell b	Modell c	Modell d	Modell e	Modell f
	XTSCC (DV)	XTSCC (fe)	XTPCSE (DV, casewise)	XTSCC (DV)	XTSCC (fe)	XTPCSE (DV, casewise)
Δ Stahl-Nachfrager	0,00005457**	0,00005457**	0,00005457***	0,00006774**	0,00006774**	0,00006774***
Länder-Dummies	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeit-Dummies	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Belgien Lux	35435,36		35435,36	-15970,769		-15970,769
Dänemark	10130,467		10130,467	-38740,006		-38740,006
Deutschland	260465,85		260465,85	168891,3		168891,39
Estland	-14862,323		-14862,323	-6700,4003		-6700,4003
Finnland	12523,028		12523,028	-40930,306		-40930,306
Frankreich	-97326,351		-97326,351	-158746,34		-158746,34
Griechenland	94416,656		94416,656	45308,243		45308,243
Großbritannien	-221536,73		-221536,73	-283745,63*		-283745,63
Irland	11666,437		11666,437	-40107,861*		-40107,861
Italien	391490,83		391490,83	314020,79		314020,79
Lettland	-10394,426		-10394,426	-2240,2458		-2240,2458
Litauen	-2609,8276		-2609,8276	4587,9541		4587,9541
Niederlande	-7147,6895		-7147,6895	-58292,465		-58292,465
Polen	276000,48		276000,48	262647,68		262647,68
Portugal	83190,911		83190,911	31175,527		31175,527
Schweden	-899,68438		-899,68438	-56530,629		-56530,629
Slowakei	40505,22		40505,226	43349,218		43349,218
Slowenien	0		(entfallen)	0		(entfallen)
Spanien	337517,9		337517,9	260200,56		260200,56
Tschechien	-1010061		-1010061*	-1294083,1		-1294083,1*
Ungarn	-16751,785		-16751,785	28257,331		28257,331
Österreich	20032,884		20032,884	-35161,188		-35161,188
Zypern	-23472,798		-23472,798	-14634,062		-14634,062
Konstante	48265,009	85257,513	48265,009	32896,213*	17289,683	32896,213
R ²	0,35613446		0,35613446	0,1506408		0,1506408
Root MSE	1005291,1		1005291,1	1120340,2		1120340,2
F-Wert						
Anzahl Beobachtungen	571	571	571	571	571	571

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

Rohstahlproduktion

Wie auch für den sichtbaren Stahlverbrauch wurde zur Ermittlung einer Verhaltensgleichung für die Projektion der zukünftigen Rohstahlproduktion (*RSP*) eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die Regressionen zur Rohstahlproduktion wurden in Anlehnung an Arbeiten von Flues et al. 2013 durchgeführt. Flues et al. 2013 untersuchten in ihrer Arbeit den Einfluss von Rohstoff- und Energie-Preisen aber auch Arbeitskosten und Bruttoanlageinvestitionen, sowie Wirtschaftsentwicklung und öffentlichen Politikmaßnahmen auf das Erreichen einer nachhaltigen Stahlproduktion und deren Auswirkungen auf diese. Während sich Flues et al. (2013, S. 2) in ihrer Analyse auf die fünf wichtigsten Stahlproduzenten reduzieren (1990-2010: Flues et al. (2013, S. 11–15)), wird in nachfolgendem Ansatz versucht ein ganzheitlicheres Bild der europäischen Stahlindustrie zu zeichnen. Betrachtet wird ein Panel von 22 Ländern (*i*; Belgien/Luxemburg, Bulgarien, Deutschland, Dänemark, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Lettland, Niederlande, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn, Österreich⁹⁴) über einen Zeitraum von 34 Jahren (*t*; 1978-2012). Je nach Variable und Land können die betrachteten Zeitreihen kürzer als die angegebenen 34 Jahre sein, dass es sich um ein unausgeglichenes Panel handelt.

Im Gegensatz zu Flues et al. (2013, S. 7) wird nicht das Bruttoinlandsprodukt als stellvertretende Variable für die Stahlnachfrage genutzt, sondern der sichtbare Stahlverbrauch (*sSV*) eines Landes, als besser geeignete erklärende Variable für den Nachfrage-Zusammenhang, gewählt. Als weitere erklärende Variablen wurden wie in Flues et al. (2013, S. 6) die Preise der wichtigsten Rohstoffe der Stahlindustrie (Kohle P^{Koh} , Strom P^{Str} , Gas P^{Gas} , Eisenerz P^{Eis} , und Schrott P^{Sch}) eingesetzt, wobei für den Kohle-Preis, den Eisenerz-Preis und den Schrott-Preis jedoch nur ein beschränkter Zusammenhang mit der Rohstahlproduktion erwartet wird (Tabelle 31). Weitere Unterschiede zu Flues et al. (2013, S. ff) sind die Vernachlässigung der Arbeitskosten (diese haben nur einen verhältnismäßig geringen Anteil an den Kosten der Rohstahlproduktion) und des Anteils der privaten Bruttoanlageinvestitionen am Bruttoinlandsprodukt⁹⁵ in dem hier angewandten Ansatz. Des Weiteren wurde der Revealed Comparative Advantage⁹⁶ (RCA^{Stahl}) der Stahlindustrie als zusätzliche erklärende Variable eingeführt, welcher eine Näherungsgröße für den Vergleich der Wettbewerbsfähigkeit der Stahlindustrie und eine Stellschraube für z.B. den Verlust von Wettbewerbsfähigkeit durch höhere Umweltstandards, etc. darstellt. Die nachfolgende Vorgehensweise zur Qualitätskontrolle der

⁹⁴ Analyse ohne Estland und Litauen, da diese nur über wenige Jahre sehr geringe Mengen an Rohstahl produziert haben.

⁹⁵ Autor vermutet wenig Aussagekraft für zukünftige Entwicklung, da es sich bei den großen Stahlproduzenten um internationale Unternehmen mit dem Ziel der Profitmaximierung handelt, mit steigenden Energiekosten und Umweltauflagen erscheinen zukünftige größere Anlageinvestitionen in Europa als eher unwahrscheinlich.

⁹⁶ RCA der Stahlindustrie = (Handelswert der Stahlexporte / Handelswert der Stahlimporte) / (Handelswert aller Exporte / Handelswert aller Importe) (Gerspacher et al. 2011, S. 25)

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

Modelle wurden in Anlehnung an Torres-Reyna (2013) und Murphy (2013, 107ff) durchgeführt.

$$RSP_{i(t)} = \beta_1 + \beta_2 * sSV_{i(t)} + \beta_3 * P_{(t)}^{Koh} + \beta_4 * P_{i(t)}^{Str} + \beta_5 * P_{(t)}^{Gas} + \beta_6 * P_{(t)}^{Eis} + \beta_7 * P_{(t)}^{Sch} + \beta_8 * RCA_{i(t)}^{Stahl} [+LD + ZD] + \varepsilon_{i(t)} \quad (M.III)$$

Tabelle 31: Erwartete Zusammenhänge Rohstahlproduktion⁹⁷

Variable	Zusammenhang	Begründung
Sichtbarer Stahlverbrauch (sSV)	positiv	Erwartet wird ein signifikant positiver Zusammenhang, da die inländische Nachfrage nach Stahl ein wichtiger Treiber der Rohstahlproduktion ist (Stichwort Verbundproduktion).
Kohle-Preis (P^{Koh})	negativ	Der Kohle-Preis spielt bei der Koksherstellung in der Hochofenroute eine Rolle, weshalb ein negativer Zusammenhang mit der gesamten Rohstahlproduktion vermutet wird. Des Weiteren wird vermutet, dass durch die Abhängigkeit der Produktion von qualitativ höherwertigen Produkten von der Hochofenroute die Akzeptanz gegenüber Kohle-Preissteigerungen größer ist.
Strom-Preis (P^{Str})	negativ (bei Elektrostahl)	Erwartet wird ein negativer Zusammenhang mit der Rohstahlproduktion, da Strom einen der wichtigsten Input-Faktoren der sekundären Produktionsroute darstellt, und diese in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen hat.
Gas-Preis (P^{Gas})	negativ (bei Oxygenstahl)	Erwartet wird ein negativer Zusammenhang mit der Rohstahlproduktion, da Gas einen wichtigen Input-Faktor der primären Produktionsroute darstellt.
Eisenerz-Preis (P^{Eis})	schwach negativ	Die Erwartungen gestalten sich analog zu den zuvor getroffenen Annahmen zum Kohle-Preis.
Schrott-Preis (P^{Sch})	schwach negativ (bei Elektrostahl)	Erwartet wird ein negativer Zusammenhang mit der Rohstahlproduktion, da Schrott einen der wichtigsten Input-Faktoren der sekundären Produktionsroute darstellt. Da eventuell in der Vergangenheit noch keine signifikante Verknappung dieses Input-Faktors stattgefunden hat wird nur ein schwacher Zusammenhang vermutet.
Revealed Comparative Advantage der Stahlindustrie (RCA)	positiv	Zwischen dem RCA der Stahlindustrie und der Rohstahlproduktion wird ein positiver Zusammenhang vermutet, da bei der Produktion qualitativ höherwertiger Produkte (welche intensiv gehandelt werden) Kostenaspekte eine verhältnismäßig untergeordnete Rolle spielen und höhere Kapazitäten im optimalen Größenbereich zu weiteren Wettbewerbsvorteilen führen können.

⁹⁷ Vorgehen in Anlehnung an Murphy 2013, S. 96–97.

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

Eine Analyse der Korrelationskoeffizienten der betrachteten Variablen (Tabelle 32⁹⁸) bestätigt auf den ersten Blick nur den erwarteten positiven Zusammenhang zwischen sichtbarem Stahlverbrauch und Rohstahlproduktion, während für die restlichen unabhängigen Variablen keine starke Korrelation mit der Rohstahlproduktion für das Panel festgestellt werden konnte. Auch lassen sich die erwarteten negativen Preiseffekte auf die Rohstahlproduktion mehrheitlich nicht bestätigen, zumindest jedoch ein positiver Zusammenhang mit dem RCA der Stahlindustrie. Die hohen Korrelationen zwischen Kohle-, Gas-, Eisen- und Schrott-Preis deuten auf Multikollinearität bei Berücksichtigung aller Parameter in der Regression hin.

Tabelle 32: Korrelationskoeffizienten Rohstahlproduktion gesamtes Panel (1978-2012)

	<i>RSP</i>	<i>sSV</i>	<i>p^{Koh}</i>	<i>p^{Str}</i>	<i>p^{Gas}</i>	<i>p^{Eis}</i>	<i>p^{Sch}</i>	<i>RCA</i>
<i>RSP</i>	1							
<i>sSV</i>	0,9522	1						
<i>p^{Koh}</i>	0,0104	0,0094	1					
<i>p^{Str}</i>	0,1957	0,2174	0,4422	1				
<i>p^{Gas}</i>	0,0196	0,0185	0,8876	0,4747	1			
<i>p^{Eis}</i>	-0,0014	0,0224	0,8479	0,3952	0,8395	1		
<i>p^{Sch}</i>	0,0386	0,0422	0,7624	0,4637	0,8038	0,7865	1	
<i>RCA</i>	0,0235	-0,0701	-0,0756	-0,1667	-0,0940	-0,1082	-0,0928	1

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Die Schätzung der Gleichung M.III erfolgte in ersten Differenzen, da Tests auf Nicht-Stationarität das Vorhandensein nicht stationärer Reihen bestätigte (Tabelle 33)

⁹⁸ Vorgehen in Anlehnung an Murphy 2013, S. 107.

Tabelle 33: Test auf Nicht-Stationarität: Rohstahlproduktion

Variable	Statistik		p-Wert
Im-Pesaran-Shin ⁹⁹			
<i>RSP</i>	$Z_{t \sim bar}$	-1,2612	0,1036
<i>sSV</i>	$Z_{t \sim bar}$	-2,6272	0,0043
<i>p^{Koh}</i>	$Z_{t \sim bar}$	-2,7825	0,0027
<i>p^{Str}</i>	$Z_{t \sim bar}$	1,7479	k.A.
<i>p^{Gas}</i>	$Z_{t \sim bar}$	5,3135	1,0000
<i>p^{Eis}</i>	$Z_{t \sim bar}$	1,3693	0,9145
<i>p^{Sch}</i>	$Z_{t \sim bar}$	-2,1809	0,0146
<i>RCA</i>	$Z_{t \sim bar}$	-1,6692	0,0475
ΔRSP	$Z_{t \sim bar}$	-14,5777	0,0000
ΔsSV	$Z_{t \sim bar}$	-15,0593	0,0000
Δp^{Koh}	$Z_{t \sim bar}$	-18,4926	0,0000
Δp^{Str}	$Z_{t \sim bar}$	-10,8291	k.A.
Δp^{Gas}	$Z_{t \sim bar}$	-13,3894	0,0000
Δp^{Eis}	$Z_{t \sim bar}$	-18,2593	0,0000
Δp^{Sch}	$Z_{t \sim bar}$	-16,6887	0,0000
ΔRCA	$Z_{t \sim bar}$	-14,8958	0,0000
Fisher ¹⁰⁰ [ADF, lags(0)]			
<i>RSP</i>	<i>Z</i>	-1,2599	0,1039
<i>sSV</i>	<i>Z</i>	-2,6842	0,0036
<i>p^{Koh}</i>	<i>Z</i>	-2,6952	0,0035
<i>p^{Str}</i>	<i>Z</i>	1,9020	0,9714
<i>p^{Gas}</i>	<i>Z</i>	5,5794	1,0000
<i>p^{Eis}</i>	<i>Z</i>	1,9504	0,9744
<i>p^{Sch}</i>	<i>Z</i>	-1,9756	0,0241
<i>RCA</i>	<i>Z</i>	-2,7212	0,0033
ΔRSP	<i>Z</i>	-22,9628	0,0000
ΔsSV	<i>Z</i>	-23,2840	0,0000
Δp^{Koh}	<i>Z</i>	-31,1024	0,0000
Δp^{Str}	<i>Z</i>	-16,8126	0,0000
Δp^{Gas}	<i>Z</i>	-18,3776	0,0000
Δp^{Eis}	<i>Z</i>	-30,3478	0,0000
Δp^{Sch}	<i>Z</i>	-25,8062	0,0000
ΔRCA	<i>Z</i>	-24,7181	0,0000

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Zunächst wurde eine „pooled“ Regression aller Variablen, sowie auch ein Least-square-dummy-variable Modell (fixe Effekte durch Länder-Dummies; *LD*) mit und ohne die Berück-

⁹⁹AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert

¹⁰⁰AR Parameter: Panel-spezifisch, Panel Durchschnitte: inkludiert, Zeittrend: nicht inkludiert, Drift-Term: nicht inkludiert

sichtigung von Zeiteffekten (Zeit-Dummies; *ZD*) durchgeführt (Tabelle 34). In den Modellen A bis D wird, entsprechend den zuvor getroffenen Annahmen ein durchwegs signifikant positiver Zusammenhang zwischen Rohstahlproduktion und dem inländischen sichtbaren Stahlverbrauch, welcher die inländische Nachfrage an Halb- und Fertigprodukten der Stahlindustrie widerspiegelt, sowie dem RCA der Stahlindustrie festgestellt (Tabelle 34). Zusätzlich bestätigen die Modelle A und B (ohne Zeit-Effekte) einen signifikant negativen Zusammenhang zwischen Produktion und Strompreis, während die anderen Energieträgerpreise keinerlei signifikanten Einfluss auf die Rohstahlproduktion zu haben scheinen. Für den Schrott-Preis wird ein, im Gegensatz zu den Erwartungen, signifikant positiver Zusammenhang identifiziert. In den Modellen C und D, welche auch Zeit-Dummies berücksichtigen, sind die Preise (mit Ausnahme des Strom-Preises) mehrheitlich signifikant, wenn auch nicht immer mit den erwarteten Vorzeichen (Tabelle 34).

Intuitiv wäre Modell C, mit der größten Anzahl signifikanter Variablen, deren Vorzeichen auch den Erwartungen entsprechen, zur weiteren Analyse am besten geeignet. Jedoch ergaben weitere Regressionen dieses Modells in verschiedenen reduzierten Formen (Tabelle 35), d.h., ohne Strom-Preis (nicht signifikant), ohne Kohle-Preis (falsches Vorzeichen, nicht signifikant) und Eisenerz-Preis (falsches Vorzeichen, nicht signifikant), auch keine eindeutigen Ergebnisse über den Zusammenhang von Schrott- und Gas-Preis mit der Rohstahlproduktion (Zshg. wider Erwartung bzw. Vorzeichenwechsel und fehlende Signifikanz, Tabelle 35).

Ursache hierfür kann die zuvor erwähnte starke Korrelation zwischen Gas- und Schrott-Preis, aber auch mit den anderen Preisen (Kohle und Eisenerz), sein. Da eine Modellierung eines positiven Zusammenhanges mit dem Schrottpreis für die Projektion der zukünftigen Rohstahlproduktion nicht sinnvoll erscheint (bei steigendem Anteil der Elektrostahlproduktion und eventuell zukünftiger Verknappung der Ressource Schrott wird ein (schwach) negativer Zusammenhang zwischen Schrottpreis und zukünftiger Stahlproduktion erwartet), wurde ein Modell basierend auf den „unkorrelierten“ erklärenden Variablen sichtbarer Stahlverbrauch, Strom-Preis und RCA gewählt.

Tabelle 34: Vorläufige Regressionsergebnisse Rohstahlproduktion, Differenzen

ΔRohstahl- produktion	Modell A	Modell B	Modell C	Modell D	Modell E	Modell F	Modell G	Modell H
ΔSichtbarer Stahlverbrauch	0,48529807***	0,48368248***	0,47866209***	0,47778369***	0,55137462***	0,55049693***	0,47866209***	0,47778369***
ΔKohle-Preis	3728,8297	3345,6156	16333,636**	15819,39*				
ΔStrom-Preis	-13064,18**	-13377,095**	852,05899	698,63721	-9042,6633*	-9548,4949*	852,05899	698,63721
ΔGas-Preis	-23439,701	-22649,104	-70554,127*	-75130,789*				
ΔEisenerz-Preis	7095,1044	7030,3411	39117,98***	37827,196***				
ΔSchrott-Preis	4202,4123***	4305,0174***	-5730,3321*	-5151,2401				
ΔRCA der Stahlindustrie	435696,16***	443001,14***	267057,14*	269397,3*	464587,76***	473823,5***	267057,14*	269397,3*
Länder- Dummies	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
Zeit-Dummies	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
Konstante	-48025,567	105470,18	-578960,67***	-423667	-40382,833	-1879,4283	-65280,315	73045,641
R ²	0,55120056	0,55771011	0,60597429	0,61274907	0,51042289	,51677076	0,60597429	0,61274907
Root MSE	995444,35	1007640,7	962836,25	974573,48	1035297,2	1048624	962836,25	974573,48
F-Wert								
Anzahl Be- obachtungen	479	479	479	479	479	479	479	479

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

Tabelle 35: Reduzierte Formen von Modell C

Δ Rohstahlproduktion	Modell C_1	Modell C_2	Modell C_3	Modell C_4
Δ Sichtbarer Stahlverbrauch	0,49895089***	0,50063289***	0,55708791***	0,55947792***
Δ Kohle-Preis	1464,708			
Δ Strom-Preis				
Δ Gas-Preis	-41226,851**	-37169,386**	12049,914	
Δ Eisenerz-Preis	3565,6118			
Δ Schrott-Preis	4725,3401***	5549,2391***		
Δ RCA der Stahlindustrie	431920***	444054,96***	424079,32***	423867,7***
Länder-Dummies	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeit-Dummies	Nein	Nein	Nein	Nein
Konstante	-69716,68	-62528,436	-64688,068	-52543,956
R ²	0,54943506	0,54828348	0,51351181	0,51300445
Root MSE	941440,86	940993,76	975687,22	975345,14
F-Wert				
Anzahl Beobachtungen	598	598	598	598

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

In den Modellen E bis H werden die Verhaltensgleichungen für die reduzierte Form geschätzt (Tabelle 34). Nur ohne die Berücksichtigung von Zeit-Dummies (deren Mehrwehrt in einem Differenzenmodell, welches in erster Linie ein Modell zur Abbildung kurzfristiger Effekte darstellt, beschränkt ist) können in diesem Modell alle erwarteten Zusammenhänge gewährleistet werden (E und F).

Um nun die Notwendigkeit fixer Effekte (Länder-Dummies) zu testen, bzw. die Möglichkeit, dass nicht doch eher ein Random-Effects-Modell vorliegt, wurde ein Hausman-Spezifikations-Test für das Modell F durchgeführt (Tabelle 36). Im betrachteten Fall kann die Nullhypothese nicht zurückgewiesen werden, was impliziert, dass das bevorzugte Modell ein Random-Effects-Modell ist. Um dies zu überprüfen wurde ein weiterer Test durchgeführt, der Breusch-Pagan-Lagrangian-Multiplier-Test (Tabelle 37), welcher im betrachteten Fall die Nullhypothese nicht zurückweisen kann, und somit ein einfaches Modell ohne Random-Effects (und ohne Fixed-Effects) zu bevorzugen ist. Eine weitere wichtige Teststatistik ist der Lagrange-Multiplikator Test zur Überprüfung von Reihenkorrelation, welcher auf Autokorrelation in den betrachteten Reihen hindeutet (Tabelle 38).

Tabelle 36: Hausman-Spezifikations-Test

ΔRSP	Modell F	
Δ Sichtbarer Stahlverbrauch	0,5504969	0,5513746
Δ Strom-Preis	-9548,495	-9042,663
ΔRCA	473823,5	464587,8
Fixed-Effects	Ja	Nein
Random-Effects	Nein	Ja
Konstante	-40116,4	-40382,83
R^2 within	0,5124	0,5124
F-Wert	0,0000	0,0000
Anzahl Beobachtungen	479	479
Hausman Spezifikations-Test		
$\chi^2(2) = (b-B)'[(V_b - V_B)^{-1}](b-B)^{101}$	0,24	
Prob> χ^2	0,8864	

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)¹⁰²

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

Tabelle 37: Breusch-Pagan-Lagrangian-Multiplikator-Test

	Var	sd = sqrt(Var)
ΔRSP	2,18e+12	1474984
e	1,10e+12	1048624
u	0	0
chibar2(01)	0,00	
Prob>chibar2	1,0000	

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

Tabelle 38: Lagram-Multiplikator-Test¹⁰³

Variablen	Ergebnis	
ΔsSV	F(1,18)	5,137
Δ Strom-Preis	Prob > F =	0,0360
ΔRCA		

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

¹⁰¹ $V_b - V_B$ ist nicht positiv definit

¹⁰² xtreg, fe und xtreg, re ohne die Option robust

¹⁰³ Wooldridge-Test für Autokorrelation in Paneldaten.

Der Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeits-Test konnte nicht für das gesamte Panel durchgeführt werden, da für einzelne Länder die Zeitreihen der Strom-Preise zu kurz (oder nicht vorhanden) waren um einen gültigen Test über das ganze Panel durchzuführen. Deshalb wurde stellvertretend ein Test für ein kleineres Panel, bestehend aus den Ländern mit den vollständigsten Zeitreihen (Deutschland, Dänemark, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Niederlande, Polen, Portugal, Schweden, Slowakei, Spanien, Ungarn, Österreich) getestet. Für diese Länder konnte die Nullhypothese zurückgewiesen werden, weshalb in dem reduzierten Datenset von “cross-sectional dependence” ausgegangen werden kann (Tabelle 39). Der Autor trifft die Annahme, dass dies auch für den gesamten Datensatz zutreffend ist.

Tabelle 39: Pesaran-Querschnitts-Unabhängigkeits-Test

	Ergebnis
Pesaran's Querschnitts Unabhängigkeitstest	6,827
Pr	0,0000
Average absolute value of the off-diagonal elements	0,241

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

In Hoechle (2007, S. 285) wird eine Übersicht ausgewählter Ansätze zur robusten Schätzung von linearen Panel-Daten-Modellen dargestellt und der GLS-Schätzer, der PSCE-Schätzer, und der XTSCC-Schätzer als robust gegenüber Heteroskedastizität, Autokorrelation und Querschnittsabhängigkeit identifiziert. Nachfolgend wird deshalb das Modell E (ohne Länder- und Zeit-Dummies) noch einmal mit den Stata-Befehlen xtpcse, und xtscs geschätzt (eine GLS-Schätzung unter Spezifizierung von Heteroskedastizität, Autokorrelation und Querschnittsabhängigkeit war aufgrund der Unausgeglichenheit des Panels nicht möglich). Die neuerliche robuste Regression (Tabelle 40) ergab in beiden Schätzverfahren keinen signifikanten Zusammenhang mit dem Strompreis, weshalb noch einmal die reduzierte Form I (ohne Strom-Preis) geschätzt wurde. Der RCA ist unter Verwendung des PSCE-Schätzers signifikant und wird deshalb auch im ausgewählten XTSCC-Modell beibehalten, da die ähnlichen Koeffizienten der unterschiedlichen Schätz-Methoden auf robuste Regressionsergebnisse hindeuten. Zusätzlich dazu erscheint es sinnvoll, einen so wichtigen Aspekt wie Annahmen zur zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit der Stahlindustrie in der Simulation berücksichtigen zu können.

Tabelle 40: Regressionsergebnisse Rohstahlproduktion, Differenzen

Δ Rohstahl- produktion	Modell E XTPCSE	E XTSCC	I XTPCSE	I XTSCC
Δ Sichtbarer Stahlverbrauch	0,55097573***	0,55137462***	0,56301166***	0,56207561***
Δ Strom-Preis	-8482,089	-9042,6633		
Δ RCA der Stahlindustrie	449285,1***	464587,76	411025,38***	427410,23
Länder- Dummies	Nein	Nein	Nein	Nein
Zeit-Dummies	Nein	Nein	Nein	Nein
Konstante	-39449,03	-40382,833	-49919,689	-50210,603
R ²	0,5177985	0,51042289	.51039902	0,50621493
Root MSE	996792,65	1035297,2	943765,96	964633,34
F-Wert				
Anzahl Be- obachtungen	479	479	598	598

Quelle: berechnet mit StataCorp. (2009)

* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$

Für die Projektion der zukünftigen Rohstahlproduktion erscheint Modell I als das aus methodischer Sicht am besten geeignete Modell (Koeffizienten sehr ähnlich und robust gegenüber unausgeglichene Datensätzen); es wird daher für die weiteren Projektionen der Rohstahlproduktion und die nachfolgende Berechnung des Energieverbrauchs verwendet (Tabelle 40).

5.2.4.2 Methodik: vereinfachtes Materialflussverfahren

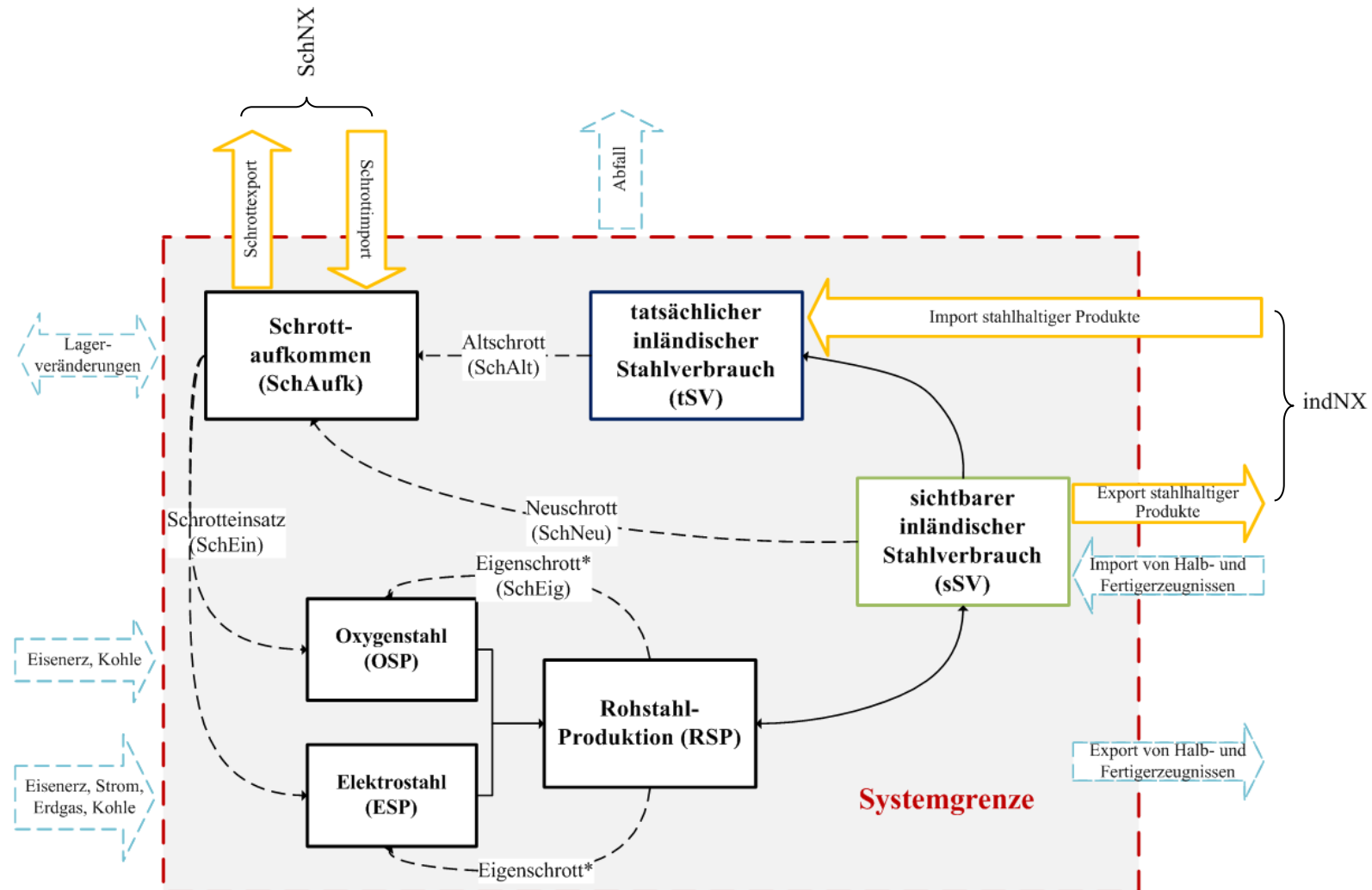
In der jüngsten Vergangenheit werden immer mehr ganzheitliche Konzepte, welche sowohl Stoffströme als auch Materialstrategieverbesserungen berücksichtigen (zusätzlich zu den Potentialen von Energieeffizienzmaßnahmen auf Prozessebene), Bestandteil der Diskussion/Forschung/Wissenschaft zur Erreichung klimapolitischer Ziele und folglich der Reduktion des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen (Milford et al. 2011; Allwood et al. 2011; Milford et al. 2013; Allwood et al. 2012; Xylia et al. 2014; Morfeldt et al. 2015; Pauliuk et al. 2013a; Jochem und Reitze 2014).

Bei dem nachfolgenden Materialfluss-Modellierungskonzept handelt es sich somit um kein völlig neues methodisches Konzept, da Stoffstromanalysen insbesondere für die Stahlindustrie, bereits ein breit erforschtes Feld darstellen (für eine Analyse verschiedener methodischer Konzepte siehe Müller et al. (2014)). Dennoch zeigen sich in der hier vorgestellten Methodik Unterschiede in der Vorgehensweise in verschiedenen Aspekten der Modellierung (z.B. Entwicklung der Stahlnachfrage- und Rohstahlproduktionsprojektionen; siehe vorherigen Abschnitt 5.2.4.1) und der Simulation der zukünftigen Entwicklung (z.B. Kopplung des indirekten Stahlhandels an ein makroökonomisches Modell).

Im Vergleich zu den sehr detaillierten Arbeiten von Pauliuk et al. (2013a) und Milford et al. (2013) handelt es sich bei der hier vorgestellten Methodik zur Projektion des zukünftigen Stahlverbrauchs, der zukünftigen Schrottverfügbarkeit, der zukünftigen Stahlproduktion bzw. zukünftiger Materialstrategieverbesserungen um einen vergleichsweise vereinfachten Ansatz mit etwas geringerem Detaillierungsgrad. Dieser ermöglicht es aber aufgrund eben dieser Vereinfachungen (geringerer Informations- und Datenaufwand), plausible länderspezifische Analysen der zukünftigen Entwicklung durchzuführen, wie hier für vier EU-Mitgliedsstaaten exemplarisch dargestellt. Pauliuk et al. (2013a) betrachteten in ihrer Arbeit zehn Weltregionen, Milford et al. (2013) führten eine globale Analyse durch.

Morfeldt et al. (2015) (basierend auf Morfeldt et al. (2013)) untersuchen mit ihrem Modellsystem („*ETSAP-TIAM-SAAM*“) ebenfalls die globale Beziehung zwischen Klimazielen, Stahlnachfrage, Recycling und Schrottverfügbarkeit bzw. dessen Einflüsse auf die Stahlproduktionstechnologien (Morfeldt et al. 2015, S. 469). Xylia et al. (2014), welche auf den Arbeiten von Morfeldt et al. (2013) und Pauliuk et al. (2013c) aufbauen, betrachten durch die Kopplung des Energiesystemmodells „*TIMES PanEU*“ mit dem, Schrottverfügbarkeitsmodell „*SAAM*“ zukünftige Technologiewahlen und Dekarbonisierungsstrategien für die europäische Stahlindustrie auf Länderebene, wobei der von der Schrottverfügbarkeit limitierte Wechsel, zu sekundären Produktionsroute eine wichtige Dekarbonisierungsoption darstellt. (Xylia et al. 2014, S. 7). Im Vergleich zur hier vorgestellten Methodik handelt es sich bei den Arbeiten von Xylia et al. (2014), aus Sicht des Autors, um einen etwas vereinfachteren Ansatz der Materialflussmodellierung ohne die Berücksichtigung des Netto-Außenhandels mit stahlhaltigen Produkten sowie des Handels mit Stahlschrotten, strukturellen Effekten wie z.B. Trends zu höherer Wertschöpfung oder Veränderungen in Materialstrategien (Materialeffizienz, Materialsubstitution und Produktnutzung), etc.

Des Weiteren wird in keiner der genannten Arbeiten eine explizite makroökonomische Rückkopplung, und somit kein hybrides Modellsystem, welches zu iterativen Berechnungen befähigt ist, berücksichtigt.



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Herbst et al. (2014b, S. 203), Fleiter et al. (2013, S. 279), Michaelis und Jackson (2000, S. 133); genutzt i. d. Präsentation Herbst et al. (2016); zur Verfügung gestellt für d. Präsentation v. Toro et al. (2015)

Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung des Materialflussverfahrens

Abbildung 8 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung des nachfolgend detailliert beschriebenen Materialflussverfahrens. Ausgehend von Rohstahlproduktion und Stahlverbrauch wird das gesamte inländische Schrottaufkommen, welches sich im entwickelten Ansatz aus Eigenschrott, Neuschrott und Altschrott zusammensetzt, ermittelt. Rohstoffeinsatz (z.B. Eisenerz, Strom, Kohle, Erdgas), Handel mit Halb- und Fertigerzeugnissen der Stahlindustrie sowie Lagerbestände bzw. Abfallprodukte befinden sich außerhalb der betrachteten Systemgrenze (vgl. Abbildung 8 blau strichlierte Pfeile). Im System modelliert werden Annahmen zum Handel mit stahlhaltigen Produkten (z.B. Autos, Maschinen, etc.) sowie dem Schrottaußenhandel. Der sich tatsächlich im Land befindliche Schrott nach Handel fließt dann im System als Schrotteinsatz/Produktionsinput in die Oxygen- und Elektrostahlproduktion. In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt eine detaillierte Beschreibung des entwickelten Ansatzes und der in diesem Zusammenhang getroffenen Annahmen.

Zur Modellierung der Materialströme in dieser Arbeit wurde das Jahr 2011 als erstes Simulationsstartjahr gewählt. Für das Basisjahr 2010 wurden (wenn verfügbar) historische Zahlen im Modell eingesetzt.

Der mithilfe der zuvor vorgestellten Regressionsgleichung projizierte inländische sichtbare Stahlverbrauch (sSV) nach Nettoexporten auf Länderebene (i), muss in einem ersten Schritt auf die unterschiedlichen stahlnachfragenden Sektoren jährlich (t) herunter gebrochen werden. In Anlehnung an Pauliuk et al. (2013c, S. 26) und Müller et al. (2011a) bzw. Müller et al. (2011b) wird der **sichtbare Stahlverbrauch (sSV)** mit einem sektoralen Verteilungsschlüssel (θ) in die folgenden vier Sektoren (k) unterteilt: **Baugewerbe, Transport, Maschinen- und Anlagenbau, Produkte und Sonstiges** (M.1).

$$sSV_{k,i(t)} = \theta_{k,i(t)} * sSV_{i(t)} \quad \text{mit } i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \text{ und } t = 1, \dots, T \quad (M.1)$$

Im Gegensatz zu Pauliuk et al. (2013c, S. 26) basiert die initiale Verteilung der Stahlnachfrage im Basisjahr 2010 in dem hier vorgestellten Modell auf empirischen Informationen (vgl. Abschnitt 5.2.4.3). Pauliuk et al. (2013c, S. 26) hingegen ermitteln den sektoralen Verteilungsschlüssel des sich in Verwendung befindlichen Bestands mittels einer Optimierungsroutine und der Massenbilanz des Schrottmarktes aus vier möglichen sektoralen Verteilungen (Indien, USA, UK).

Ein weiterer Unterschied betrifft die Entwicklung der sektoralen Verteilung über die Zeit. Pauliuk et al. (2013c, S. 26) nehmen für deren empirische Analyse (1700 bis 2008) eine konstante Verteilung über die Zeit an, anders als im hier vorgestellten Modell. Ebenso unterscheiden sich die Annahmen zur zukünftigen Entwicklung: die Zusammensetzung des zukünftigen sich in Verwendung befindlichen Bestands ergibt sich in Pauliuk et al. (2013a, S. 3449–3451) (Analyse von 10 Weltregionen; siehe auch Pauliuk et al. (2013b, S. 7)) durch die Zusammensetzung der unterschiedlichen Pro-Kopf-Verbrauchs-Muster und deren Sättigungsgrenzen/-jahre (basierend auf Pauliuk et al. (2013c)) sowie einer Bevölkerungsprojekti-

on. In dem hier vorgestellten Modell wird auch die zukünftige Entwicklung der sektoralen Verteilung basierend auf dem zugrundeliegenden makroökonomischen Szenario sowie den Ergebnissen einer Expertenbefragung festgelegt. Dies erscheint logisch, da der gesamte sichtbare Stahlverbrauch in Abhängigkeit der ökonomischen Entwicklung der stahlnachfragenden Sektoren bereits in Abschnitt 5.2.4.1 projiziert wurde.

Um den Einfluss von zusätzlichen **Trends zu höherer Wertschöpfung (ThW)**, welche in der empirischen Entwicklung von Wertschöpfung und Verbrauch nicht erfasst werden (Regressionsergebnisse), zu modellieren, wird ein Strukturwandel-Quotient α (vgl. Herbst et al. (2014b, S. 208)) für die verschiedenen Sektoren eingeführt.

$$sSV_{k,i(t)}^{ThW} = \alpha_k * sSV_{k,i(t)} \quad \text{mit } 0 < \alpha \leq 1 \quad (M.2)$$

Dieser Strukturwandel-Quotient dient nur der Abbildung der Entkopplung von Wertschöpfung und Stahlverbrauch durch produktbegleitende Dienstleistungen (z.B. Wartung und Projektmanagement, vgl. Abschnitt 5.2.4.3), da die Verwendung höherwertiger Produkte unter dem Aspekt der Materialstrategieverbesserungen (Materialeffizienz) behandelt wird.

Nach Berücksichtigung der Szenario-abhängigen Annahmen zum Strukturwandelquotient wird nun der in den Fabrikationsprozessen anfallende Länder-spezifische **Neuschrott (SchNeu)** mithilfe einer Neuschrottrate (δ) (Herbst et al. 2014b, S. 208) für die verschiedenen stahlnachfragenden Sektoren berechnet. Dieser Ansatz basiert auf der von Michaelis und Jackson (2000, S. 136) definierten Neuschrottrate, welcher jedoch keine weitere Sektordifferenzierung berücksichtigte.

$$SchNeu_{k,i(t)} = \delta_{k,i} * sSV_{k,i(t)}^{ThW} \quad \text{mit } 0 \leq \delta \leq 1 \quad (M.3)$$

Auch Pauliuk et al. (2013c, S. 24–25; Pauliuk et al. 2013d, S. 20–21) (siehe auch Pauliuk et al. (2013d, S. 20–21)) nutzen in ihrer Modellierung einen sektorspezifischen Parameter genannt „*fabrication losses*“ (deutsch Fabrikationsverluste) bzw. „*fabrication scrap rate*“ welcher basierend auf globalen Daten von Cullen et al. (2012a) ermittelt wurde. Diese wurden auch für Projektion in Pauliuk et al. (2013b, S. 18) genutzt. Die in dem hier beschriebenen Modell verwendeten sektor-spezifischen Neuschrottraten wurden für das Basisjahr auf Länderebene vom Autor geschätzt und mittels Expertenbefragung validiert (vgl. Abschnitt 5.2.4.3).

Wie bereits in Herbst et al. (2014b, S. 208) basierend auf World Steel Association (2012, S. 2–3) modelliert, wird für die Berechnung des Altschrottaufkommens nicht nur der sichtbare Stahlverbrauch (*„Lieferungen minus Nettoexporte von Stahlindustrie Gütern“*; World Steel Association (2012, S. 2)) eines Landes benötigt, sondern auch der sich tatsächlich in Verwendung befindenden Stahlbestand (tSV) eines Landes zum Zeitpunkt t , welcher auch Aspekte des Handels mit stahlhaltigen Produkten (z.B. Fahrzeuge, Maschinen und Anlagen, Konsumgüter) beinhaltet (World Steel Association 2012, S. 2–3). Im Gegensatz zu Pauliuk et al.

(2013a, S. 3449–3451) (vgl. auch Pauliuk et al. (2013b, S. 7)), welcher den gesamten sich tatsächlich in Verwendung befindenden zukünftigen Stahlbestand für zehn Weltregionen anhand einer exogenen Projektion der Bevölkerungsentwicklung und einer Projektion des zukünftigen Stahlbestandes pro Kopf (und Sektor) berechnet, wird hier ein alternativer Ansatz zu Berechnung des tatsächlichen Stahlverbrauchs verfolgt. Die World Steel Association veröffentlichte im Jahr 2012 ein Arbeitspapier, in welchem es ein Konzept zur Berechnung des tatsächlichen Stahlverbrauchs (tSV) basierend auf dem sichtbaren Stahlverbrauch¹⁰⁴ (sSV) und einem neuen Indikator, dem indirekten Stahl-Nettoexport ($indNX$) vorstellt (World Steel Association 2012, S. 2–3).

Um die zukünftigen **indirekten Stahl-Nettoexporte** auf Ebene der Sektoren Baugewerbe, Transport, Maschinen- und Anlagen, sowie Produkte und Sonstige zu projizieren, muss zuerst die Entwicklung des Aggregats der indirekten Stahl-Nettoexporte abgebildet werden. Hierzu muss, aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit (bereits in Herbst et al. (2014b, S. 206–208) thematisiert), sowohl ein Backcast bis 1950 als auch eine Projektion bis 2035 modelliert werden.

Die historische Entwicklung der indirekten Stahl-Nettoexporte wurde an die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes des jeweiligen Landes gekoppelt, für die Projektion wurde ein alternativer Ansatz gewählt: die indirekten Stahl-Nettoexporte folgen dem durchschnittlichen Wachstumspfad der Nettoexporte der stahlnachfragenden Branchen (Metallprodukte, industrielle Maschinen, Computer, Elektrotechnik, Fahrzeugbau, Nahrungsmittel), deren Entwicklung aus dem makroökonomischen Modell geliefert wird (vgl. Abschnitt 5.2.4.3). Im zweiten Schritt werden dann die berechneten indirekten Stahl-Nettoexporte entsprechend der Verteilung $\theta_{k,i(t)}$ auf die Sektoren Baugewerbe, Transport, Maschinen- und Anlagenbau, Produkte und Sonstiges aufgeteilt. Das Vorgehen der World Steel Association (2012, S. 2–3) zur Berechnung des tatsächlichen Stahlverbrauchs, wie bereits in Herbst et al. (2014b, S. 208) gezeigt, konnte zur Berechnung des tatsächlichen Stahlverbrauchs adaptiert werden. Es wurde, jedoch in dieser Arbeit um den Aspekt des Neuschrottaufkommens erweitert, welcher dort nicht explizit erwähnt wird.

$$tSV_{k,i(t)} = sSV_{k,i(t)}^{ThW} - SchNeu_{k,i(t)} - indNX_{k,i(t)} \quad (M.4)$$

Zur Modellierung des Einflusses von verschiedenen **Materialstrategien** muss ein weiterer Berechnungsschritt eingeführt werden. In Anlehnung, an die von Allwood et al. (2012), Allwood (2013, S. 2) identifizierten bzw. in Milford et al. (2013, S. 3456) modellierten Maßnahmen zur Senkung der Stahlnachfrage, wurden vier ausgewählte Materialstrategien als relevant erachtet und in die Modellbildung aufgenommen: **Materialeffizienz** (worunter so-

¹⁰⁴ Der sichtbare Stahlverbrauch wird im hier entwickelten Modell mittels einer Verhaltensgleichung aus der Regressionsanalyse projiziert.

wohl Verbesserungen im Fabrikationsprozess der stahlnachfragenden Sektoren als auch die Produktion effizienterer Stahlprodukte verstanden wird, vgl. Abschnitt 5.2.4.3), **Materialsubstitution, intensivere Produktnutzung und Wiederverwendung**; wobei Materialsubstitution nicht explizit in den zuvor genannten Arbeiten zur Stahlindustrie modelliert wurde.

Materialeffizienzmaßnahmen, Materialsubstitution und intensivere Produktnutzung haben, wie auch methodisch in Pauliuk et al. (2013b, S. 7-8) beschrieben und in Milford et al. (2013, S. 3457) global modelliert¹⁰⁵, direkten Einfluss auf den tatsächlichen sektoralen Stahlverbrauch eines Landes (tSV^{MSt}). So kann z.B. durch Materialeffizienzmaßnahmen bzw. Materialsubstitution der Stahlgehalt eines Automobils bzw. der Stahlverbrauch bei dessen Produktion gesenkt werden. Zusätzlich dazu kann eine intensivere Produktnutzung zu einer geringeren Nachfrage nach Automobilen und folglich auch zu einer geringeren Produktion dieser führen.

Die Einsparpotentiale auf sektoraler Ebene (vgl. Abschnitt 5.2.4.3) wurden im hier dargestellten Modell als jährliche Einsparpotentiale dieser drei Strategien (γ_m ; mit m = Materialeffizienz, Materialsubstitution, intensivere Produktnutzung¹⁰⁶) modelliert. Die Modellierungsüberlegungen fanden in Anlehnung an Milford et al. (2013, S. 3457) statt (vgl. M.5 bis M.8b), welche in ihrer Arbeit absolute theoretische Obergrenzen von Materialeffizienzstrategien modellieren.

Simuliert wird der Einfluss der Materialstrategieverbesserungen für jede der Variablen aus denen sich der tatsächliche sektorale Stahlverbrauch eines Landes errechnet (M.5 bis M.8b). D.h. der sichtbare Stahlverbrauch (sSV^{MSt}) und die indirekten Nettoexporte ($indNX^{MSt}$) reduzieren sich um die angenommen Einsparpotentiale und bilden somit eine neue Basis zur Berechnung des Neuschrotts ($SchNeu^{MSt}$) (M.5 und M.6, M.7) und des tatsächlichen Stahlverbrauchs (tSV^{MSt}) (M.8a und M.8b).

Wichtig zu berücksichtigen ist, dass im Falle der Modellierung von Materialstrategieverbesserungen der sichtbare inländische Stahlverbrauch nach Materialeffizienzmaßnahmen, Materialsubstitution und/oder intensiverer Produktnutzung ($sSV_{k,i(t)}^{MSt}$) die Bezugsgröße für die Projektion der Rohstahlproduktion darstellt

$$sSV_{k,i(t)}^{MSt} = sSV_{k,i(t)}^{ThW} * (\prod_{m=1}^M (1 - \gamma_{m,k,i}))^{t-t_0} \quad \text{mit } m = 1, \dots, M \quad (M.5)$$

$$SchNeu_{k,i(t)}^{MSt} = \delta_k * sSV_{k,i(t)}^{MSt} \quad \text{mit } 0 \leq \delta \leq 1 \quad (M.6)$$

$$indNX_{k,i(t)}^{MSt} = indNX_{k,i(t)} * (\prod_{m=1}^M (1 - \gamma_{m,k,i}))^{t-t_0} \quad \text{mit } m = 1, \dots, M \quad (M.7)$$

¹⁰⁵ Milford et al. 2013, S. 3457 modellieren zusätzlich dazu auch Neuschrott-Umleitungen und Lebensdauerverlängerungen (methodisch wäre dies bereits in Pauliuk et al. 2013a bzw. Pauliuk et al. 2013b möglich).

¹⁰⁶ Der Einfluss von Wiederverwendung wird an einer anderen Stelle in die Modellierung eingebracht.

$$tSV_{k,i(t)}^{MSt} = sSV_{k,i(t)}^{MSt} - SchNeu_{k,i(t)}^{MSt} - indNX_{k,i(t)}^{MSt} \quad (M.8a)$$

gleichbedeutend mit

$$tSV_{k,i(t)}^{MSt} = tSV_{k,i(t)} * (\prod_{m=1}^M (1 - \gamma_{m,k,i}))^{t-t_0} \quad \text{mit } m = 1, \dots, M \quad (M.8b)$$

Unter der Hypothese, dass es sich bei der europäischen Stahlindustrie um eine stark vernetzte Branche handelt, in welcher von einem Wissenstransfer zwischen den verschiedenen Nationen (z.B. multi-nationale Unternehmen) und somit von einem ähnlichen Vorgehen im internationalen Wettbewerb ausgegangen werden kann, werden die Einsparpotentiale der unterschiedlichen Strategien und Sektoren für alle betrachteten Länder als gleich angenommen. Die Einsparpotentiale wurden mittels Literaturanalyse geschätzt und durch ein Experteninterview verifiziert, plausibilisiert und wo notwendig angepasst (vgl. Abschnitt 5.2.4.3).

Nach Berücksichtigung der Szenario-abhängigen Annahmen zur Materialeffizienz werden nun, in Anlehnung an Pauliuk et al. (2013c, S. 26), Pauliuk et al. (2013d, S. 6–7), Pauliuk et al. (2013b, S. 7)¹⁰⁷, die für das **Recycling** zum Zeitpunkt t zur Verfügung stehenden **Rückflüsse aus den vergangenen tatsächlichen Stahlverbräuchen (tSV)** mit Hilfe eines dynamischen Lebensdauermodells berechnet.¹⁰⁸ Für die vier betrachteten Sektoren (Baugewerbe, Transport, Maschinen- und Anlagenbau, Produkte und Sonstige) wurde der Mittelwert (ND) ihrer durchschnittlichen Nutzungsdauer (ungleich technologische Lebensdauer) geschätzt und entsprechende Standardabweichungen (σ) festgelegt (Tabelle 46). Verwendet wurde hierfür eine Normalverteilung mit folgender Dichtefunktion, wobei x die Differenz zwischen dem aktuellen Berechnungsjahr (t) und jedem Jahr in der Vergangenheit (T) darstellt (vgl. Pauliuk et al. (2013c, S. 26), Pauliuk et al. (2013d, S. 6–7), Pauliuk et al. (2013b, S. 7)):

$$f(x, ND, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\left(\frac{(x-ND)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

Die Werte dieser Dichtefunktion werden dann mit den entsprechenden vergangenen tatsächlichen Stahlverbräuchen (tSV) multipliziert und bis zu dem aktuellen Berechnungsjahr aufsummiert um die für das Recycling zum Zeitpunkt t zur Verfügung stehenden Rückflüsse aus den vergangenen tatsächlichen Stahlverbräuchen zu berechnen (vgl. Pauliuk et al. (2013c, S. 26), Pauliuk et al. (2013d, S. 6–7), Pauliuk et al. (2013b, S. 7)).

$$tSV_{k,i(t)}^{RF} = \sum_{T=1950}^{t-1} f(x, ND, \sigma) * tSV_{k,i(T)}^{MSt} \quad (M.9)$$

Diese Rückflüsse werden dann mit länder- und sektor-spezifischen Recyclingraten (r) multipliziert (vgl. Herbst et al. (2014b, S. 208), Michaelis und Jackson (2000, S. 136–137), Pauliuk et al. (2013c, S. 24), Pauliuk et al. (2013d, S. 6), Pauliuk et al. (2013a, S. 3451), Pauliuk

¹⁰⁷ Der von Pauliuk et al. 2013c, S. 26, Pauliuk et al. 2013d, S. 6–7, Pauliuk et al. 2013b, S. 7 gezeigt Ansatz basiert auf Arbeiten von Müller et al. 2006, S. 16116, Müller et al. 2011a, S. 183, Müller et al. 2011b, S. 4.

¹⁰⁸ Einen ähnlichen jedoch statischen (t – durchschnittliche Lebensdauer) Ansatz verfolgten auch Michaelis und Jackson 2000, S. 136–137, und in Anlehnung daran Herbst et al. 2014b, S. 208.

et al. (2013b, S. 17)), deren Entwicklung auf Länder- und Sektorebene ebenfalls im Rahmen der Expertenbefragung ermittelt wurden (Tabelle 49). Als Ergebnis erhält man das **Altschrottaufkommen (SchAlt)** je Land und Sektor zum Zeitpunkt t .

$$SchAlt_{k,i(t)} = r_{k,i(t)} * tSV_{k,i(t)}^{RF} \quad \text{mit } 0 \leq r \leq 1 \quad (M.10)$$

An diesem Punkt der Modellierung greift eine weitere Materialstrategie, **Wiederverwendung (γ_w)**, welche das Altschrottaufkommen reduziert, da Produkte oder Komponenten aus dem Recyclingprozess ausscheiden und stattdessen einer weiteren Nutzungsphase zugeführt werden (Milford et al. 2013, S. 3457). Auch hier handelt es sich wie zuvor um ein jährliches Einsparpotential.

$$SchAlt_{k,i(t)}^{MSt} = SchAlt_{k,i(t)} * (1 - \gamma_w)^{t-t_0} \quad (M.11)$$

Der **Eigenschrottanfall (SchEig)** innerhalb eines jeden Landes wird in Abhängigkeit von dessen Rohstahlproduktion (vgl. 5.2.4.1) mittels einer Eigenschrottrate (η) berechnet. Auch Pauliuk et al. (2013c, S. 25) (siehe auch Pauliuk et al. (2013d, S. 19)) berechnen „forming losses“ mithilfe einer „forming scrap rate“ basierend auf einem globalen Durchschnittswert aus Cullen et al. (2012a)¹⁰⁹. Im Modell des Autors wird für jedes Land eine eigene Eigenschrottrate ermittelt (vgl. Abschnitt 5.2.4.3) und deren zukünftige Entwicklung basierend auf einer Expertenbefragung festgelegt (vgl. Tabelle 47).

$$SchEig_{i(t)} = \eta_{i(t)} * RSP_{i(t)} \quad \text{mit } 0 \leq \eta \leq 1 \quad (M.12)$$

Das gesamte **inländische Schrottaufkommen (SchAufk)** eines Landes kann dann als Summe der drei unterschiedlich angefallenen Schrottmengen berechnet werden (Herbst et al. 2014b, S. 208).

$$SchAufk_{i(t)} = SchEig_{i(t)} + \sum_{k=1}^K SchNeu_{k,i(t)}^{MSt} + \sum_{k=1}^K SchAlt_{k,i(t)}^{MSt} \quad (M.13)$$

Zieht man dann vom gesamten inländischen Schrottaufkommen eines Landes dessen Netto-schrottexporte ($SchNX$, welche mittels Schrottpreiselastizitäten (vgl. Abschnitt 5.2.4.3) projiziert werden) ab, erhält man das **vorläufige tatsächlich verfügbare** bzw. zum Verbrauch zur Verfügung stehende **Schrottaufkommen ($tSchAufk^{prä}$)** eines Landes i zum Zeitpunkt t (Herbst et al. 2014b, S. 208).

$$tSchAufk_{i(t)}^{prä} = SchAufk_{i(t)} - SchNX_{i(t)}^{prä} \quad (M.14)$$

Das vorläufige tatsächliche Schrottaufkommen dient nun als Basis zur Berechnung der zukünftigen Elektrostahlproduktion. Da jedoch auch in der Oxygenstahlproduktion bis zu einem bestimmten Grad Schrott eingesetzt werden kann (vgl. Abschnitt 5.2.4.3) wird zuvor ein fiktiver (maximaler) **Schrotteinsatz für die Oxygenstahlproduktion ($MaxSchEin^{PP}$)** vom

¹⁰⁹ Pauliuk et al. 2013d, S. 19 berechnen ebenfalls „forming losses“.

tatsächlichen Schrottaufkommen (welches eben auch Eigenschrott beinhaltet, welcher in der Oxygenstahlproduktion direkt in den Hochofen zurückgeführt werden kann) abgezogen.¹¹⁰

Dies wird mittels eines Schrottanteils für die Primärproduktion ($SchA^{PP}$) berechnet. Der maximale Schrottanteil für den Projektionszeitraum wurde basierend auf empirischen Schrottanteilen für die Primärproduktion festgelegt (vgl. Abschnitt 5.2.4.3).

$$MaxSchEin_{i(t)}^{PP} = tSchAufk_{i(t)}^{pr\ddot{a}} * SchA_i^{PP} \quad (M.15)$$

Um das **verfügbare Schrottaufkommen** für die **sekundäre Produktionsroute** ($SchAufk^{SP}$) (Elektrostahlproduktion) zu bestimmen, wird die Differenz zwischen dem maximalen Schrotteinsatz in der primären Produktionsroute und dem vorläufig tatsächlich verfügbaren Schrottaufkommen ($tSchAufk_{i(t)}^{pr\ddot{a}}$) eines Landes i zum Zeitpunkt t gebildet.

$$SchAufk_{i(t)}^{SP} = tSchAufk_{i(t)}^{pr\ddot{a}} - MaxSchEin_{i(t)}^{PP} \quad (M.16)$$

Unter der Annahme, dass der restliche zur Verfügung stehende Schrott komplett in der inländischen Elektrostahlproduktion verbraucht wird (eine vergleichbare Annahme wurde auch in Pauliuk et al. (2013a, S. 3451) bzw. Pauliuk et al. (2013b, S. 11) getroffen), wird die **Elektrostahlproduktion (ESP)** mit Hilfe eines länderspezifischen Schrotteinsatz-Parameters in Tonnen (φ) pro Tonne Elektrostahlaufkommen ermittelt (vgl. Abschnitt 5.2.4.3).

$$ESP_{i(t)} = \frac{SchAufk_{i(t)}^{SP}}{\varphi_{i(t)}^{ESP}} \quad (M.17)$$

Die Differenz, welche sich nun zwischen der bereits ermittelten Menge an Rohstahl (vgl. Abschnitt 5.2.4.1) und der ermittelten Menge Elektrostahl ergibt, stellt die tatsächlich **produzierte Menge Oxygenstahl (OSP)** des zugrunde liegenden Szenarios dar (Herbst et al. 2014b, S. 208).

$$OSP_{i(t)} = RSP_{i(t)} - ESP_{i(t)} \quad (M.18)$$

Die hier berechnete Menge Oxygenstahl (und Elektrostahl) am Ende des Projektionshorizonts wird dann mit der aktuell zur Verfügung stehenden primären Produktionskapazität plausibilisiert. Diese Plausibilitätskontrolle ist stark von den im Szenario zugrundeliegenden Wachstumsannahmen geprägt. Erscheinen die simulierten primären Produktionszahlen als unrealistisch, müssen noch einmal die getroffenen Szenarioannahmen (z.B. Außenhandel, inländische Nachfrage, etc.) überprüft werden.

Bei zufriedenstellender Plausibilitätskontrolle erfolgt ein **iterativer Berechnungsschritt** um nun **den tatsächlichen Schrotteinsatz in der primären Produktionsroute** ($SchAufk^{PP}$) zu berechnen (Schrotteinsatz-Parameters φ multipliziert mit der Oxygenstahlproduktion OSP)

¹¹⁰Auch Pauliuk et al. 2013b, S. 10 berücksichtigen den Schrottverbrauch in den verschiedenen Produktionsprozessen (ohne Lageraufbau).

und somit das **tatsächlich inländisch verbrauchte Schrottaufkommen** ($tSchAufk^{fin}$) (verbraucht Schrottaufkommen für die sekundäre Produktionsroute plus Schrottaufkommen für die primäre Produktionsroute) zu ermitteln.

$$SchAufk_{i(t)}^{PP} = OSP_{i(t)} * \varphi_{i(t)}^{OSP} \quad (M.19)$$

$$tSchAufk_{i(t)}^{fin} = SchAufk_{i(t)}^{SP} + SchAufk_{i(t)}^{PP} \quad (M.20)$$

Überschüssige/mangelhafte Schrottmengen werden dann wieder in/vom dem internationalen Markt ex- bzw. importiert ($SchNX^{fin}$).

$$SchNX_{i(t)}^{fin} = SchAufk_{i(t)} - SchAufk_{i(t)}^{SP} - SchAufk_{i(t)}^{PP} \quad (M.21)$$

Um den Energieverbrauch des Stahlsektors ganzheitlich abbilden zu können, müssen jedoch noch vereinfachte Annahmen zur **Sinter-Produktion (SIP)**, **Koksofen-Produktion (KOP)** und der **Walzstahlproduktion (WSP)** getroffen werden. Modelliert wurde dies mit Hilfe von produkt- und länderspezifischen Einsatzfaktoren (9) in Abhängigkeit von Oxygenstahl und Rohstahlproduktion. Die Einsatzfaktoren wurden empirisch ermittelt und für die Projektion auf einem konstanten Niveau gehalten (Abschnitt 5.2.4.3).

$$SIP_{i(t)} = OSP_{i(t)} * \vartheta_{i(t)}^{SIN} \quad (M.22)$$

$$KOP_{i(t)} = OSP_{i(t)} * \vartheta_{i(t)}^{KOK} \quad (M.23)$$

$$WSP_{i(t)} = RSP_{i(t)} * \vartheta_{i(t)}^{WAL} \quad (M.24)$$

Die berechneten jährlichen Produktionsmengen in physischen Tonnen dienen dann gemeinsam mit der Bruttowertschöpfungsentwicklung der Eisen und Stahl Industrie als Input für das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry.

Für die **Rückkopplung** in das makroökonomische Modell ASTRA werden, mit einem relativ einfachen Ansatz, die **zusätzlichen Investitionen** durch die zuvor erwähnten Materialstrategieverbesserungen (INV^{MSt}) mit Hilfe des Stahlpreises (P^{Sta}) und eines Anlegungsfaktors ($\omega = 3,5$) berechnet, welche dann auf die im wesentlichen betroffenen Wirtschaftssektoren verteilt werden (z.B. die Investitionsgüterindustrie, Baugewerbe, Planungs- und Finanzierungsleistungen).

$$INV_{i(t)}^{MSt} = (\Delta RSP_{i(t)} - \Delta RSP_{i(t-1)}) * P_{(t)}^{Sta} * \omega \quad (M.25)$$

Für den angenommenen Anlegungsfaktor der Materialeffizienzoptionen geht man von einer durchschnittlichen Lebensdauer der betroffenen Maschinen, Anlagen und Fahrzeugen von 7 bis 10 Jahren und einer Rentabilität von durchschnittlich 25% (ohne Transaktionskosten) aus; dies entspricht ungefähr einer Kapitalrückflusszeit von 3,5 Jahren (Lösch et al. 2015, S. 77). Es handelt sich hierbei jedoch lediglich um einen exemplarisch methodischen Ansatz, welcher die Rückkopplung der Investitionen in das makroökonomische Modell ermöglichen soll.

Ferner zu den sich ergebenden zusätzlichen Investitionen in Materialstrategieverbesserungen müssten dann auch die zusätzlichen **Programmkosten (PK)** auf Seiten des Staates und der Wirtschaftsverbände berücksichtigt werden. Dies auch nur annähernd, zu quantifizieren ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Deshalb wird hier eine grobe Annahme für die Programmkosten unterstellt, um sie zumindest methodisch für die Rückkopplung in das makroökonomische Modell berücksichtigen zu können. Beispiele für Politikmaßnahmen können sein:

- Informations- und Fortbildungsmaßnahmen, die sowohl von Gebietskörperschaften, IHKs, Handwerkskammern oder Verbänden geleistet werden könnten.
- Finanzielle Investitionsanreize, z.B. für beispielsweise Prozesstechniken der Stahl-Weiterverarbeitung mit verbesserter gleichmäßiger Produktqualität oder geringerem Verschnitt und damit geringerem Anfall an Neuschrotten.

Derartige Politikmaßnahmen werden hier mit ihren Programmkosten global geschätzt, um sie im makroökonomischen Modell berücksichtigen zu können. Hierzu werden die Programmkosten pauschal als Anteile der erforderlichen Investitionen, die aus den Materialstrategieverbesserungen resultieren (vgl. obiger Abschnitt) eher als relativ gering geschätzt, und zwar für

- die Gebietskörperschaften, insbesondere Bund und Bundesländer mit 3% der erforderlichen Zusatzinvestitionen (Sektor Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung; *Staat*), und
- die privaten Dienstleister, Wirtschaftsorganisationen und -verbände mit 1% der erforderlichen Zusatzinvestitionen (Sektor Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen; *Wirt*).

$$PK_{i(t)}^{Staat} = INV_{i(t)}^{MSt} * 0,03 \quad (M.26a)$$

$$PK_{i(t)}^{Wirt} = INV_{i(t)}^{MSt} * 0,01 \quad (M.26b)$$

Diese Programmkostenanteile an den Investitionen sind verhältnismäßig niedrig geschätzt gemessen an Energieeffizienz-Programmen, die bis zu 16% der (Technik-)Investitionen ausmachen können (Berlo et al. 2011, S. 95). Gründe für einen niedriger geschätzten Programmkostenanteil können unter anderem sein: bereits bestehende Infrastruktur aus Energieeffizienz-Programmen und/oder Synergieeffekte mit Prozessinvestitionen, welche von den Unternehmen ohnehin aus wettbewerbsgründen durchgeführt werden würden. Auch hier sind die Anteile nur exemplarisch gewählt, um sie methodisch mitberücksichtigen zu können. In zukünftigen Analysen werden die Programmkosten einer auf Materialstrategien (Effizienz, Substitution, etc.) im Stahlsektor ausgelegten Ressourcenpolitik empirisch erhoben und monetarisiert werden müssen.

Des Weiteren werden die mit FORECAST Industry berechneten Veränderungen des Energieverbrauchs (EV) der Stahlindustrie genutzt, um die damit verbundenen **Energiekostenreduktionen** (EKR^{MSt}) zu berechnen (Veränderung des Energieverbrauchs nach Energieträger mal Energieträgerpreis (P^{ET}) mit v = Biomasse und Müll, Fernwärme, Gas, Kohle, Öl, Strom).

$$EKR_{i(t)}^{MSt} = \sum_{v=1}^6 (\Delta EV_{i,v(t)} * P_{i,v(t)}^{ET}) \quad (M.27)$$

Die berechneten zusätzlichen Investitionen in Materialstrategien, die Programmkosten sowie die mit FORECAST Industry berechneten Veränderungen des Energieverbrauchs der Stahlindustrie und die damit verbundenen Energiekosteneinsparungen dienen dann als Input für einen iterativen Lauf des makroökonomischen Modells ASTRA um die gesamtwirtschaftlichen Effekte der Materialstrategieverbesserungen (BIP, Beschäftigung, strukturelle Veränderungen, etc.) abzubilden.

5.2.4.3 Daten

Bruttowertschöpfung

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 diskutiert basiert die empirische Datenbasis zur Wertschöpfungsentwicklung in den Stahlnachfragenden Sektoren auf der EUKLEMS database (2013). Die Projektion der zukünftigen Wertschöpfungsentwicklung wurde bereits in Abschnitt 5.2.1 diskutiert.

Historische Rohstoff- und Energieträgerpreise zur Regressionsanalyse

Die historische Entwicklung des Eisenerzpreises (1978-2012), welche für die Regressionsanalyse der Rohstahlproduktion verwendet wurden, stammt aus der *Global Economic Monitor (GEM) Commodities* Datenbank (The World Bank Group 2015b). Eine Projektion des Eisenerzpreises war nicht nötig, da dieser in der Verhaltensgleichung zur Projektion der Rohstahlproduktion nicht berücksichtigt wurde (vgl. 5.2.4.1).

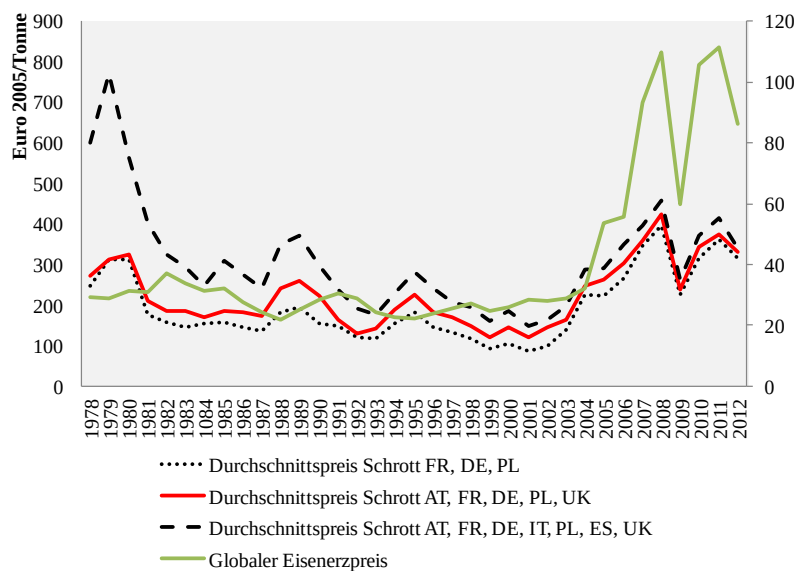
Der durchschnittliche historische Schrottpreis basiert auf Daten der Warengruppe 282 SITC2 („Waste and scrap metal of iron or steel“) der UN Comtrade Datenbank (United Nations 2015e), und wurde wie in Flues et al. (2013, S. 8) basierend auf deren Handelswerten und Nettogewicht berechnet. Es wurden durchschnittliche Import- und Exportpreise berechnet, welche dann gemittelt den historischen Schrottpreis auf Länderebene ergaben¹¹¹. Für die wichtigsten europäischen Länder bzw. die betrachteten Schwerpunktländer wurden diese dann in drei Gruppen zusammengefasst, um einen Durchschnittspreis auszuwählen (Abbildung 9). Als Basis für die weiteren Berechnungen wurde der Durchschnittspreis der

¹¹¹ Bei den Handelsdaten von Polen (1993) und Großbritannien (1979, 2007) wurden extreme Ausreißer in den Reihen durch den Durchschnittspreis des Vorjahres ersetzt. Dasselbe Vorgehen wurde auch für Jahre ohne Information zu Handelswerten und Nettogewicht gewählt (Polen 1991). Für Jahre in denen nur Import- oder Exportpreisinformationen zur Verfügung standen wurden diese eingesetzt.

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

Länder Österreich, Frankreich, Deutschland, Polen und Großbritannien gewählt, da der Durchschnittspreis welcher auch Spanien und Italien mit einschließt zu einer Überschätzung des historischen europäischen Schrottpreises (vor allem Ende der siebziger und Anfang der achtziger Jahre) tendiert.

Für die Simulation wurde ein möglicher negativer linearer Wachstumspfad des Schrottpreises, basierend auf einem Schrottpreis von 344 €/t in 2010 (United Nations 2015e), auf 300 €/t in 2035 angenommen. Die Annahme eines sich durchschnittlich auf 300 €/t einpendelnden Schrottpreises erscheint aufgrund hoher bekannter Erzvorräte, technischen Fortschritts, zunehmenden Stahlrecycling, Stagnation bzw. Rückgang der Stahlnachfrage in Industrieländern und dem langsameren Anstieg der Stahlnachfrage in den verbleibenden Entwicklungsländern als plausibel.



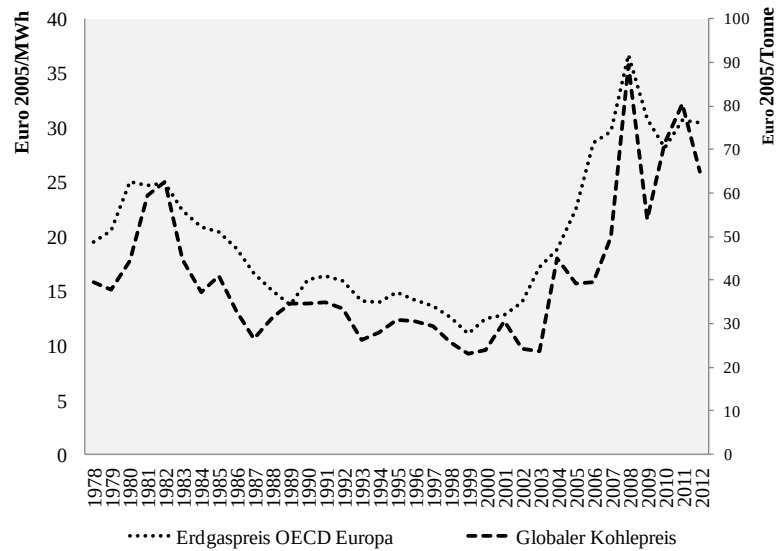
Quelle: eigene Berechnung basierend auf United Nations (2015e), eigene Darstellung von The World Bank Group (2015b)

Abbildung 9: Historische Schrott- und Eisenerzpreisentwicklung (1978-2012)

Die historischen Energieträgerpreise für Strom und Erdgas für die Industrie wurden, wie auch in Flues et al. (2013, S. 8), den IEA Online Data Services entnommen (International Energy Agency 2015a, 2015b), während der globale Kohlepreis aus der *Global Economic Monitor (GEM) Commodities* Datenbank stammt (The World Bank Group 2015a). Für Erdgas wurde der historische OECD Europa Durchschnittspreis in der Regressionsanalyse zu Rohstahlproduktionsprojektion verwendet, da die länderspezifischen Datensätze zum Erdgaspreis für mehrere Länder unvollständig waren (Abbildung 10). Für die Strompreisentwicklung wurden

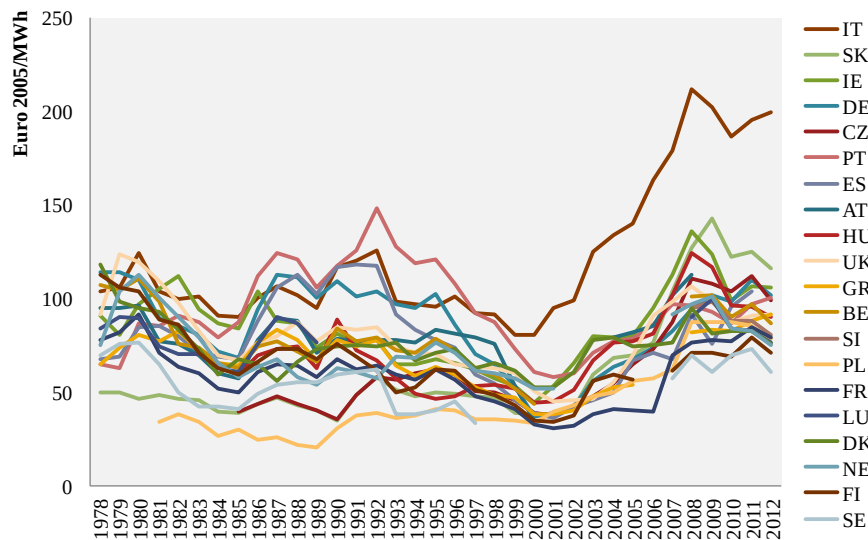
Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

die länderspezifischen Datensätze der International Energy Agency (2015a) verwendet (Abbildung 11)¹¹².



Quelle: eigene Darstellung von International Energy Agency (2015b), The World Bank Group (2015a)

Abbildung 10: Historische Erdgas- und Kohlepreisentwicklung (1978-2012)



Quelle: eigene Darstellung von International Energy Agency (2015a)

Abbildung 11: Historische Strompreisentwicklung (1978-2012)

Alle historischen Preise wurden mit Hilfe der Referenzkurse der Europäischen Zentralbank (Deutsche Bundesbank 2013) und dem CPI Inflationsrechner (U.S. Bureau of Labour Statistics 2015) in Euro 2005 umgerechnet.

¹¹² Für das Aggregat Belgien/Luxemburg wurde der Strompreis des größeren Landes Belgien eingesetzt.

Zukünftige Entwicklung der Energieträgerpreise

Für die hier vorgestellte konzeptionelle und methodische Brücke zwischen ökonomischer Information und den physischen Inputgrößen des Energienachfragemodells werden keine Energiepreisprojektionen benötigt (siehe Regressionsergebnisse des Abschnitts 5.2.4.1).

Das bottom-up Energienachfragemodell FORECAST Industry berücksichtigt bis zu einem gewissen Grad die Entwicklung der wichtigsten Energieträgerpreise. Diese haben jedoch im hier betrachteten Szenario ohne zusätzliche Energieeffizienzanstrengungen („*Frozen Efficiency*“) keinen signifikanten Einfluss auf die Modellergebnisse. Die im Modell hinterlegten Endverbraucherpreise für die Industrie wurden entsprechend den Entwicklungen des Referenz Szenario 2013 der „*EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050*“ (Capros et al. 2013)¹¹³ fortgeschrieben.

Zur Berechnung der vermiedenen Energiekosten für einzelne Energieträger mussten die Industrie-spezifischen Preise für das Basisjahr 2010 geschätzt werden: so basiert der Biomasse- und Müllpreis auf dem Kokspreis von Steelonthenet.com (2015), für Fernwärme wurde der Gaspreis der jeweiligen Länder um 2 ct/kWh erhöht, und der Ölpreis -welcher den Preis für Ölabfälle (z.B. Schweröl) darstellt - wurde für das Basisjahr 2,5 ct/kWh geschätzt. Die Projektionen der Energieträgerpreise basieren, auf den Entwicklungen des Referenz Szenario 2013 der „*EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050*“ (Capros et al. 2013).

¹¹³ Das Basisjahr zur Berechnung der Energiepreise in FORECAST Industry war zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit das Jahr 2008, weshalb ab diesem Jahr eine Projektion mittels der Entwicklungen aus Capros et al. 2013 durchgeführt wurde.

Tabelle 41: Energieträgerpreise zur Energiekostenberechnung in Euro2005/kWh

Land	Quelle	2010				2035
		Frankreich	Deutschland	Italien	Polen	FR, DE, IT, PL
Biomasse u. Müll	Steelonthen et.com (2015)	0,027	0,027	0,027	0,027	Entwicklung wie Kohlepreis
Kohle	The World Bank Group (2015a)	0,009	0,009	0,009	0,009	Entwicklung wie Capros et al. (2013)
Fernwärme	Schätzung	0,049	0,049	0,044	0,047	Entwicklung wie Gaspreis
Strom	Eurostat (2015d)	0,060	0,084	0,103	0,086	Entwicklung wie Capros et al. (2013)
Gas	Eurostat (2015e)	0,030	0,031	0,026	0,029	Entwicklung wie Capros et al. (2013)
Öl	Schätzung	0,025	0,025	0,025	0,025	Entwicklung wie Capros et al. (2013)

Revealed Comparative Advantage der Stahlindustrie

Der RCA der Stahlindustrie wurde basieren auf Daten der Warengruppe 67 SITC2 („*Iron and steel*“) und den Handelsdaten des Aggregats aller gehandelten Güter („*Total commodities*“) der UN Comtrade Datenbank (United Nations 2015d, 2015c) berechnet¹¹⁴ (Darstellung ausgewählter Länder in Tabelle 42). Für die Szenario-Rechnungen wurde angenommen, dass Länder in welche bisher Stahl exportiert wurde bzw. die Rohstoff- (Eisenerz)/Schwellenländer nun selbst Stahlindustrien bzw. die nächste Wertschöpfungsstufe aufbauen. Dieser Annahme wird mit einem linearen Rückgang des RCAs der Stahlindustrie des jeweiligen Landes um 30% bis 2035 unter den Wert des Jahres 2010 simuliert. Ein weiterer Grund für eine zukünftige Senkung des RCAs könnten die Überkapazitäten der europäischen Stahlindustrie sein, welche ursächlich für strafferen Wettbewerb und eventuelle leichte Verluste sein könnten.

¹¹⁴ Für das Aggregat Belgien/Luxembourg wurde ein gemeinsamer RCA gewichtet nach Produktionsanteilen basierend auf den für das jeweilige Land ermittelte RCAs berechnet.

Tabelle 42: RCA der Stahlindustrie historisch und Projektion (FR, DE, IT, PL)

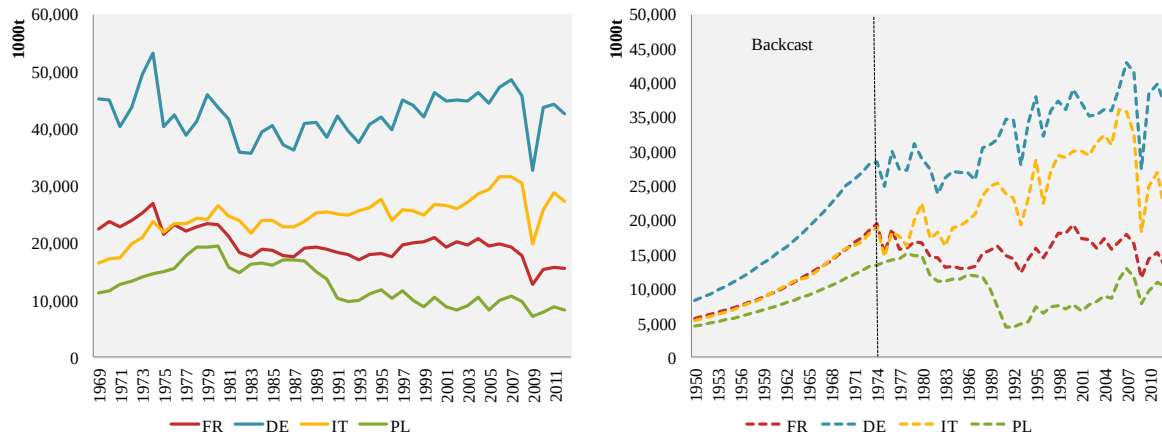
Land	1991	2000	2010	2035
Frankreich	1,36	1,09	1,16	0,81
Deutschland	1,16	1,10	0,89	0,62
Italien	1,01	0,82	1,12	0,78
Polen	5,63	1,31	0,63	0,44

Quelle: eigene Berechnung/Schätzungen aus United Nations 2015c, United Nations 2015d

Produktion und Verbrauch

Die länderspezifischen historischen Daten zur Rohstahl- (*RSP*), Elektrostahl- (*ESP*) und Oxygenstahlproduktion (*OSP*) sowie dem sichtbaren Stahlverbrauch (*sSV*) wurden aus mehreren Ausgaben des „*Steel Statistical Yearbook*“ der World Steel Association (mehrere Ausgaben) zusammengetragen. Die Entwicklung der Rohstahlproduktion der Schwerpunktländer Frankreich, Deutschland, Italien und Polen bestätigt das zuvor beschriebene, nur sehr geringe produktionsseitige Wachstum innerhalb der Europäischen Union (siehe Abbildung 6 und Abbildung 12). Seit 1969 stagnierte die deutsche Rohstahlproduktion und lag im Jahr 2010 mit rund 44 Millionen Tonnen circa 3% unter dem Wert von 1969 (World Steel Association mehrere Ausgaben) trotz einem leichten Zuwachs innerhalb der letzten beiden Dekaden (vgl. Herbst et al. (2014b, S. 203)) von 0,7% p.a.. Einzig Italien weitete seine Stahlproduktion stetig über den Beobachtungszeitraum auf 26 Millionen Tonnen aus (+1,1% p.a. zwischen 1969 und 2010), wobei auch hier das Wachstum durch die Wirtschaftskrise ins Stocken kam (+0,1% p.a. zwischen 1990 und 2010) (World Steel Association mehrere Ausgaben). Frankreichs und Polens Stahlproduktion betrug 2010 nur noch rund 15 bzw. 8 Millionen Tonnen im Vergleich zu einem Produktionshöchststand von circa 27 Millionen Tonnen (1974) in Frankreich und 19 Millionen Tonnen (1980) in Polen (World Steel Association mehrere Ausgaben). Der stetige Produktionsrückgang dieser beiden Länder (-0,9% p.a. in Frankreich bzw. -0,8% p.a. in Polen zwischen 1969 und 2010; World Steel Association (mehrere Ausgaben)) wurde unter anderem von strukturellen Veränderungen (z.B. Zusammenbruch der Sowjetunion mit ihrer speziellen länderspezifischen Produktionsplanung und Arbeitsteilung) verursacht. Er ist aber auch dem steigenden internationalen Konkurrenzdruck im Bereich der Massentähle und den weltweit existierenden Überkapazitäten geschuldet (Bialdiga 2015a, S. 27), sowie der veränderten internationalen Arbeitsteilung bei stahlnachfragenden Branchen. In der jüngsten Vergangenheit gab es bereits Anzeichen einer Erholung der europäischen Stahlindustrie, vor allem in Deutschland, getrieben durch europäische Nachfrage und insbesondere durch die stabile Nachfrage der Automobilindustrie (Bialdiga 2015a, S. 27).

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie



Quelle: Daten von World Steel Association (mehrere Ausgaben), eigene Berechnung

Abbildung 12: Rohstahlproduktion (1969-2012) (links) und sichtbarer Stahlverbrauch (1950-2012) (rechts) FR, DE¹¹⁵, IT, PL

Die inländische Stahlnachfrage¹¹⁶ hat sich insbesondere in Polen (strukturelle Veränderung und Integration in die EU) und Frankreich in den letzten Jahrzehnten nur relativ schwach entwickelt (Abbildung 12). So macht der Maschinenbau¹¹⁷ 2012 in Frankreich und Polen jeweils nur rund 6% der Wertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes aus, während in Deutschland und Italien dessen Anteil bei rund 14 und 15 Prozent liegt (Eurostat 2015g).

Da für die Simulation der (zukünftigen) Stahlrückflüsse aus dem sich tatsächlich in Gebrauch befindlichen Bestand längere Zeitreihen als historisch verfügbar (World Steel Association 2013, S. 112) benötigt wurden und zusätzlich dazu auch ein alternatives Berechnungskonzept zu deren Definition eingeführt wurde (vgl. 5.2.4.2), musste ein Backcast der entsprechenden Variablen bis zum Jahr 1950 durchgeführt werden. Der tatsächliche Stahlverbrauch errechnet sich unter anderem aus dem sichtbaren Stahlverbrauch (Abbildung 12). Dieser wurde für die Jahre 1973-1950 an die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes gekoppelt. Dabei wurde ein länderspezifischer Quotient des Verbrauchs und des Bruttoinlandsproduktes für das letzte empirisch verfügbare Jahr (1974) ermittelt und dieser Quotient (Verbrauch/BIP) zur Kopplung des Verbrauchs an das Bruttoinlandsprodukt bis zum Jahr 1950 verwendet. Die historische Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes stammte bis zum letzten verfügbaren Jahr¹¹⁸ aus den World Development Indicators der (The World Bank Group (2012d), The World Bank Group (2012j) und wurde dann mit den von Maddison (2001, S. 187) ermittelten länderspezifischen Wachstumsraten bis 1950 erweitert.

¹¹⁵ vor Wiedervereinigung nur Westdeutschland

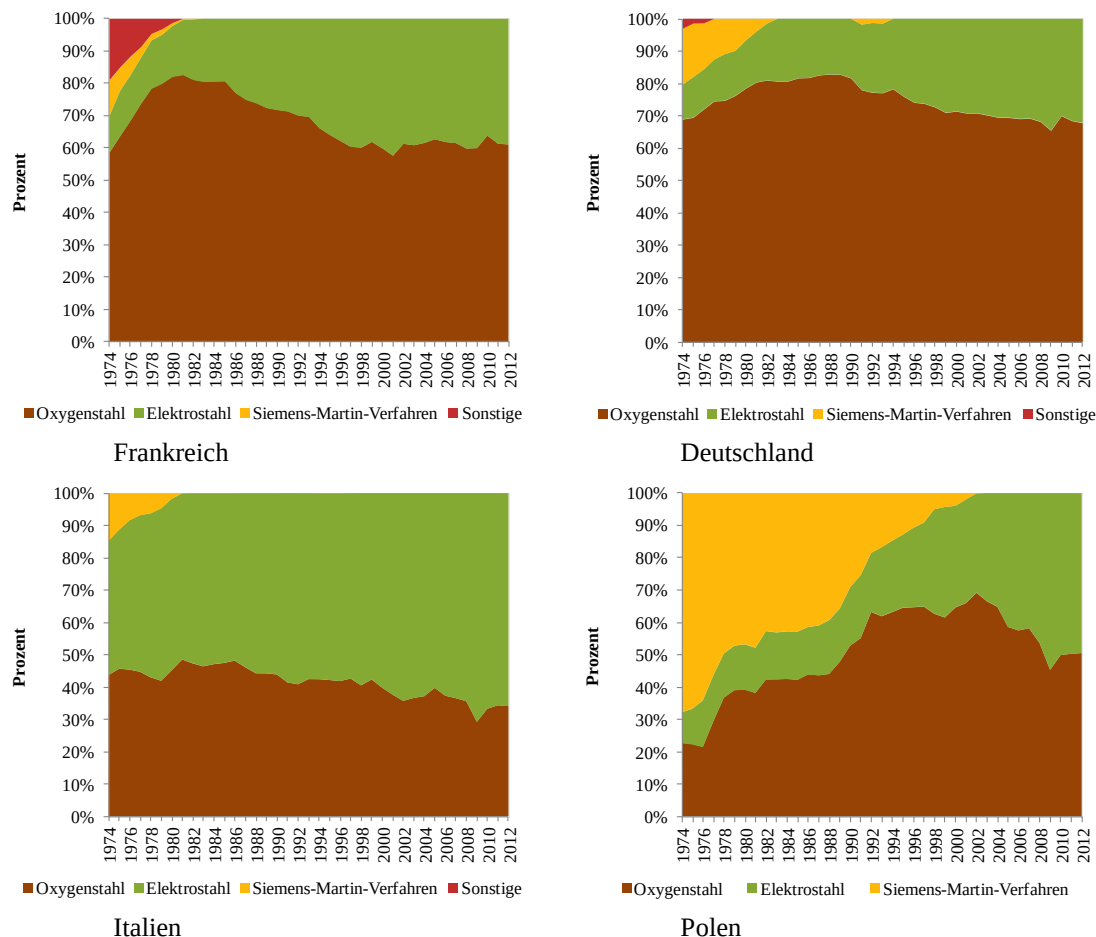
¹¹⁶ Die inländische Stahlnachfrage wird dargestellt durch den sichtbaren Stahlverbrauch.

¹¹⁷ NACE2: 28

¹¹⁸ Frankreich 1960, Deutschland 1970, Italien 1960, Polen 1990

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

Bereits Herbst et al. (2014b, S. 203) stellten ähnliche Tendenzen in der deutschen und französischen Produktionsstrukturentwicklung fest. Der Anteil der primären Produktionsroute an der gesamten Stahlproduktion ist in beiden Ländern dominierend (61% in Frankreich, 68% in Deutschland im Jahr 2012; Abbildung 13; World Steel Association (mehrere Ausgaben)).



Quelle: Daten von World Steel Association (mehrere Ausgaben), eigene Darstellung nach Herbst et al. (2014b, S. 204)

Abbildung 13: Rohstahlproduktion nach Prozess FR, DE¹¹⁹, IT, PL (1974-2012)

Italien hingegen ist ein traditioneller Elektrostahlproduzent (Herbst et al. 2014b, S. 203), welcher bereits 1974 mit 41% beinahe das Niveau der primären Produktionsroute (44%) erreichte (World Steel Association mehrere Ausgaben). Seit den siebziger Jahren wurde der Anteil des sekundären Produktionsprozesses in Italien trotz stark steigender Strompreise (Abbildung 11) auf 66% in 2012 ausgeweitet (Abbildung 13; World Steel Association (mehrere Ausgaben)). In Polen fand eine systematische Ausweitung der sekundären Produktionsroute erst Ende der achtziger/Anfang der neunziger Jahre statt, erreichte jedoch 2012 bereits 49% der gesamten Rohstahlproduktion (Abbildung 13; World Steel Association (mehrere Ausgaben)).

¹¹⁹ Vor Wiedervereinigung nur Westdeutschland.

Es lässt sich somit für alle betrachteten Schwerpunktländer ein Trend hin zur sekundären Produktionsroute feststellen. Ursächlich für diese Entwicklung kann unter anderem der wesentlich niedrigere Energieverbrauch (nur rund ein Drittel; Arens et al. 2012, S. 789) der Elektroofenroute gegenüber der Hochofenroute sein.

In wieweit dieser Trend für die Zukunft beibehalten werden kann, hängt - wie bereits erwähnt - von zukünftiger Schrottverfügbarkeit, Schrottqualität (Herbst et al. 2014b, S. 202), aber auch der Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Stählen bzw. der Baukonjunktur ab. Für einen der befragten Experten erschien die baldige Produktion von Kaltblechen in der Elektroofenroute nicht absehbar, weshalb auch vermutet werden kann, dass für Länder wie Deutschland Stahl aus der Hochofenroute weiterhin ein wichtiges wertschöpfungsintensives Produktionssegment bleiben dürfte.

Sektorale Aufteilung des sichtbaren Stahlverbrauchs

Die Aufteilung der sektoralen Stahlnachfrage (θ) (des sichtbaren Stahlverbrauchs; sSV) erfolgte in Anlehnung an Pauliuk et al. (2013c, S. 26) und Müller et al. (2011a) auf folgende vier Sektoren: Baugewerbe, Transport, Maschinen und Anlagen (Industrieanlagen, Landwirtschaftsmaschinen, etc.), Produkte und Sonstige (Elektrotechnische Anlagen, Haushalts- und Handelsprodukte, Geräte, Metallprodukte, etc.). Die Daten für das Basisjahr 2010 stammen vom europäischen Stahlverband EUROFER (Vermeij 2015) und der Homepage des deutschen Stahlzentrums (Booz & Company o.J.). Hier zeigen sich für alle Länder erhebliche Abweichungen zu den in Pauliuk et al. (2013d, S. 33–36) basierend auf einer Optimierungsroutine getroffenen Annahmen.

Die zukünftige Entwicklung (2010-2035) der sektoralen Stahl-Nachfrageverteilung ist direkt mit der strukturellen Entwicklung eines Landes und der Aktivitäten der einzelnen Sektoren und Branchen verbunden. Im Referenzszenario wird eine Indikation dieser Aktivität über die Wertschöpfungsentwicklung der stahlnachfragenden Branchen widerspiegelt, welche detailliert in Tabelle 21 dargestellt wurde. Die Annahmen zur Aufteilung der sektoralen Entwicklung (ohne zusätzliche Materialstrategien) der Stahlnachfrage (Tabelle 43), wurden somit basierend auf zwei Informationsquellen getroffen:

- Es wurden Expertenbefragungen zur zukünftigen Verteilung der Stahlnachfrage durchgeführt. Diese wurden jedoch vom Autor an die zugrundeliegenden wirtschaftlichen Rahmendaten angepasst, da diese Information nicht von allen Experten bei deren Einschätzung der zukünftigen Entwicklung berücksichtigt wurde.
- Die ökonomisch-strukturelle Entwicklung des Referenzszenarios aus dem makroökonomischen Modell ASTRA.

Tabelle 43: Sektorale Aufteilung des sichtbaren Stahlverbrauchs

Sektor	Pauliuk et al. (2013d, S. 33–36) ¹²⁰	1950	2010	2020	2035	2020	2035
		Booz & Company (o.J.), Vermeij (2015)		nach Materialstrategien und Trends zu höherer Wertschöpfung			
Frankreich							
Baugewerbe	47,0	50,0	38,6	38,8	39,2	40,1	42,5
Transport	30,0	13,0	21,8	22,3	22,7	20,7	18,7
Maschinen und Anlagen	10,0	13,0	17,7	18,4	19	18,7	19,7
Produkte und Sonstiges	13,0	24,0	21,9	20,5	19,1	20,5	19,1
Deutschland							
Baugewerbe	47,0	48,0	34,0	35,0	33,5	36,3	36,8
Transport	30,0	15,0	25,0	25,5	26,0	23,7	21,7
Maschinen und Anlagen	10,0	12,0	13,0	14,0	15,0	14,3	15,7
Produkte und Sonstiges	13,0	25,0	28,0	25,5	25,5	25,7	25,8
Italien							
Baugewerbe	47,0	51,0	47,8	48,3	48,7	49,5	51,7
Transport	32,0	13,0	15,0	15,4	15,3	14,1	12,3
Maschinen und Anlagen	11,0	14,0	19,1	19,6	20,1	19,7	20,4
Produkte und Sonstiges	10,0	22,0	18,1	16,7	15,9	16,6	15,6
Polen							
Baugewerbe	31,0	50,0	48,3	51,0	52,0	52,3	55,3
Transport	29,0	10,0	14,8	16,0	16,0	14,7	12,9
Maschinen und Anlagen	25,0	13,0	11,1	12,0	11,5	12,1	11,7
Produkte und Sonstiges	15,0	27,0	25,8	21,0	20,5	20,9	20,1

Quelle: eigene Schätzung/Berechnung nach Expertenbefragung

Für Frankreich wird der größte relative Zuwachs des Nachfrageanteils, ohne die Berücksichtigung von zusätzlichen Trends zu höherer Wertschöpfung als auch zusätzlichen Anstrengun-

¹²⁰ Angaben für Frankreich und Benelux gemeinsam.

gen im Gebiet der Materialstrategien, im Bereich der Maschinen und Anlagen (19% in 2035) und dem Fahrzeugbau (22,7% in 2035) erwartet (Tabelle 43), welche auch im ökonomischen Referenzszenario die stärksten Wachstumsraten verzeichnen (vgl. Tabelle 21). Der Anteil des Baugewerbes, welches verhältnismäßig geringerem Wachstum unterliegt, steigt schwächer auf 39,2% im Jahre 2035 an, während für Produkte und Sonstige ein Rückgang des Nachfrageanteils auf 19,1 angenommen wird. Nach der Einführung zusätzlicher Materialstrategien und strukturellem Wandel aufgrund von produktbegleitenden Dienstleistungen und anderen Trends zu höherer Wertschöpfung (die hier zugrundeliegenden Annahmen werden in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert) findet eine Verschiebung dieser sektoralen Nachfrageverteilung statt, in welcher die Anteile der Sektoren mit den größten Reduktionspotentialen (Fahrzeugbau und Maschinenbau) abnehmen. Die daraus resultierende Entwicklung stimmt für Fahrzeugbau und Baugewerbe mit der, von den Experten getroffene Annahme zur zukünftigen Trend-Entwicklung der Stahlnachfrage in diesen Sektoren überein. Die weiterhin bestehenden Abweichungen im Bereich Maschinen und Anlagen als auch Produkte und Sonstige begründen sich aus den zugrundeliegenden makroökonomischen Rahmendaten, welchen in dieser Simulation Rechnung getragen werden muss.

Des Weiteren wird im Referenzszenario angenommen, dass Deutschland seinen Anteil des Baugewerbes an der Stahlnachfrage bis 2020 etwas erhöhen, bis 2035 aber wieder etwas reduzieren wird (Tabelle 43) wird. Auch diese Entwicklung spiegelt das starke Wachstum dieses Sektors (+5,22% p.a. bis 2020) und die darauffolgende Stagnation wieder (Tabelle 21). Wie auch in Frankreich sind die hohen Wachstumsraten im Fahrzeug- und Maschinenbau mit Grund für die Anteilserhöhung bis 2035 auf 26 bzw. 15 Prozent. Durch die Einflüsse der getroffenen Materialstrategieannahmen und des Strukturwandel-Quotienten, sinken jedoch die Anteile der beiden Sektoren und verursachen einen entsprechenden Zuwachs in den beiden übrig gebliebenen Sektoren Baugewerbe und Produkte und Sonstige, welche über weitaus geringere Reduktionspotentiale verfügen. Die Trends nach Materialstrategieverbesserungen im Fahrzeug- und Maschinenbau unterscheiden sich in deren Tendenz von der getroffenen Expertenschätzung. Da die Anteilserhöhung im Fahrzeugbau jedoch bereits aufgrund der ökonomischen Entwicklung berücksichtigt wurde und die Reduktionspotentiale für den Fahrzeugbau und den Maschinenbau ebenfalls mittels Literaturrecherche und Expertenbefragung geschätzt wurden erscheint die hier berechnete Entwicklung nach intra-industriellem Strukturwandel plausibel.

Auch die Referenzszenario-Entwicklung in Italien ist gekennzeichnet von hohem Wachstum im Maschinenbau, aber auch im Baugewerbe. Für den Fahrzeugbau wird eine Stagnation nach 2020 vermutet. Wie in Frankreich und Deutschland spiegeln auch hier die Annahmen zur sektoralen Nachfrageentwicklung diese Rahmendaten wieder (Tabelle 43). Die sektorale Aufteilung des sichtbaren Stahlverbrauchs nach Materialstrategien und Trends zu höherer Wertschöpfung im Fahrzeug- und Maschinenbau entsprechen der getroffenen Expertenschät-

zungen, für das Baugewerbe (Zuwachs) und Produkte und Sonstige (Abnahme) werden genau gegenläufige Trends vermutet, welche mit den hohen Wachstumsraten im Baugewerbe und den verhältnismäßig niedrigen Wachstumsraten im Bereich Computer, Elektronik (Tabelle 21) aber auch der Nahrungsmittelindustrie (1,01% p.a. bis 2020; 0,91% p.a. bis 2035) begründet werden können.

In einem Szenario ohne zusätzliche Materialstrategien wird, unter Berücksichtigung derselben Argumentation wie zuvor, ein weiterer Zuwachs des Anteils des Baugewerbes bis 2035 in Polen angenommen (Tabelle 43). Da für den Fahrzeugbau kaum zusätzliches Wachstum (+0,09% p.a.) nach 2020 im Referenzszenario untergestellt wird bleibt auch dessen Anteil an der Stahlnachfrage nach 2020 konstant. Im Maschinenbau kommt es bis 2020 zu einer leichten Zunahme, welche jedoch bis 2035 durch rückläufiges Wachstum wieder kompensiert wird. Für Produkte und Sonstige, wird ein Rückgang des Nachfrageanteils auf 20,5% angenommen. Bis auf den Fahrzeugbau, in welchem von höheren Reduktionspotentialen durch Materialeffizienz und -substitution ausgegangen wird, entsprechen die berechneten Anteile den Tendenzen der durchgeführten Expertenbefragungen.

Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die hier getroffenen Annahmen, im Gegensatz zu dem Optimierungsansatz von Pauliuk et al. (2013c, S. 26) und zur zukünftigen Weltregionen Entwicklung in Pauliuk et al. (2013a, S. 3449–3451), durch deren empirische Basis, länderspezifischen Befragungscharakter und die Orientierung an den makroökonomischen Rahmenannahmen zur Nachfrageentwicklung. Eine derartige Bestimmung, dieser maßgeblich die Modellergebnisse beeinflussenden Größe, erscheint dem Autor vorteilhaft, da länderspezifische Entwicklungen der Nachfragesektoren beachtet werden müssen und damit auch länderspezifisches Knowhow genutzt werden muss, um Entwicklungen der industriellen Branchenstruktur auf Länderebene berücksichtigen zu können.

Strukturwandel-Quotient

Der in die Modellierung eingeführte Strukturwandel-Quotient (α) dient zur Berücksichtigung von zukünftigen Trends zu höherer Wertschöpfung in den einzelnen Branchen, zusätzlich zu dem bereits durch die Empirie erfassten Trend der Vergangenheit in der der Regressionsanalyse (Herbst et al. 2014b, S. 208). Wie bereits in Herbst et al. (2014b, S. 206) diskutiert, können - unter der Hypothese, dass es zukünftig zu einer stärkeren Entkopplung der Bruttowertschöpfung der stahlnachfragenden Sektoren und der tatsächlich verbrauchten Menge Stahl (in Tonnen) in diesen Sektoren kommt - zwei Hauptursachen für diese Entwicklung identifiziert werden: einerseits die Verwendung höherwertiger Produkte (z.B. hochfeste Spezialstähle), und andererseits eine Ausweitung existierender bzw. die Einführung neuer produktbegleitende Dienstleistungen (z.B.: Wartung von Maschinen und Anlagen, Projektmanagement, Leasing-Konzepte, Übernahme von Entwicklungsarbeiten für die Kunden, etc.) sein (vgl. Ab-

schnitt 1.2.2; siehe auch Herbst et al. (2012a, S. 412), Gerspacher et al. (2011, S. 15–17), Schade et al. (2009, S. 92)).

Tabelle 44: Strukturwandel-Quotient

Sektor	Potential in Prozent p.a. 2010-2035	Kommentar
Produktbegleitende Dienstleistungen		
Baugewerbe	-0,003	Planung, Baubetreuung, Sicherheitsprüfungen
Transport	-0,200	Finanzierungsdienstleistungen, Leasing
Maschinen und Anlagen	-0,090	Wartung von Maschinen und Anlagen; Planungs-, Akquise-, Contracting- und Managementtätigkeiten, auch im Ausland
Produkte und Sonstiges	-0,010	Contracting, Leasing, Finanzierung, Beratung

Quelle: eigene Schätzung

Der hier Tabelle 44 abgebildete Strukturwandel-Quotient dient zur Erfassung des Einflusses von produktbegleitenden Dienstleistungen. Die Verwendung höherwertiger Produkte wird im Abschnitt „Materialstrategie-Parameter“ adressiert. Für das Referenz-Szenario wird eine zusätzliche Entkopplung von Wertschöpfung und Stahlverbrauch durch einen zusätzlichen produktbegleitende Dienstleistungen bis 2035 um -0,003% p.a. im Baugewerbe, um -0,2% im Transportsektor, um -0,09% p.a. im Maschinen- und Anlagenbau und -0,01% p.a. für Produkte und Sonstige in den betrachteten Ländern angenommen (Tabelle 44).

Diese Annahmen wurden in Abstimmung mit den nachfolgenden Material-Strategieparametern getroffen (Berücksichtigung des gesamten Einsparpotentials aus produktbegleitenden Dienstleistungen und Materialstrategien für das Jahr 2035); auch wenn sie großen Unsicherheiten unterliegen, wurden sie aus methodischen Gründen aufgenommen, um die Entwicklung einer weit fortgeschrittenen Industriestruktur simulieren zu können, die kaum noch durch die Ausweitung der physischen Produktionen wächst. Die Erkenntnisse zu einer zusätzlichen Entkopplung von Wertschöpfung und Stahlverbrauch durch zusätzliche produktbegleitende Dienstleistungen sind derzeit sehr gering; hier bedürfte es verstärkter Analysen, um Schätzunsicherheiten zu verringern. Die geringen Potentiale, welche für dieses Referenz-Szenario angenommen wurden, sollen dennoch die Modellierung dieser Entwicklung ermöglichen und einen vermuteten Trend quantitativ abbilden.

Materialstrategie-Parameter

Zur Bestimmung des jährlichen Einsparpotentials der Stahlnachfrage für das zugrunde liegende Referenzszenario durch die Materialstrategie-Parameter (γ)

- Materialeffizienz,
- Materials substitution,
- intensivere Produktnutzung und
- Wiederverwendung

wurde eine Literaturanalyse aktueller Studien zu Materialstrategien durchgeführt (siehe Tabelle 45). Diese dienten als Basis für die Schätzung zukünftiger europäischer Potentiale, welche dann im Rahmen einer Expertenbefragung validiert und wo notwendig angepasst wurden.

Unter **Materialeffizienz** werden Maßnahmen zum Stahlmindereinsatz ohne Substitution verstanden.

Das systematische Durchdenken möglicher Materialeffizienz-Strategien führt zu einer Reihe von Möglichkeiten, dass die Nachfrage (und Produktion) von Stahl und seinen Erzeugnissen in Zukunft unterproportional zur Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Stahlindustrie oder der stahlnachfragenden Branchen zunimmt (oder eventuell auch rückläufig sein könnte). Im Fall der **Stahls substitution** könnten andere Branchen wie die NE-Metalle, Kunststoff oder Holzverarbeitende Industrie leichte Wachstumsimpulse erhalten.

Einen sehr geringen Beitrag muss man allerdings von der **Wiederverwendung** von Maschinen, Anlagen und anderen Stahlprodukten erwarten. Hier wird in aller Regel das neu aus Stahl hergestellte Produkt eine höhere Leistungsfähigkeit (z.B. Fahrzeuge), eine erhöhte Kapital- und Arbeitsproduktivität (z.B. Anlagen und Maschinen) oder einen höheren Nutzen für den Endverbraucher haben.

Aus diesen Optionen effizienterer Materialnutzung, Stahls substitution, Wiederverwendung und intensivere Produktnutzung könnte bei einer entsprechenden Materialeffizienz-Politik durchaus ein Gesamteffekt gedämpfter Nachfrage (und Produktion) von Stahl in der Höhe von ungefähr 0,5% pro Jahr die Folge sein (siehe auch Jochem (2004b, S. 38); vgl. Abbildung 20 und Abbildung 17).

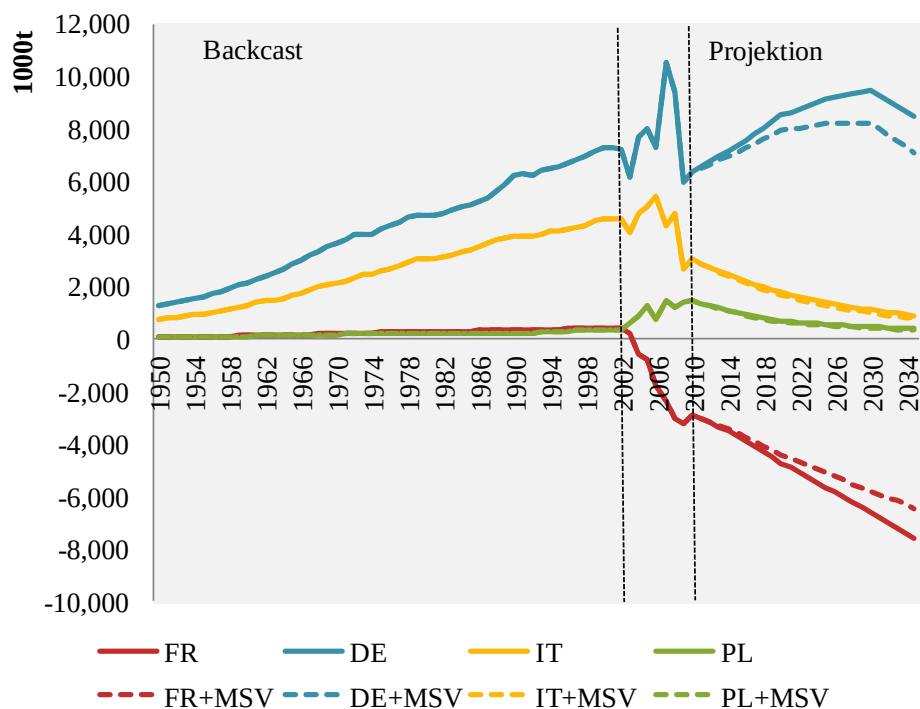
Tabelle 45: Materialstrategie Parameter für Materialeffizienz, -substitution, intensivere Nutzung und Wiederverwendung

Sektor	Literatur	Potential in Prozent p.a. bis 2035	Kommentar
Materialeffizienz			
Baugewerbe		-0,40	verbesserte Berechnungsverfahren, erhöhter Einsatz von Vorfertigung
Transport	Lemken et al. (2008) Carruth et al. (2011) Allwood et al. (2012) Milford et al. (2013) Allwood et al. (2013) bauforumstahl e. V. (2014) worldsteel (2013) Jochem (2004b)	-0,60	lineare Verbesserung in neuer Fahrzeugflotte profitiert von Erfahrungen der Fahrzeugindustrie und neuen Erkenntnissen der Bionik, Verminderung früherer Sicherheitszuschläge aufgrund verbesserter Kenntnisse und Simulation (inkl. Alterung)
Maschinen und Anlagen		-0,40	Einsatz dünnerer Bleche infolge verbesserter Materialeigenschaften durch höhere Reinheit, andere Legierungen und Verfahren
Produkte und Sonstiges		-0,50	
Materialsubstitution			
Baugewerbe		0,00	kleiner Mehranteil an Holz/Stein und Kupfer wird kompensiert durch Stahlbau
Transport	Jochem et al. (2004) Jochem und Reitze (2014) Jochem (2004b)	-0,60	Aluminium, kohlenfaserstoffverstärkter Kunststoff, Magnesium (Kosten vs. Nutzen)
Maschinen und Anlagen		0,00	Stahl vorteilhafter wenn es um Festigkeit und Sicherheit geht
Produkte und Sonstiges		-0,20	Verpackungsbereich bereits ausgeschöpft, evtl. Potential im Gerätebereich zugunsten Kunststoff
Intensivere Produktnutzung			
Baugewerbe		0,00	Siedlungsverlagerungen, Trend zu höheren m ² /Person
Transport	Allwood et al. (2012) Milford et al. (2013a) Allwood (2013)	-0,10	car-sharing, car-pooling (hohe Unsicherheit)
Maschinen und Anlagen	Jochem (2004b)	-0,10	verstärkter Schichtbetrieb, flexiblere Arbeitszeiten, Wochenendarbeit
Produkte und Sonstiges		-0,01	Potential im Gerätebereich, Pooling, Leasing (Reparatur-Café, Tausch)
Wiederverwendung			
Baugewerbe		0,00	Potentiale kaum abschätzbar und voraussichtlich sehr gering; Re-use nur unter Einbezug des Exports
Transport	Cooper und Allwood (2012)	-0,01	nach Schwellen- und Entwicklungsländern von wachsender Bedeutung für weltweite „Stahleffizienz“
Maschinen und Anlagen	Allwood et al. (2012) Milford et al. (2013a) worldsteel (2012)	-0,01	
Produkte und Sonstiges		0,00	

Quelle: eigene Schätzung und Expertenbefragung

Indirekter Stahlhandel

Der indirekte Stahlhandel, welcher durch die indirekten Stahl-Nettoexporte (*indNX*) eines Landes abgebildet wird und zur Berechnung des tatsächlichen Stahlverbrauchs benötigt wird, ist ein relativ neuer Indikator der World Steel Association (2012). Wie bereits in Herbst et al. (2014b, S. 206) diskutiert, sind die aktuell von der World Steel Association (2013, S. 110–111) zur Verfügung gestellten Zeitreihen aufgrund deren Neuheit relativ kurz (letztes verfügbares Jahr zum Zeitpunkt der Modellentwicklung 2002); deshalb kann ein ökonometrischer Ansatz zur Projektion der zukünftigen Entwicklung nicht genutzt werden.



Quelle: eigene Berechnung, World Steel Association (2013, S. 110)

Abbildung 14: Indirekte Stahl-Nettoexporte FR, DE, IT, PL (1950-2035) mit und ohne Materialstrategieverbesserungen (MSV)

Die Projektion der länderspezifischen Entwicklung (Abbildung 14) für die Simulationsperiode 2011 bis 2035 erfolgt in Anlehnung an die Entwicklung des Handelswertes der Nettoexporte der Sektoren Metallprodukte, industrielle Maschinen, Computer, Elektronik, Fahrzeugbau und der Ernährungsindustrie des Szenarios aus dem makroökonomischen Modell ASTRA. Der Backcast der indirekten Stahl-Nettoexporte bis 1950 erfolgte durch die Kopplung an die wirtschaftliche Aktivität (BIP) der jeweiligen Länder, da eine detaillierte Berechnung der indirekten Stahl-Nettoexporte für einen derartig langen Zeitraum den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde.

Um Berechnungen auf sektoraler Ebene zu ermöglichen wurde dann das Aggregat der indirekten Stahl-Nettoexporte entsprechend der zuvor diskutierten Anteile (Tabelle 43: ohne zusätzliche MSV und Trends zu höherer Wertschöpfung) auf die Sektoren Baugewerbe, Transport, Maschinen und Anlagen, Produkte und Sonstige aufgeteilt. Da es sich bei der Stahlindustrie um eine stark internationalisierte Branche mit vielen großen internationalen Konzernen handelt, ist anzunehmen, dass sich die Erkenntnisse im Bereich der Materialeffizienz und -substitution sowie einer entsprechenden Materialeffizienz-Politik länderübergreifend verbreiten. Hierzu dürften sowohl die Bestrebungen der ebenfalls häufig international agierenden Unternehmen in den Nachfragesektoren (Fahrzeuge, Maschinen, Anlagen) mit der Strategie einheitlicher Produkte und Produktionsverfahren sowie Produktionsstandorte beitragen als auch die Politik in der EU und längerfristig auch in anderen Wirtschaftsregionen. Deshalb wurden auch für die indirekten Stahl-Nettoexporte die zuvor beschriebenen Materialstrategieverbesserungen in den Szenario-Rechnungen angewandt.

Durchschnittliche Nutzungsdauer

Für die Simulation wird angenommen, dass sich die durchschnittliche Nutzungsdauer (*ND*) der betrachteten Stahlproduktgruppen für Deutschland, Frankreich, Italien und Polen nicht unterscheidet und sich auch über den Projektionshorizont im Referenz-Szenario keine Änderungen (ohne zusätzliche Anstrengungen zur Nutzungsdauerverlängerung) in der durchschnittlichen Nutzungsdauer ergeben. Eine für das Jahr 2010 getroffene Schätzung des Autors basierend auf Jochem et al. (2004, S. 45)¹²¹ und wurde mittels Expertenbefragung plausibilisiert und gegebenenfalls angepasst (Tabelle 46)¹²². Die Standardabweichung für das in Abschnitt 5.2.4.2 beschriebene Lebensdauermodell beträgt 50% der Nutzungsdauer im Baugewerbe und 30% (vgl. Pauliuk et al. (2013c, S. 26)) der Nutzungsdauer für die übrigen Sektoren.

Im Vergleich hierzu verwenden Pauliuk et al. (2013c, S. 26), wie bereits für die Verteilung der sektoralen Nachfrage diskutiert, eine Optimierungsroutine zu Identifizierung der optimalen Nutzungsdauer. Insbesondere für Frankreich und Italien erscheinen deren Nutzungsdauern im Bereich der Maschinen und Anlagen mit 40 bzw. 30 Jahren als überdurchschnittlich hoch, und dies scheint tendenziell für alle Produktbereiche in Frankreich zu gelten. Natürlich gibt es Anlagen und Schwermaschinen in der Grundstoffindustrie sowie im Kraftwerksbereich, wo diese Lebensdauern als typische Re-Investitionszeiten anzusetzen sind. Andererseits sind die Maschinen- und Anlagen-Re-Investitionszeiten in allen anderen Industriebereichen eher zwischen 5 und 15 Jahren, entweder weil sich die hergestellten Produkte ändern

¹²¹ Originalquelle konnte nicht gefunden werden: Ewers, R. (VDEh): Schrottwirtschaft in der Stahl-industrie. Zusatzstudium Stahl 2001/02, Präsentation des VDEh an der RWTH Aachen, Oktober 2001.

¹²² Für eine detaillierte Übersicht dieser und weiterer Nutzungsdauern siehe Herbst et al. 2014b, S. 207.

(und damit die Maschinen), oder die neuen Generationen der Produktionsmaschinen und Anlagen haben wesentliche Kosten- und Qualitätsvorteile, so dass eine 30- oder 40-jährige Nutzungszeit aus Wettbewerbsgründen nicht möglich sein dürfte. Eine allgemeine Richtlinie zur Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen findet man unter VDI-Richtlinie 3423 (2002).

Tabelle 46: Durchschnittliche Nutzungsdauer

Sektor	Jochem et al. (2004, S. 45) ¹²³	Pauliuk et al. (2013d, S. 33–36)	2010-2035
Baugewerbe			
Frankreich	Bauhauptgewerbe	100	60
Deutschland	60	50	60
Italien	Stahlbau	50	60
Polen	50	50	60
Transport			
Frankreich	Fahrzeugbau	27	17
Deutschland	11	13	17
Italien	Rest	20	17
Polen	30	13	17
Maschinen und Anlagen			
Frankreich		40	17
Deutschland	Maschinenbau	20	17
Italien	20	30	17
Polen		20	17
Produkte und Sonstiges			
Frankreich		20	7
Deutschland	1-20	10	7
Italien		15	7
Polen		10	7

Quelle: eigene Schätzungen nach Experten-Plausibilitätskontrolle

¹²³ Schiffbau (40), Elektrotechnik (18), Weißblech (1), EBM (15), Sonstige (20), Rohrbau (50).

Schrottraten und End-of-Life Recycling

In der Stahlproduktion und -verarbeitung können zwei Arten von Schrott anfallen: Schrott welcher direkt im ersten Produktionsschritt bei der Rohstahlerzeugung anfällt (hier auch „Eigenschrott“ (*SchEig*) genannt, z.B. Gießköpfe, Anfangs- und Endstücke beim Walzen) und Schrott, welcher bei der Produktion von Stahlhalb- und Fertigerzeugnissen anfällt (hier auch „Neuschrott“ (*SchNeu*) genannt, z.B. Stanzabfälle, Dreh-, Bohr- und Frässpäne) (Herbst et al. 2014b, S. 202; Michaelis und Jackson 2000, S. 133–134). In der Praxis wird jedoch nicht immer zwischen Eigen- und Neuschrott unterschieden, da Produktion und Fertigung in engem Verhältnis stehen können und Neuschrotte aus Produktionsbetrieben dann direkt an das Stahlwerk zurückgeliefert werden.

Die Eigenschrottrate (η) wird definiert als Eigenschrott-Aufkommen in Tonnen geteilt durch die Rohstahlproduktion in Tonnen.¹²⁴ Das Eigenschrott-Aufkommen kann erklärt werden als Differenz der Rohstahl- und der Stahl-Fertigerzeugnis-Produktion (Michaelis und Jackson 2000, S. 138) sowie der Produktion von Stahl-Halberzeugnissen. Basierend auf Daten der World Steel Association (mehrere Ausgaben) zur Rohstahlproduktion (*RSP*), dem sichtbaren Stahlverbrauch (*sSV*), der Exporte (*HFeEX*) und Importe (*HFeIM*) von Stahl-Halb- und Fertigerzeugnissen wurde eine fiktive länderspezifische Eigenschrottrate für das Basisjahr 2010 als Durchschnitt der Jahre 1995 bis 2010¹²⁵ wie folgt ermittelt:

$$\eta_{i(t_0)} = \frac{\sum_{t_j=1995}^{2010} \frac{SchEig_{i(t_j)}}{RSP_{i(t_j)}}}{t_{2010} - t_{1995}}$$

unter der Annahme, dass

$$SchEig_{i(t_j)} = RSP_{i(t_j)} - (sSV_{i(t_j)} + HFeEX_{i(t_j)} - HFeIM_{i(t_j)})$$

gilt.

Zur Projektion der zukünftigen Entwicklung der Eigenschrottrate wurde eine Expertenbefragung durchgeführt. Da die Startwerte für das Jahr 2010 nach der Expertenbefragung noch einmal angepasst werden mussten, konnten die Befragungsergebnisse nicht direkt übernommen werden, und dienten dem Autor als Orientierung für die in Tabelle 47 getroffenen Annahmen. Die auf diesem methodischen Weg geschätzte Eigenschrottrate ist ebenfalls mit hohen Unsicherheiten belastet.

¹²⁴ Wie bereits zuvor erwähnt berechnen auch Pauliuk et al. 2013c, S. 25 (siehe auch Pauliuk et al. 2013d, S. 19 und Pauliuk et al. 2013d, S. 19) „forming losses“ mithilfe einer „forming scrap rate“ basierend auf einem globalen Durchschnittswert aus Cullen et al. 2012a.

¹²⁵ Ohne 2009 für Deutschland (Ausreißer).

Als mögliche Ursache für eine Senkung der Eigenschrottrate bis 2035 nennen die befragten Experten unter anderem weniger Verschnitt (z.B. durch endabmessungsnahes Gießen, bessere Messtechnik, verkürzte Prozessketten), aber auch weniger Ausschuss (z.B. weniger Qualitätsmängel, stärkere Automatisierung) in der Produktion. Jedoch wird bei der Senkung der Eigenschrottrate in Deutschland nur noch wenig Potential gesehen. Ein befragter Experte erachtet nur einen maximalen Rückgang der Eigenschrottrate auf 5% als möglich, denn insbesondere in den Walzprozessen wird es immer einen gewissen Anteil an Eigenschrottanfall geben. Trotz der ökonomischen Anreize, den Eigenschrottanfall noch zu reduzieren, sieht der Experte wenig Potential, diesen (basierend auf den vorgeschlagenen Anteilen des Jahres 2010) noch merklich senken zu können.

Tabelle 47: Eigenschrottrate in Prozent

Land	2010 ¹²⁶	2020	2035
Frankreich	6,3	6,0	5,5
Deutschland	6,5	6,0	5,5
Italien	7,2	6,8	6,6
Polen	9,2	8,5	7,8

Quelle: eigene Berechnungen aus World Steel Association (mehrere Ausgaben); Schätzungen basierend auf Expertenbefragung

Basierend auf Cullen et al. (2012b, S. 17), wurden Schätzungen der Neuschrottraten (δ) für die unterschiedlichen Sektoren und Länder getroffen. In einer Expertenbefragung wurde ein alternativer Vorschlag für das Basisjahr 2010 erfragt, jedoch schien das explizite Wissen zu den unterschiedlichen Neuschrottraten in den betrachteten Sektoren relativ gering, und es gab keine alternativen Vorschläge für Frankreich, Italien und Polen. Nur ein deutscher Experte gab an weit höhere Neuschrottraten als zuerst vermutet zu erwarten, was zu einer Anpassung aller länderspezifischen Werte führte (Tabelle 48). Die hier getroffenen Annahmen unterliegen folglich großen Unsicherheiten (insbesondere im Transportbereich und dem Maschinen- und Anlagenbau).

¹²⁶ Gerundet auf eine Kommastelle.

Tabelle 48: Neuschrottrate in Prozent

Sektor	Globaler Durchschnitt	Frankreich	Deutschland	Italien	Polen
	Cullen et al. (2012b, S. 17) ¹²⁷				
Baugewerbe	6	2	2	2	3
Transport	27	15	15	15	18
Maschinen und Anlagen	19	8	8	8	14
Produkte und Sonstiges	23	12	12	12	16

Quelle: eigene Schätzungen basierend auf Cullen et al. (2012b, S. 17) und Expertenplausibilisierung

Der dritte Schrotttyp welcher für die Materialflussmodellierung relevant ist, ist „Altschrott“ (*SchAlt*). Dieser kann definiert werden als jener Schrott, welcher am Ende der Nutzungsphase eines stahlhaltigen Produktes gesammelt und wieder dem Recyclingprozess zugeführt wird (Herbst et al. 2014b, S. 202; Michaelis und Jackson 2000, S. 134; Fleiter et al. 2013). Das Altschrottaufkommen ist häufig gekennzeichnet durch unbekannte Schrottzusammensetzung und erhebliche Verunreinigungen.

Die End-Of-Life Recyclingrate (r) des Baugewerbes in Deutschland für 2010 stammt aus dem „Sachstandsbericht zum Stahlrecycling im Bauwesen“ von Helmus und Randel (2014, S. 4), welche eine umfassende Literaturanalyse zu den Recyclingraten von Stahlprodukten des Bauwesens durchgeführt haben. Die dort zitierten Quellen des „*Institut Bauen und Umwelt e.V.*“ gehen von einer durchschnittlichen Recyclingrate von 88% für Baustahlprofile, Stahlbauhohlprofile und offene Walzprofile und Grobbleche aus (Institut Bauen und Umwelt e.V. 2010, S. 14–15, 2014, S. 4, 2013, S. 4). Denselben Wert, den auch Sansom und Meijer (2002, S. 48) für Stahlträger und Oberbalken festlegen. Die Recyclingraten des Baugewerbes für Frankreich, Italien und Polen in 2010 wurden etwas niedriger geschätzt (Tabelle 49). Für das Baugewerbe wird die Annahme getroffen, dass 100% des sich in Gebrauch befindlichen Stahls recycelt werden kann.

Für den Transportsektor wurde eine grobe Schätzung der Recyclingrate (r), basierend auf den Recycling- und Wiederverwendungsraten von Fahrzeugen (FR: 79%, DE: 95,5%, IT: 83,2%, PL: 88,8%; Eurostat 2014)¹²⁸, Zügen (95% durch Sondereffekt¹²⁹; Deutsche Bahn AG 2015)

¹²⁷ 1 minus Fertigungsertrag (als Bruch).

¹²⁸ Daten zu Frankreich und Italien erschienen dem Autor zu niedrig, weshalb höhere Annahmen im Fragebogen abgefragt wurden.

¹²⁹ Für die Modellierung wurde eher eine Recyclingrate von 90% vermutet.

und Flugzeugen, vom Autor für das Jahr 2010 vorgenommen. Als Ergebnis der Expertenbefragung wurden die Annahmen im Basisjahr für Frankreich leicht angepasst (Tabelle 49).

Auch die End-Of-Life-Recyclingraten (r) für Maschinen und Anlagen in 2010 konnten nur grob geschätzt werden, dies geschah in Anlehnung an die von worldsteel (2012, S. 14) bzw. worldsteel (2009, S. 2) für 2007 geschätzte durchschnittliche Rückgewinnungs-/Recyclingrate von 90%, und unter der Annahme, dass 100% des Stahls in den für Recyclingzwecke rückgewonnen Anlagen recycelt werden kann. Es wird vermutet, dass die Recyclingraten innerhalb der Europäischen Union höher sind als der dort angegebene Durchschnittswert (Tabelle 49).

Die Recyclingraten (r) für Produkte und Sonstige in Deutschland und Italien 2010 basieren auf einer Pressemitteilung des Verbands der europäischen Hersteller von Verpackungstahl (APEAL 2011) unter der Annahme, dass Verpackungsmaterialien den größten Anteil in dieser Gruppe ausmachen. Für Frankreich und Polen, weichen die im Modell eingesetzten Recyclingraten von den in APEAL (2011) gezeigten Recyclingraten ab (92% und 60% statt 71% und 48%), da diese Vergleichsweise niedrig erschienen. Für Frankreich wurde auch die in der Expertenbefragung angegebene Recyclingrate (74% nach damaligen Schätzungen) als zu niedrig kritisiert. Die neuen Recyclingraten für Polen und Frankreich wurden vom Autor im Verhältnis zu Deutschland und Italien festgelegt (Tabelle 49).

Eine Unsicherheit der Recyclingraten liegt auch darin, dass ein Teil der gebrauchten Fahrzeuge, Maschinen und Anlagen in Schwellen- oder Entwicklungsländer exportiert werden. Die Trends der Entwicklung der Recyclingraten für alle Sektoren bis 2035 wurden, basierend auf der durchgeführten Expertenbefragung, festgelegt, wobei die Ausgangswerte aus dem Jahr 2010 nach Verbesserung und Modellkalibrierung nicht mehr genau den abgefragten Basisjahrwerten aus den Fragebögen entsprachen und folglich auch nicht deren Entwicklung. Dennoch wurden (wo es sinnvoll erschien) die von den Experten vorgeschlagenen Trends in der Festlegung der zukünftigen Entwicklung aufgegriffen. Für das Baugewerbe vermuteten alle Experten - je nach Land - einen mäßigen bis etwas höheren Zuwachs der Recyclingrate, welcher in der Schätzung aufgegriffen wurde. Für den Transportsektor mit bereits verhältnismäßig hohen Recyclingraten wurde tendenziell (mit Ausnahme von Polen) nur ein mäßig leichter Anstieg vermutet. Im Bereich der Maschinen und Anlagen wurde ebenfalls von einem leichten Anstieg der Recyclingrate ausgegangen. Hierzu sind jedoch wenige Informationen verfügbar; ein konstantes Niveau der Recyclingrate im Maschinen- und Anlagenbau könnte ebenfalls ein plausibles Szenario für die Zukunft widerspiegeln. Für Produkte und Sonstige in Frankreich und Deutschland wurde nur noch wenig bis kein zusätzliches Potential vermutet, während in Italien und Polen etwas stärkerer Zuwachs möglich erscheint.

Tabelle 49: End-Of-Life-Recyclingrate in Prozent

Sektor	Frankreich		
	2010	2020	2035
Baugewerbe	85	87	90
Transport	94	96	97
Maschinen und Anlagen	95	96	96
Produkte und Sonstiges	92	93	93
	Deutschland		
	2010	2020	2035
Baugewerbe	88	89	90
Transport	95	96	98
Maschinen und Anlagen	95	96	97
Produkte und Sonstiges	93	93	93
	Italien		
	2010	2020	2035
Baugewerbe	85	86	88
Transport	90	91	92
Maschinen und Anlagen	95	96	97
Produkte und Sonstiges	78	81	85
	Polen		
	2010	2020	2035
Baugewerbe	85	86	88
Transport	89	92	95
Maschinen und Anlagen	93	94	95
Produkte und Sonstiges	60	65	70

Quelle: Helmus und Randel (2014, S. 4), Eurostat (2014), worldsteel (2012, S. 14), worldsteel (2009, S. 2), APEAL (2011) und eigene Schätzungen basierend auf Expertenbefragung

Grundsätzlich ist es schwierig eindeutige Aussagen zu Sammel- und Recyclingraten auf sektoraler Ebene zu treffen, weshalb für die Modellierung getroffenen Annahmen nur grobe Potentiale und Trends widerspiegeln können und keine detaillierten bottom-up erhobenen In-

formationen darstellen. Im Gegensatz zu den hier getroffenen Annahmen nutzen Pauliuk et al. (2013b, S. 17) dieselben Recyclingraten (aus worldsteel (2009)) für alle betrachteten Regionen ohne länderspezifische Charakteristika zu berücksichtigen. Dies ist angesichts der national unterschiedlichen Kreislaufwirtschafts- und Umweltschutz-Gesetzgebung und der Umsetzung in der Praxis höchstwahrscheinlich ein stark vereinfachendes Bild.

Schrott-Nettoexporte

Die länderspezifischen historischen Daten zur Entwicklung der Schrott-Nettoexporte (1971-2010), welche sich aus der Differenz der Schrott-Exporte minus der Schrott-Importe berechnen, stammen aus mehreren Ausgaben des „*Steel Statistical Yearbook*“ der World Steel Association (mehrere Ausgaben) (Abbildung 15). Für die Projektion der Schrott-Nettoexporte bis 2035 wurde die Entwicklung der Im- und Exporte mittels einer Schrottpreiselastizität¹³⁰ an die Entwicklung des zugrunde gelegten Schrottpreis-Szenarios (300 €/t in 2035) gekoppelt.

Während die Elastizitäten für Frankreich und Deutschland direkt aus der Empirie für die Projektion übernommen werden konnte, mussten für Italien (Exportelastizität) und Polen (Importelastizität) geringe Änderungen für die Projektion durchgeführt werden (Tabelle 50). Denn die – im Vergleich zu Deutschland und Frankreich sehr hohe Exportpreis-Elastizität von Italien erscheint für die kommenden 20 Jahre aus ökonomischen und Wettbewerbsgründen unwahrscheinlich. Ebenso wurde die hohe Import-Preiselastizität bei Polen der Vergangenheit deutlich für die Zukunft gesenkt und den Elastizitäten für Frankreich angeglichen.

Tabelle 50: Schrottpreiselastizitäten der jährlichen Wachstumsraten: historisch (1990-2012) und Projektion

Land	Export	Projektion	Import	Projektion
Frankreich	1,30	1,30	2,57	2,57
Deutschland	1,46	1,46	3,83	3,83
Italien	7,51	2,50	-0,25	-0,25
Polen	3,75	3,75	12,82	4,5

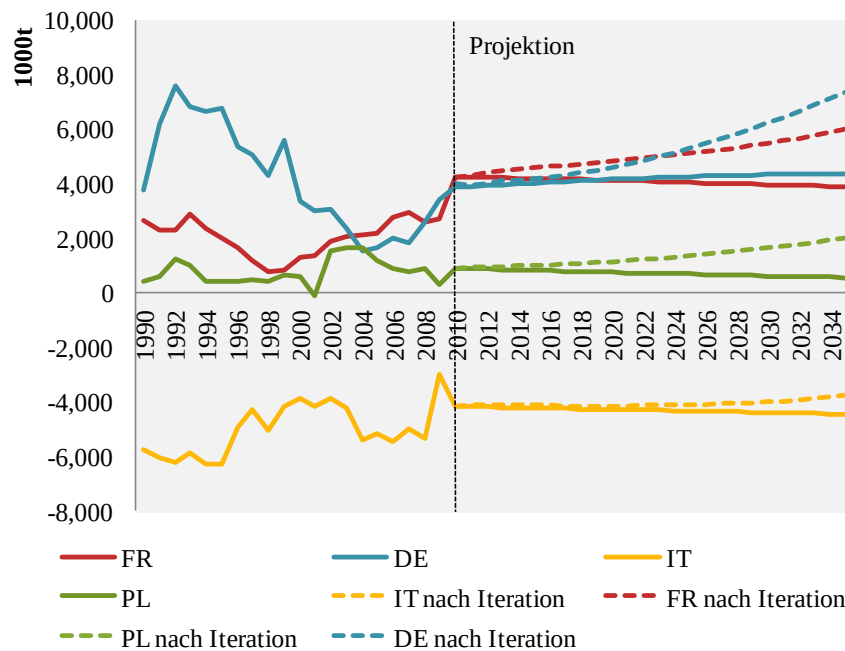
Quelle: eigene Berechnung aus Daten von United Nations (2015e), World Steel Association (mehrere Ausgaben)

¹³⁰ Die Schrottpreiselastizitäten wurden basierend auf dem zuvor vorgestellten durchschnittlichen Schrottpreis ermittelt.

Die Projektion der zukünftigen Nettoschrottexporte ($SchNX$) bildet sich dann als Differenz zwischen Schrott-Exporten und Schrott-Importen.

$$SchNX_{i(t)} = SchEX_{i(t)} - SchIM_{i(t)} \quad (M.15)$$

Im letzten iterativen Berechnungsschritt des Modells (vgl. Abschnitt 5.2.4.2) werden die tatsächlichen Nettoexporte nach Festlegung der inländischen Produktion jedoch noch einmal berechnet (dargestellt als gestrichelte Linien in Abbildung 15); sie stellen den überschüssigen nicht für die Produktion benötigten Schrott dar, welcher exportiert werden müsste bzw. den fehlenden Schrott, welcher im Fall von Italien importiert werden müsste.



Quelle: World Steel Association (mehrere Ausgaben), eigene Schätzung/Berechnung

Abbildung 15: Schrott-Nettoexporte FR, DE, IT, PL (1990-2035) vor und nach Modelliteration

Die Modellergebnisse zu den Schrott-Nettoexporten nach Iteration für Frankreich, Deutschland und Italien stimmen grundsätzlich mit den, von den Experten vermuteten, Entwicklungen über ein:

- Frankreich bleibt Schrott-Nettoexporteur und weitete diese, dem aktuellen Trend folgend, sogar noch aus.
- Deutschland wird weiterhin Schrott-Nettoexporteur bleiben und den Export bis 2035 auch noch steigern und würde damit Werte erreichen wie Anfang der 1990er Jahre.
- Italien, als traditioneller Elektrostahlproduzent, bleibt Schrott-Nettoimporteur, diese werden jedoch bis 2035 stagnieren, d.h. auf dem Niveau der letzten 15 Jahre bleiben.

- Für Polen wäre laut Expertenbefragung auch ein Szenario mit sinkenden Schrott-Nettoexporten möglich. In dem hier betrachteten Szenario, basierend auf der ökonomischen Entwicklung des makroökonomischen Modells ASTRA, erfährt Polen nur sehr moderates Wachstum seiner Rohstahlproduktion (siehe Ergebniskapitel). Folglich werden die akkumulierten Schrottmengen nicht vollkommen in der Elektrostahlproduktion verbraucht und Überschüsse in den Markt exportiert. Bei besseren wirtschaftlichen Entwicklungen, als hier seitens des ASTRA-Modells unterstellt, mag die Expertenschätzung dann als richtige Einschätzung bestätigt werden.

Grundsätzlich muss jedoch gesagt werden, dass eine Vielzahl an möglichen Entwicklungsszenarien des Schrott-Nettoexportverhaltens für die Länder der Europäischen Union existieren, welche nicht nur von den internationalen Schrottpreisen, sondern auch der globalen Nachfrage, Qualität, der internationalen Arbeitsteilung und der Produktionsstruktur, aber auch von industrie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen abhängen. So vermutete ein befragter Experte für Deutschland, dass auch eine Entwicklung, in welcher die deutschen Schrott-Nettoexporte stagnieren, und eventuell sogar ein Import bei entsprechender inländischer Nachfrage möglich wäre.

Schrotteinsatz-Parameter

Der Schrotteinsatz in Deutschland pro Tonne Oxygenstahl bzw. pro Tonne Elektrostahl wurde für die Jahre 2005 bis 2010 aus den Daten des *Statistischen Jahrbuchs der Stahlindustrie* der Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014, S. 25) berechnet. Für Frankreich, Italien und Polen wurde eine Abschätzung der historischen Werte in Anlehnung an die deutschen Einsatz-Parameter getroffen (Tabelle 51, Tabelle 52).¹³¹

¹³¹ Da die Daten des Statistischen Jahrbuchs der Stahlindustrie nur in Millionen Tonnen verfügbar waren, beinhalten die Zahlen für Deutschland einen geringen Grad an Ungenauigkeit, welcher sich im letzten Berechnungsschritt, bei der iterativen Berechnung der Netto-Schrottexporte für das Jahr 2010, widerspiegelt (sehr geringe Abweichung vom empirischen Wert, welche vom Autor als vernachlässigbar betrachtet wird vgl. Abbildung 15). Da es sich hier jedoch um die Zahlen einer empirischen Quelle handelt, wurde auf eine künstliche Modellkalibrierung verzichtet. Für die übrigen Länder, bei denen keine empirischen Quellen zur Verfügung standen, wurden die Werte im Jahr 2010 nach der dritten Kommastelle auf den historischen Schrottverbrauch des Jahres 2010 kalibriert.

Tabelle 51: Schrotteinsatz Oxygenstahl (in Tonnen pro Tonne)

Land	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2035
Frankreich	0,140	0,140	0,148	0,164	0,170	0,176	0,210
Deutschland	0,175	0,185	0,182	0,179	0,169	0,176	0,210
Italien	0,100	0,104	0,109	0,113	0,122	0,130	0,150
Polen	0,100	0,102	0,104	0,106	0,108	0,110	0,120

Quelle: berechnet aus Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014, S. 25), eigene Schätzungen

Für Deutschland wird ein leichter Knowhow-Vorsprung im Schrotteinsatz per Oxygenstahlauskommen unterstellt, welcher auch für Frankreich angenommen wurde. Für Italien, und Polen wurden etwas geringere Schrotteinsätze angenommen wurden (Tabelle 51). Tendenziell wird für alle Länder ein Zuwachs des Schrottanteils in der primären Produktionsroute bis 2035 angenommen, wobei dies unter der Annahme geschieht, dass die, für die Schrotteinsätze notwendigen, Roheisenqualitäten im Hochofen erzielt werden können (ein befragter Experte nannte dies als Prämisse). Zum Vergleich, Remus et al. (2013, S. 369) erhoben im „JCR Reference Report: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production“ der Europäischen Kommission Input- und Output-Daten von 21 Oxygenstahlwerken in der Europäischen Union und bestimmten einen Richtwert von 101 – 340 kg Schrott pro Tonne flüssigen Stahls. Somit scheinen sich die hier angenommenen Entwicklungen innerhalb eines technisch möglichen Rahmens zu bewegen.

Tabelle 52: Schrotteinsatz Elektrostahl (in Tonnen pro Tonne)

Land	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2035
Frankreich	1,050	1,040	1,046	1,040	1,033	1,054	1,010
Deutschland	1,044	1,034	1,040	1,034	1,027	1,045	1,010
Italien	1,040	1,038	1,037	1,036	1,035	1,035	1,010
Polen	1,140	1,125	1,115	1,110	1,115	1,111	1,010

Quelle: berechnet aus Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014, S. 25), eigene Schätzungen

Das Vorgehen zur Schätzung des Schrotteinsatzes per Elektrostahlauskommen für Frankreich, Italien und Polen verlief analog zur Schätzung beim Oxygenstahlauskommen. Hier wurde jedoch für Italien, mit dessen langer Tradition und Erfahrung in der Elektrostahlproduktion, ein geringerer Einsatzfaktor angenommen (Tabelle 52). Bis 2035 wird für alle Länder ein Rückgang des Schrottanteils in der sekundären Produktionsroute angenommen. Hier ist es jedoch wichtig anzumerken, dass der Schrotteinsatz in der Elektrostahlproduktion von einer Vielzahl von Faktoren wie z.B. Stahl- und Schrottqualitäten, Legierungsmittelkonzepten und Schlackenfahrweisen abhängt und nicht in erster Linie von technologischem Fortschritt.

Für das Referenzszenario wird angenommen, dass die zuvor genannten Faktoren sich im Einklang mit dem angenommenen Schrotteinsatz per Tonne Elektrostahl entwickeln. Auch hier bewegen sich die bis 2010 angenommenen Entwicklungen noch im Rahmen der aktuellen Analysen von Remus et al. (2013, S. 429) von 1039 – 1232 kg Schrott pro Tonne flüssigen Stahls. Laut Remus et al. (2013, S. 429) ist die Haupteisenquelle in der Elektrostahlproduktion Schrott, während flüssiges Roheisen und DRI nur unregelmäßig in relativ wenigen Anlagen eingesetzt wird (Gründe für den Einsatz können ökonomischer aber auch qualitativer Natur sein). Dennoch sollte erwähnt werden, dass diese Produktionsverfahren nicht explizit in der Modellierung/Analyse berücksichtigt wurden.

Eine ähnliche Größe, Schrottverbrauch pro Tonne Elektrostahl, konnte aus einer zuletzt 2014 aktualisierten Eurostat Statistik für die Jahre 2003 bis 2008 berechnet werden (Eurostat 2015c, siehe Anhang 9.2). Auch für die empirisch belegte historische Entwicklung in Deutschland (Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh 2014, S. 25) kommt es im Vergleich der Quellen zu Abweichungen, wodurch die Qualität der aus Eurostat (2015c) ermittelten Indikatoren nicht eindeutig bestimmbar ist, da einer nationalen Quelle wie der Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014, S. 25) der Vorzug zu gewähren ist. Tendenziell erscheinen die Abweichungen als vertretbar (die größten Abweichungen der im Modell getroffenen Annahmen finden sich für Italien), da die historischen Einsatzfaktoren lediglich der Modellvalidierung (2005 bis 2010) dienen und diese auch statistischen Unsicherheiten unterliegen.

Die für die Projektion getroffenen Annahmen sollen lediglich vermutete Trendentwicklungen widerspiegeln, deren tatsächliches quantitatives Ausmaß heute noch nicht abgeschätzt werden kann. Zentrale Annahme ist jedenfalls, dass sich die Schrotteinsatzquoten durch Verbreitung des technologischen Knowhows und Reinvestitionen mit gleichem technischem Niveau bis 2035 zunehmend angleichen (vgl. Tabelle 52). Zudem geht es im Fokus dieser Arbeit um die methodische Behandlung der Projektion von Schrottaufkommen und Elektrostahlproduktion. Die konkreten quantitativen Werte der entwickelten Modelle müssen für Projektionszwecke sowieso regelmäßig überprüft und ggfs. an ökonomische und technische Entwicklungen angepasst werden.

Schrotteinsatz-Anteil in der Oxygenstahlproduktion

Der **Anteil der Schrottnachfrage der Oxygenstahlproduktion ($SchA^{PP}$)** am tatsächlichen Schrottaufkommen eines Landes nach Nettoexporten wurde für Frankreich, Deutschland und Italien bis 2035 konstant auf dem Niveau von 2010 gehalten (23%, 28%, 6%; berechnet aus zuvor getroffenen Annahmen zu Schrotteinsatz, der Oxygenstahlproduktion von World Steel Association (mehrere Ausgaben) und den Modellergebnissen zum tatsächlichen Schrottaufkommen nach Handel). Für Polen wurde noch ein leichter Anstieg des Anteils in Annäherung an die deutschen und französischen Werte (von 9% auf 20%) vermutet. Mit Ausnahme von Frankreich (+5%) gab es zwischen 2005 und 2010 keine größeren Änderungen in der Entwicklung dieses Anteils. Gestützt wird die getroffene Annahme mit der Hypothese, dass die aktuellen Hochofenkapazitäten innerhalb Europas nicht zu 100% ausgelastet sind. D.h. sollte es zukünftig zu einem stärkeren Zuwachs der Oxygenstahlproduktion kommen, so kann dies aufgrund des starken internationalen Wettbewerbs im Bereich der Massenhähle nur auf einem Ausbau der Produktion qualitativ höherwertiger Produkte basieren, diese jedoch erfordern einen hohen Reinheitsgehalt wodurch nach aktuellem Wissensstand ein signifikant höherer Einsatz an Stahlschrott in diesem Fall auszuschließen ist.

Sinter-Produktion, Koks-Produktion, Walzstahlproduktion

Zur Projektion der zukünftigen Sinter Produktion wurde ein länderspezifischer **Sinterfaktor** (Sinter-Produktion/Oxygenstahlproduktion) basierend auf einem empirischen Durchschnittswert der Jahre 1990-2010 berechnet. Als Datenbasis dienten die jährlichen Sinter Aktivitätsdaten der United Nations (2015b) und des *Statistischen Jahrbuchs der Stahlindustrie* der Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014, S. 8–9) sowie die Oxygenstahl-Produktionsdaten aus dem *Steel Statistical Yearbook* der World Steel Association (mehrere Ausgaben).

Tabelle 53: Sinter-Faktor pro Tonne Oxygenstahl (in Tonnen pro Tonne)

Land	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Schätzung 2011-2035
Frankreich	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,90
Deutschland	0,90	0,80	0,88	0,93	1,02	0,87	0,92
Italien	0,89	0,87	0,98	1,02	1,00	1,06	1,10
Polen	1,26	1,20	1,12	1,21	1,35	1,46	1,34

Quelle: eigene Berechnung aus United Nations (2015b), Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014, S. 8–9) und World Steel Association (mehrere Ausgaben) bzw. eigene Schätzung

Da für Frankreich keine Daten verfügbar waren musste hier eine Schätzung in Anlehnung an den deutschen Sinter-Faktor getroffen werden. Die Sinter-Produktion kann dann mittels die-

Fall 2: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem Energienachfragemodell für die Industrie – eine Fallstudie über die europäische Stahlindustrie

ses Sinter-Faktors in Abhängigkeit von der zukünftigen Oxygenstahlproduktion des jeweiligen Landes simuliert werden.

Ein analoges Vorgehen wurde für die Projektion der zukünftigen Koks-Produktion gewählt, hier wurde als länderspezifischer **Koks-Faktor** (Koks-Produktion/Oxygenstahlproduktion) der empirische Wert des Jahres 2010 aus der United Nations (2015a) *Energy Statistics Database* und dem World Steel Association (mehrere Ausgaben) *Steel Statistical Yearbook* gewählt¹³².

Tabelle 54: Koks-Faktor pro Tonne Oxygenstahl (in Tonnen pro Tonne)

Land	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Schätzung 2011-2035
Frankreich	0,36	0,38	0,38	0,42	0,42	0,32	0,32
Deutschland	0,27	0,26	0,25	0,26	0,32	0,27	0,27
Italien	0,39	0,40	0,41	0,41	0,47	0,48	0,48
Polen	1,72	1,67	1,64	1,93	2,19	2,46	2,46

Quelle: eigene Berechnung aus United Nations (2015a) und World Steel Association (mehrere Ausgaben) bzw. eigene Schätzung

Zur Projektion der zukünftigen Walzstahlproduktion (warmgewalzt) wurde ebenfalls ein länderspezifischer **Walzstahl-Faktor** (Walzstahlproduktion/(Oxygenstahlproduktion plus Elektrostahlproduktion)) basierend auf dem empirischen Wert des Jahres 2010 berechnet¹³³. Datenbasis hierfür war ebenfalls die World Steel Association (mehrere Ausgaben).

¹³² Für den Koks-Faktor erschien in Frankreich und Deutschland vor allem die Entwicklung der letzten 5 Jahre keinem eindeutigen Trend zu folgen, weshalb für die Entwicklung konstant auf dem Niveau des Jahres 2010 gehalten wurde. Für Italien und Polen wurde eine Näherung an die deutsche Entwicklung angenommen und die Entwicklung ebenfalls konstant gehalten.

¹³³ Die Entwicklung des Walzstahl-Faktors in Deutschland und Frankreich zw. 1995 und 2010 blieb relativ konstant, weshalb der Wert des Jahres 2010 für die Projektion konstant gehalten wurde. Für Italien und Polen wurde eine Näherung an die deutsche Entwicklung angenommen und die Entwicklung ebenfalls konstant gehalten.

Tabelle 55: Walzstahl-Faktor pro Tonne Rohstahl (in Tonnen pro Tonne)

Land	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Schätzung 2011-2035
Frankreich	0,85	0,86	0,88	0,87	0,91	0,91	0,91
Deutschland	0,88	0,91	0,90	0,91	0,92	0,87	0,87
Italien	1,01	1,02	1,04	1,03	1,05	0,98	0,98
Polen	0,72	0,79	0,77	0,80	0,89	0,88	0,88

Quelle: eigene Berechnung aus United Nations (2015a) und World Steel Association (mehrere Ausgaben) bzw. eigene Schätzung

Diese Größen spielen jedoch nur eine zweitrangige Rolle, da der Energieverbrauch der Stahlindustrie hauptsächlich von den Annahmen/Ergebnissen zur Elektro- und Oxygenstahlproduktion getrieben wird. Sie werden hier nur näherungsweise berechnet um eine vollständige Abbildung des Sektors zu ermöglichen.

6. Fall 2: Simulationsergebnisse der Modellkopplung

Mit der zuvor vorgestellten Materialflussmodellierung werden nun die physischen Treiber des bottom-up Modells FORECAST Industry simuliert und als Input zur Projektion der zukünftigen Energienachfrage auf Prozess- und Energieträgerebene verwendet. Hierzu werden zwei Szenarien berechnet:

- ein Szenario vor zusätzlichen Materialstrategieverbesserung (MSV) und
- ein Szenario nach zusätzlichen Materialstrategieverbesserungen (MSV) (wie in Kapitel 5 beschrieben).

In einer Feedbackschleife werden die zusätzlichen Investitionen durch Materialstrategieverbesserungen und die vermiedenen Energiekosten - durch die aus den MSV resultierende Senkung des Energieverbrauchs der Stahlindustrie - sowie Programmkosten in das makroökonomische Modell ASTRA zurück gespielt um die gesamtwirtschaftlichen Effekte dieser Strategien abzubilden.

6.1 Nachfrage- und Schrottverfügbarkeitsprojektionen bis 2035

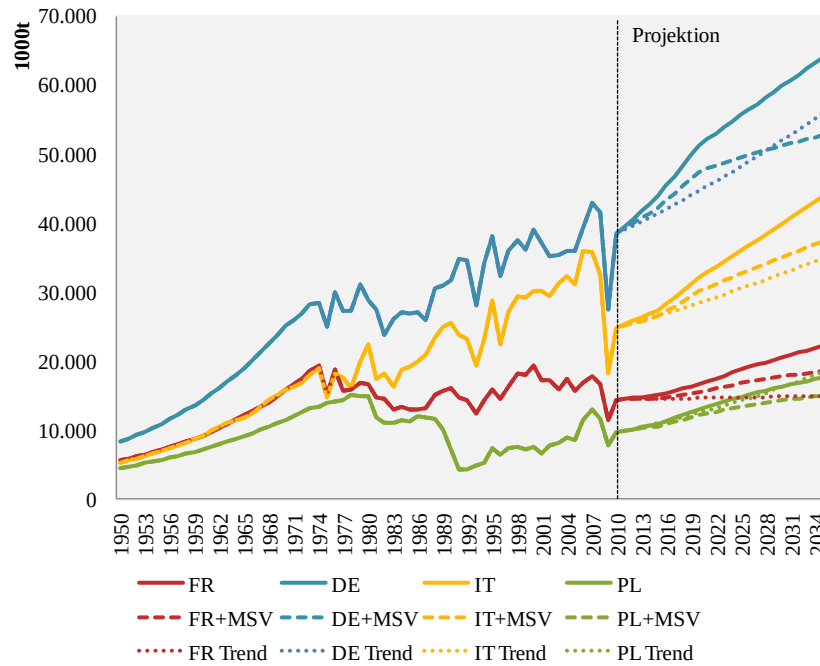
Die Simulationsergebnisse zeigen einen zunehmenden **sichtbaren Stahlverbrauch (sSV)** vor MSV (Abbildung 16) bis 2035 in allen vier Schwerpunktländern.

Polen verzeichnet mit 2,45% p.a. das höchste jährliche Wachstum von rund 9,7 Millionen Tonnen in 2010 auf 17,7 Millionen Tonnen in 2035, gefolgt von Italien mit 2,3% p.a. und rund 24,9 Millionen Tonnen in 2010 bzw. knapp 44 Millionen Tonnen in 2035. Der größte Verbraucher (mit rund 38,4 Millionen Tonnen in 2010) ist Deutschland, welches seinen Ver-

brauch bis 2035 um 25,6 Millionen (2,07% p.a.) auf circa 64 Millionen Tonnen erhöht. Frankreichs jährlicher Zuwachs bleibt als einziger unter zwei Prozent (1,74% p.a. von 14,4 auf 22,2 Millionen Tonnen).

Getrieben wird das hohe Wachstum des sichtbaren Stahlverbrauchs, wie bereits in Abschnitt 5.2.1 diskutiert, von den Wachstumsannahmen der stahlnachfragenden Sektoren im zugrundeliegenden ASTRA-Szenario (Tabelle 21). Um dieses hohe Wachstumsszenario (rund 2% p.a. im Verarbeitenden Gewerbe, vgl. Tabelle 20) besser mit der historischen Entwicklung vergleichen zu können, wurden die gepunkteten „Trend“-Linien in Abbildung 16 hinzugefügt. Diese stellen die Fortschreibung des historischen Wachstums des sichtbaren Stahlverbrauchs, basierend auf dessen jährlicher Wachstumsrate zwischen 1990 und 2008, dar. Insbesondere in Italien und Frankreich liegt die Projektion des sichtbaren Stahlverbrauchs (auf Basis des ASTRA-Szenarios) sowohl vor als auch nach Materialstrategieverbesserungen deutlich über dieser Fortschreibung. Die Fortschreibung des sichtbaren Stahlverbrauchs in Deutschlands liegt in 2035 etwas über der Projektion nach Materialstrategieverbesserungen, aber weit unter der Projektion ohne Verbesserungen. Für Polen scheint die projizierte Entwicklung vor Materialstrategieverbesserungen die Wachstumsfortschreibung verhältnismäßig gut zu treffen.

Das Fazit, welches aus diesem Vergleich gezogen werden kann ist, dass das hohe Wachstum des Verarbeitenden Gewerbes aus dem ASTRA-Szenario von etwa dem doppelten, was man in einer Referenz-Entwicklung erwarten würde für die Mehrheit der betrachteten Länder zu einer deutlichen Überschätzung, sowohl des Stahlverbrauchs als auch in Konsequenz der Stahlproduktion, des jeweiligen Landes führt. Folglich sind die hier vorgestellten Ergebnisse als „Hochwachstums-Variante“ zu verstehen, die man nicht als tatsächliche Projektion der zukünftigen Stahlnachfrage und -produktion interpretieren kann. Vielmehr handelt es sich um, unter den getroffenen Szenario-Annahmen, konsistente Szenario-Ergebnisse, welche zur Illustration der zuvor vorgestellten Methodik dienen.



Quelle: Daten von World Steel Association (mehrere Ausgaben) und eigene Berechnung

Abbildung 16: Sichtbarer Stahlverbrauch (sSV) vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (1950-2035)¹³⁴

Der **tatsächliche Stahlverbrauch (tSV)**, welcher sich aus dem sichtbaren Stahlverbrauch nach indirektem Stahlhandel und Abzug des Neuschrottaufkommens errechnet (vgl. Abschnitt 5.2.4.2¹³⁵), verzeichnet ebenfalls einen Zuwachs in allen betrachteten Schwerpunktländern, sowohl vor als auch nach MSV (vgl. Tabelle 56 und Abbildung 17). Die Summe der historischen tSV bildet die Basis für die Berechnung der Stahlrückflüsse im Lebensdauermodell für das End-of-Life-Recycling. Durch die zusätzlichen Materialstrategieverbesserungen wird der zukünftige tatsächliche Stahlverbrauch gedämpft, was zu einer Reduktion von durchschnittlich 15% (höchstes Einsparpotential in Deutschland, niedrigstes Einsparpotential in Italien) des Verbrauchs in 2035 führt (vgl. Tabelle 56). Während sich die Trends in Deutschland und Frankreich sehr ähnlich entwickeln, steigt der Verbrauch in Italien und Polen stärker an.

¹³⁴ Bei den Daten vor 1974 handelt es sich wie in Abschnitt 5 erläutert um geschätzte Zahlen, deshalb deren ebenmäßiger Verlauf. Zwischen 1974 und 2010 konnten empirische Daten der World Steel Association mehrere Ausgaben verwendet werden.

¹³⁵ Die Annahmen zur Entwicklung des indirekten Stahlhandels bzw. zum Neuschrottaufkommen wurden bereits in Kapitel 5.2.4.3 erläutert, und werden an dieser Stelle nicht noch einmal detailliert ausgeführt.

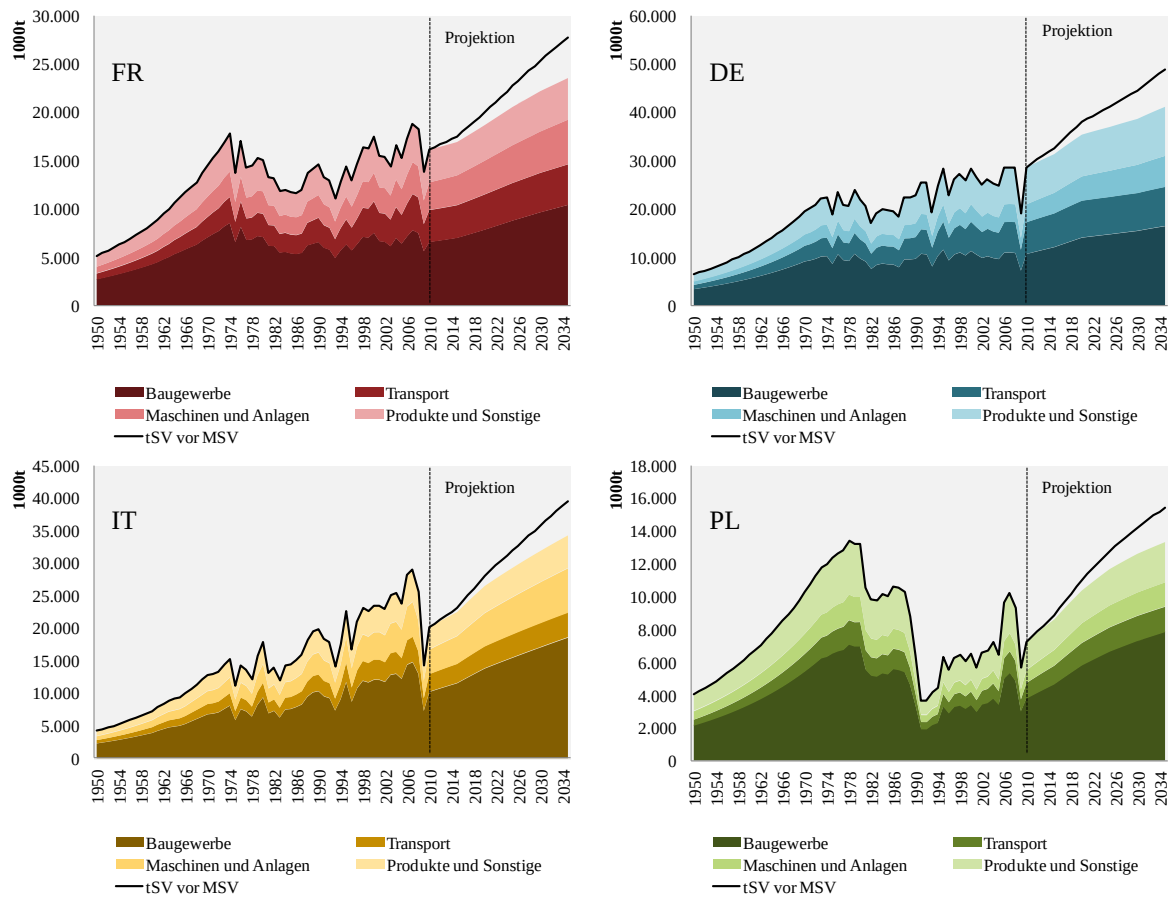
Tabelle 56: Tatsächlicher Stahlverbrauch (tSV) vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (2010, 2020, 2035)

Land	2010	2020	2035	jährl. WR	2020	2035	jährl. WR	Δ2035
	Mio. Tonnen vor Materialstrategien				Mio. Tonnen nach Materialstrategien			
	2010-35				2010-35			
Frankreich	16,2	20,0	27,8	2,2%	18,7	23,6	1,5%	-15%
Deutschland	28,7	38,0	49,0	2,2%	35,5	41,2	1,5%	-16%
Italien	20,1	28,0	39,6	2,7%	26,4	34,2	2,2%	-13%
Polen	7,2	11,0	15,5	3,1%	10,4	13,4	2,5%	-14%

Quelle: eigene Berechnungen

Das Baugewerbe benötigt in 2010 den größten Anteil des jährlich tatsächlich verbrauchten Stahls und behält diesen Status auch bis 2035 für alle Schwerpunktländer bei (Tabelle 57). Ursächlich hierfür sind insbesondere die hohen Wachstumsraten des Baugewerbes von meist mehr als 2% pro Jahr aus dem makroökonomischen Modell (vgl. Tabelle 20), welche in entsprechenden Annahmen zur Aufteilung des sichtbaren Stahlverbrauchs auf die verschiedenen Sektoren resultierten (vgl. Tabelle 43).

- Auch die verhältnismäßig geringeren Materialstrategieverbesserungspotentiale im Vergleich zu anderen Sektoren - wie zum Beispiel dem Fahrzeugbau (vgl. Tabelle 45) - tragen zum zunehmend hohen Anteil des Baugewerbes am tatsächlichen Verbrauch bei (z.B. für Deutschland von 37% in 2010 auf 40% in 2035).
- Der Anteil des Transportsektors sinkt durch die höheren Stahl-Einsparpotentiale bis 2035 für alle betrachteten Länder trotz Wertschöpfungszuwachs und entsprechenden Annahmen zur Aufteilung des sichtbaren Stahlverbrauchs vor MSV (vgl. Tabelle 43).
- Der Maschinen- und Anlagenbau hingegen nimmt bis 2035 noch anteilmäßig zu, verursacht durch hohe Wachstumsannahmen, welche auf moderate Stahl-Einsparpotentiale treffen.
- Im Bereich der Produkte und Sonstige konnte für alle Länder ein Rückgang des Anteils des sich in Nutzung befindlichen Stahls beobachtet werden (Tabelle 57). Hier führen geringeres Wachstum und etwas höhere Stahleinspar- und -substitutionspotentiale zu diesem Ergebnis.



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 17: Tatsächlicher Stahlverbrauch vor und nach MSV
FR (links oben), DE (rechts oben), IT (links unten), PL (rechts unten) (1950-2035)

Tabelle 57: Sektorale Aufteilung des tatsächlichen Stahlverbrauchs (tSV) nach MSV
FR, DE, IT, PL (2010, 2035)

Sektor	Frankreich		Deutschland		Italien		Polen	
	2010	2035	2010	2035	2010	2035	2010	2035
Baugewerbe	41%	44%	37%	40%	51%	54%	53%	59%
Transport	20%	18%	23%	20%	13%	11%	13%	12%
Maschinen und Anlagen	18%	20%	13%	16%	19%	20%	10%	11%
Produkte und Sonstiges	21%	18%	27%	25%	17%	15%	24%	19%

Quelle: eigene Berechnungen

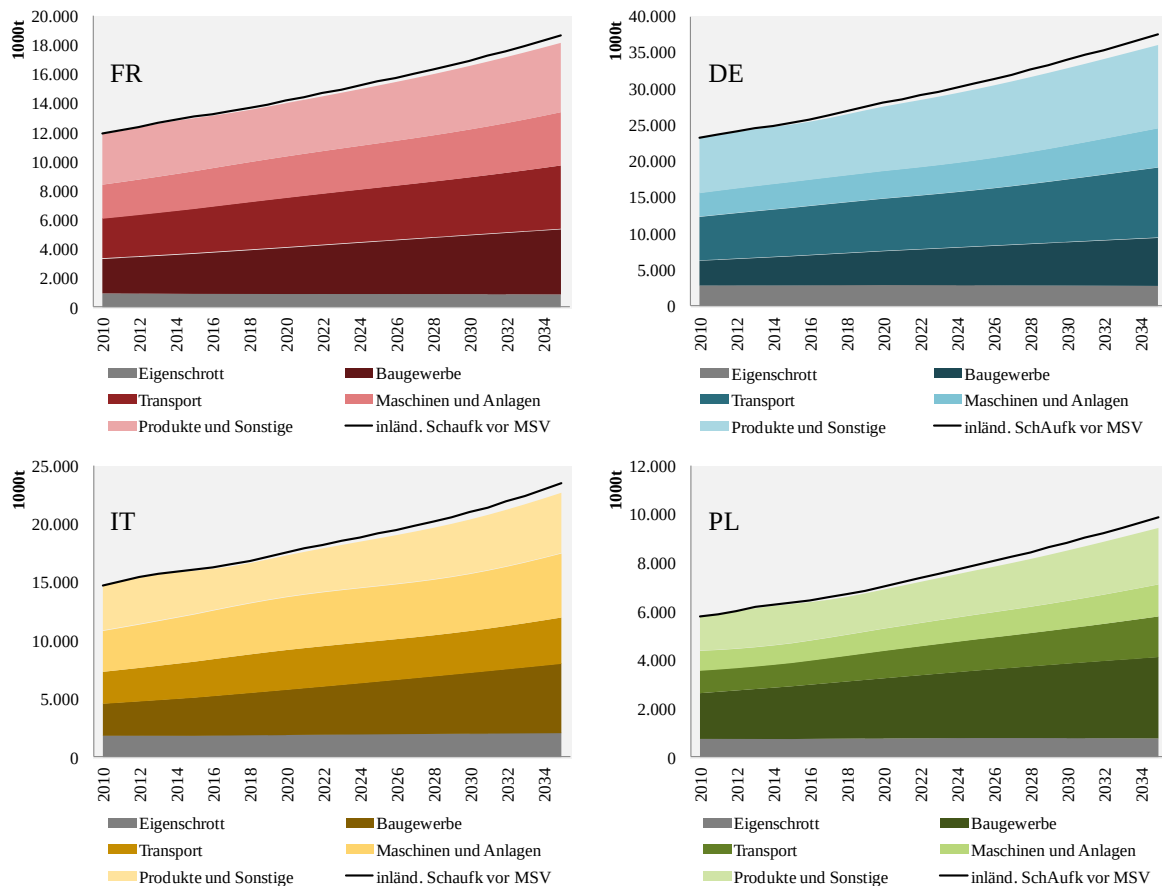
Kennt man die Entwicklung des tatsächlichen Stahlverbrauchs, welcher zusammen mit dem Lebensdauermodell und den Recyclingraten die Treibergröße des Altschrottaufkommen darstellt, lässt sich nun das inländische Schrottaufkommen berechnen (Eigenschrott¹³⁶ plus Neuschrott¹³⁷ plus Altschrott; vgl. Abschnitt 5.2.4.2)

Das berechnete **inländische Schrottaufkommen (*SchAufk*)** (Abbildung 18) steigt über den Simulationszeitraum in allen Ländern, sowohl mit als auch ohne Materialstrategieverbesserungen, an. Getrieben wird diese Entwicklung in erster Linie vom Altschrottaufkommen, (welches verständlicher Weise den größten Anteil am inländischen Schrottaufkommen hat, vgl. Tabelle 58) und folglich von den, im Lebensdauermodell bestimmten, Rückflüssen aus dem sich tatsächlich in Nutzung befindlichen Stahl. Durch die „Speicherung“ des Stahls über mehrere Jahre oder Jahrzehnte nach dem „Zeitpunkt des Verbrauchs“ (bestimmt durch die angenommene durchschnittliche Nutzungsdauer bei Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen, Gebäuden, etc.), handelt es sich hierbei um eine zeitlich verzögerte Widerspiegelung der modellierten (kumulierten) historischen Entwicklung des tatsächlichen Stahlverbrauchs.

Den höchsten Anstieg des inländischen Schrottaufkommens verzeichnet Polen mit 2% p.a. nach MSV, gefolgt von Deutschland mit rund 1,8%, und Frankreich und Italien mit jeweils 1,7% p.a. nach MSV. Die Senkungen des inländischen Schrottaufkommens, welche durch Materialstrategieverbesserungen bis zum Jahr 2035 erreicht werden können, gestalten sich im Vergleich zu deren Auswirkungen auf Stahlnachfrage (Abbildung 16) und die Rohstahlproduktion (Abbildung 20) als verhältnismäßig gering.

¹³⁶ Berechnet in Abhängigkeit von Rohstahlproduktion (Ergebnisse Rohstahlproduktion siehe nachfolgenden Abschnitt).

¹³⁷ Berechnet in Abhängigkeit vom sichtbaren Stahlverbrauch.



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 18: Inländisches Schrottaufkommen nach MSV FR (links oben), DE (rechts oben), IT (links unten), PL (rechts unten) (2010-2035)

Ursächlich hierfür sind ebenfalls die durchschnittlichen Nutzungsdauern der länger genutzten Stahlanwendungen (von mehr als 20 Jahren wie z.B. Gebäude, Anlagen, Brücken, Tunnels und Tiefbau) der stahlhaltigen Produkte. Der Stahl ist hier vergleichsweise lang in der Nutzungsphase gebunden, wodurch sich die zukünftigen geringeren nachgefragten und verbrauchten Mengen durch Materialstrategieverbesserungen, erst nach 2035 oder noch später in den Simulationsergebnissen zum Schrottaufkommen widerspiegeln können. Aber auch die etwas größeren Potentiale des Fahrzeugbaus haben, mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 17 Jahren, nur geringe Auswirkungen vor 2030.

Tabelle 58: Zusammensetzung des inländischen Schrottaufkommens (*SchAufk*) nach MSV in Prozent FR, DE, IT, PL (2010, 2035)

Sektor	Frankreich		Deutschland		Italien		Polen	
	2010	2035	2010	2035	2010	2035	2010	2035
Eigenschrott	8%	5%	12%	8%	13%	9%	13%	8%
Neuschrott	10%	8%	15%	12%	12%	11%	16%	14%
Altschrott	82%	87%	73%	80%	76%	80%	71%	78%

Quelle: eigene Berechnungen

Die Zusammensetzung des inländischen Schrottaufkommens nach MSV auf sektoraler Ebene gestaltet sich unterschiedlich zwischen den verschiedenen Ländern (vgl. Tabelle 59). Während in Polen das Baugewerbe im Jahr 2010 am meisten zu den Simulationsergebnissen zum inländischen Schrottaufkommen beiträgt, ist in den anderen Schwerpunktländern der Sektor Produkte und Sonstiges - welcher von der Verpackungsindustrie dominiert wird - Hauptquelle des inländischen Schrottaufkommens.

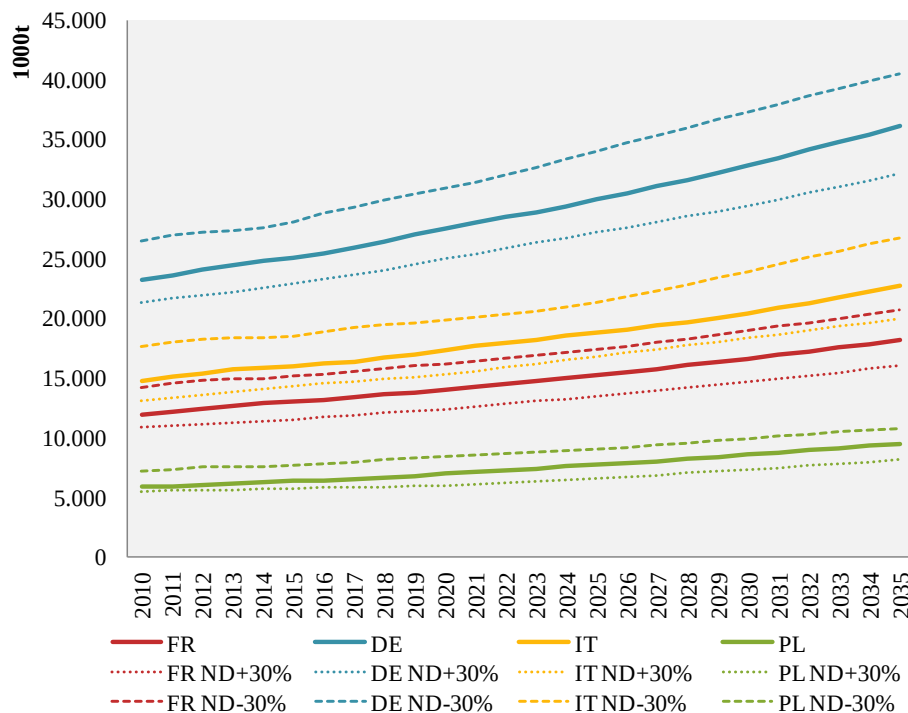
In allen Ländern findet ein Zuwachs des Schrottanteils im Baugewerbe aufgrund der langen Nutzungszeiten nach dem Aufbau des Gebäudestocks in den 1950er und 1960er Jahren und in Frankreich, Deutschland und Polen ebenfalls im Transportsektor bis 2035 statt (vgl. Tabelle 59). Dies wird unter anderem durch das steigende Altschrottaufkommen in diesen Sektoren verursacht. Während in Frankreich, Italien und Polen der Anteil des Maschinen- und Anlagenbaus stagniert findet in Deutschland noch ein leichter Zuwachs bis 2035 statt (vgl. Tabelle 59). Mit der Ausnahme von Polen sinkt der Anteil der Produkte und Sonstiges am inländischen Schrottaufkommen für alle Länder in 2035, da es sich hier um relativ kurzfristige Nutzungen von Produkten handelt (vgl. Tabelle 59).

Tabelle 59: Summe des Neu- und Altschrottsaufkommen je Sektor als prozentualer Anteil am inländischen Schrottaufkommen nach MSV FR, DE, IT, PL (2010, 2035)

Sektor	Frankreich		Deutschland		Italien		Polen	
	2010	2035	2010	2035	2010	2035	2010	2035
Baugewerbe	20%	25%	15%	18%	19%	26%	33%	36%
Transport	23%	24%	26%	27%	19%	18%	17%	18%
Maschinen und Anlagen	20%	20%	14%	15%	24%	24%	24%	24%
Produkte und Sonstiges	29%	26%	33%	32%	26%	23%	24%	25%

Quelle: eigene Berechnung

Zusätzlich zur sektoralen Aufteilung der Nachfrage (auf die Bereiche Baugewerbe, Transport, Maschinen und Anlagen, Produkte und Sonstige), ist die im Modell angenommene durchschnittliche Nutzungsdauer von stahlhaltigen Produkten ein wichtiger Parameter, welcher das inländische Schrottaufkommen in der Simulation maßgeblich beeinflusst. In Anlehnung an Pauliuk et al. (2013a, S. 3452) und Pauliuk et al. (2013b, S. S16) wurden deshalb Sensitivitäten der durchschnittlichen Nutzungsdauer (+/-30%) berechnet (vgl. Abbildung 19). Durch die Sensitivitäten kommt es zu einer Niveauverschiebung der inländischen Schrottverfügbarkeit. So erhöht eine Reduktion der durchschnittlichen Nutzungsdauer um 30% das inländische Schrottaufkommen im Jahr 2010 zwischen 14 und 22 Prozent und in 2035 zwischen 12 und 18 Prozent (länderabhängig). Eine Erhöhung der durchschnittlichen Nutzungsdauer um 30% hat den gegenteiligen Effekt und senkt das inländische Schrottaufkommen in 2010 zwischen -6 und -12 bzw. -11 und -15 Prozent (länderabhängig) in 2035.



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 19: Sensitivität der inländischen Schrottverfügbarkeit nach MSV: FR, DE, IT, PL (2010-2035): durchschnittliche Nutzungsdauer +/-30%

Die allgemeinen Trends der Projektion (Zuwachs der inländischen Schrottverfügbarkeit bis 2035) bleiben trotz Nutzungsdaueränderungen gleich und sprechen für die Robustheit des zugrundeliegenden Modells gegenüber dieser wichtigen Einflussgröße (siehe auch Pauliuk et al. (2013a, S. 3452)). Inhaltlich dürfte dieser stabile Zuwachs-Trend darin begründet liegen, dass die Stähle in langlebigen Investitionsgütern (Anlagen, Gebäude, Brücken) der Nach-

kriegszeit (1948 bis 1965) in der betrachteten Projektions-Periode als Schrotte wieder zur Verfügung stehen.

Das **tatsächliche Schrottaufkommen ($tSchAufk$)**, definiert als inländisches Schrottaufkommen nach Nettoschrottexporten ($tSchAufk^{prä}$) bzw. der Schrottverbrauch zur Rohstahlproduktion ($tSchAufk^{fin}$), liegt in 2035 in allen Ländern nach Materialstrategieverbesserung zwischen rund 4 und 7 Prozent unter dem Szenario vor MSV (vgl. Tabelle 60). Dies sind relativ geringe Minderschrottaufkommen, weil die volle Wirkung von Materialeffizienz-Maßnahmen erst nach der abgelaufenen Lebensdauer auch der langfristigen Stahlanwendungen zum Tragen kommen kann.

Tabelle 60: Tatsächliches Schrottaufkommen/-verbrauch¹³⁸ in Millionen Tonnen nach Iteration FR, DE, IT, PL (2010, 2020, 2035) vor und nach MSV

Land	2010	2020	2035	2020	2035	$\Delta 2020$	$\Delta 2035$
	vor MSV			nach MSV			
Frankreich	7,6	9,4	12,9	9,2	12,2	-2,3%	-5,4%
Deutschland	19,2	23,6	30,8	22,9	28,7	-2,9%	-6,7%
Italien	18,9	21,8	27,6	21,5	26,5	-1,6%	-4,2%
Polen	4,9	5,9	7,9	5,8	7,4	-2,6%	-5,9%

Quelle: eigene Berechnungen

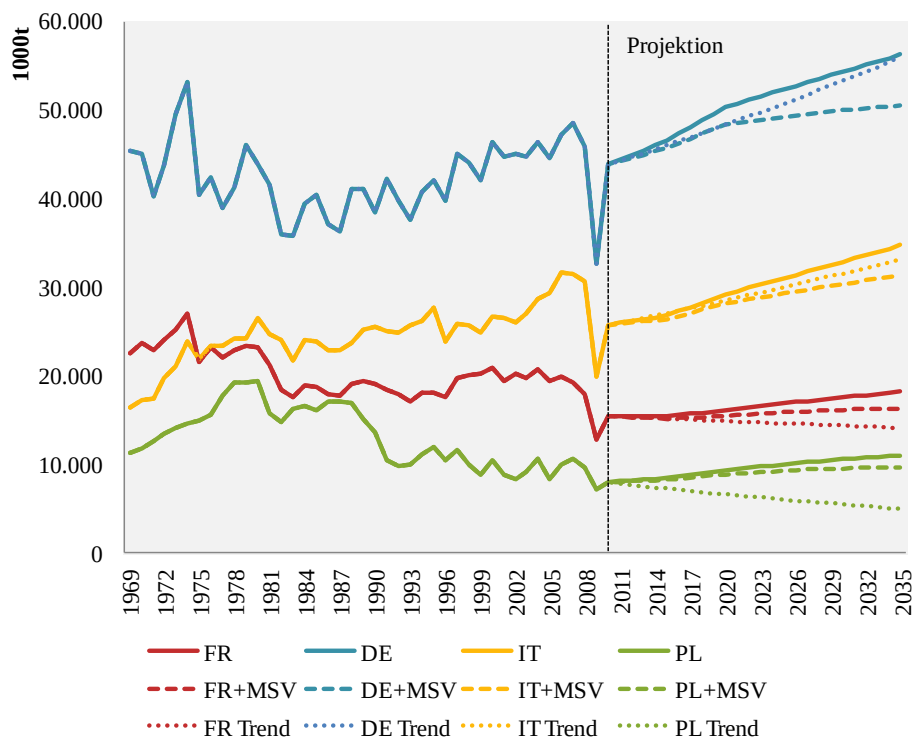
Das finale tatsächliche Schrottaufkommen kann auch als tatsächlicher Schrottverbrauch in der Stahlproduktion auf Prozessebene interpretiert werden. Es ist ein wichtiger Input für die Elektroofenroute, aber auch Zusatzinput in der Hochofenroute. In dem hier verwendeten Modell wird er in seiner vorläufigen Form ($tSchAufk^{prä}$) für die Bestimmung der zukünftigen physischen Produktionspotentiale auf Prozessebene erforderlich. Abschließend wird danach über einen iterativen Berechnungsschritt (vgl. Abschnitt 5.2.4.2) nach Festlegung der physischen Produktion auf Prozessebene bzw. Iteration des Netto-Schrott-Exports der endgültige tatsächliche Schrottverbrauch ($tSchAufk^{fin}$) über die quantitative Schließung des Systems bestimmt.

¹³⁸ Das tatsächliche Schrottaufkommen nach Iteration wird in diesem Szenario auch gänzlich für die Rohstahlproduktion verbraucht.

6.2 Physische Produktionsprojektionen bis 2035

In beiden Simulationsläufen steigt die **zukünftige Rohstahlproduktion (RSP)** für alle Länder an (vgl. Abbildung 20). Dies ist dem beträchtlichen Anstieg der Stahlnachfrage (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17) geschuldet, welche auf den hohen Wachstumsannahmen des ASTRA-Szenarios mit rund 2% pro Jahr des Verarbeitenden Gewerbes basiert, geschuldet. Die Rohstahlproduktion nach MSV steigt am stärksten in Italien und Polen, mit jeweils rund 0,8% pro Jahr, gefolgt von Deutschland mit rund 0,6% pro Jahr und Frankreich mit dem geringsten Wachstum von 0,2% pro Jahr. Somit steigt die Rohstahlproduktion in Frankreich von 15,4 Millionen Tonnen auf rund 16,3 Millionen Tonnen an. In Deutschland sind es rund 50,5 Millionen Tonnen in 2035 und in Italien und Polen ergibt sich ebenfalls ein Anstieg auf jeweils 31,4 und 9,7 Millionen Tonnen. Diese Simulationsergebnisse für das Jahr 2035 ergeben eine Einsparung gegenüber dem Szenario ohne MSV in Frankreich und Deutschland von 10,3% und 10,2%, in Italien von 9,7% und in Polen von 12,4%.

Auch für die Rohstahlproduktion wurde, ähnlich wie beim sichtbaren Stahlverbrauch, eine Trendentwicklung basierend auf der jährlichen historischen Wachstumsrate (1990 bis 2008) berechnet. Die fortgeschriebenen gepunkteten „Trend“-Linien für Deutschland und Frankreich liegen zwischen den beiden berechneten Szenarien (Abbildung 20) und lassen die Projektionsergebnisse nach MSV unter der Annahme eines „Hochwachstums-Szenarios“ (vgl. Abschnitt 5.2.1) als plausibel erscheinen. Für Frankreich und Polen zeigte sich in der Vergangenheit ein rückläufiger Trend in der Rohstahlproduktion, welcher in den Szenario-Entwicklungen nicht weiter fortgesetzt wird (ebenfalls den hohen Wachstumsannahmen für das Verarbeitende Gewerbe und die stahlnachfragenden Branchen geschuldet).



Quelle: Daten von World Steel Association (mehrere Ausgaben) und eigene Berechnung

Abbildung 20: Rohstahlproduktion vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (1950-2035)

Insbesondere in der Hochofenroute führen die Materialstrategieverbesserungen zu einer Reduktion der zukünftigen **Oxygenstahlproduktion (OSP)** (Tabelle 61). In Deutschland und Italien, welche vor MSV durch das hohe Wachstum des Verarbeitenden Gewerbes (vgl. Tabelle 20) noch einen geringen Zuwachs bzw. eine Stagnation der Oxygenstahlproduktion bis 2035 erfuhren, ist die Oxygenstahlproduktion nach MSV rückläufig. Absolut am größten in Deutschland mit rund 4,7 Mio. Tonnen in 2035 und relativ am höchsten in Italien mit 1,5% pro Jahr (Tabelle 61). Auch in Frankreich und Polen wird der rückläufige Trend durch die Annahmen zu MSV verstärkt (Tabelle 61).

Die Produktionskapazität der vier Länder ist mit fast 75 Mio. Jahrestonnen (Tabelle 61) selbst bei der hier betrachteten „Hochwachstums-Szenario-Variante“ und ohne Materialstrategieverbesserung (MSV) im Jahre 2035 nur zu knapp 70% ausgelastet. Mit MSV wäre die Überkapazität der Oxygenstahl-Produktion bei etwa 56%.

Der simulierte Produktionsrückgang entspricht den Erwartungen des Autors, da insbesondere in der Hochofenroute - welche qualitativ höherwertige Stahlprodukte produziert - Potentiale zur Materialeffizienzverbesserungen und -substitution erwartet werden (z.B. Fahrzeugbau, Maschinenbau). Die Entwicklung der Oxygenstahlproduktion nach MSV entspricht in Frankreich, Deutschland und Polen beinahe dem Trend der vergangenen Jahrzehnte (1980-2008) wenn man die jährlichen Wachstumsraten vergleicht, während in Italien die Reduktion in der

Hochofenroute stärker ausgeprägt ist als in der Vergangenheit (vgl. Tabelle 61). Ursachen hierfür können sein, dass Italien als traditioneller Elektrostahlproduzent, kaum Anstrengungen im Bereich der Materialstrategien in der Oxygenstahlproduktion vorgenommen hat. D.h. hier noch höhere Potentiale herrschten als in Deutschland und Frankreich, welche bereits über Knowhow in diesen Bereichen verfügen.

Tabelle 61: Oxygen- und Elektrostahlproduktion in Millionen Tonnen vor und nach MSV FR, DE, IT, PL (2010, 2020, 2035)

Land	2010	2020	2035	2020	2035	WR 1980- 2008	WR2010-,35		Kapazi- tät ¹³⁹ 2008
		vor MSV		nach MSV			vor MSV	nach MSV	
Oxygenstahl									
Frankreich	9,8	8,6	6,9	8,1	5,4	-2,0%	-1,4%	-2,4%	13,0
Deutsch- land	30,6	33,6	32,6	32,0	27,9	-0,3%	0,2%	-0,4%	36,4
Italien	8,6	9,1	8,7	8,3	6,1	-0,3%	0,1%	-1,4%	17,7
Polen	4,0	4,2	3,7	3,9	2,6	-1,4%	-0,3%	-1,6%	7,6 ¹⁴⁰
Elektrostahl									
Frankreich	5,6	7,5	11,3	7,4	10,9	2,4%	2,8%	2,7%	10,1
Deutsch- land	13,2	16,7	23,7	16,3	22,6	2,9%	2,4%	2,2%	16,9
Italien	17,2	20,0	26,1	19,8	25,3	1,2%	1,7%	1,6%	24,7
Polen	4,0	5,1	7,4	5,0	7,0	1,8%	2,5%	2,3%	5,4

Quelle: Daten von World Steel Association (mehrere Ausgaben), Eurostat (2015b, 2015a) und eigene Berechnungen

Die positiven Wachstumstrends in der **Elektrostahlproduktion (ESP)** werden in der Simulation nach MSV etwas gedämpft (Tabelle 61). Tendenziell entsprechen auch hier die Simulationsergebnisse nach MSV den empirischen Trends, wobei es in Polen, Frankreich und Italien zu leicht überdurchschnittlichen (2,3%, 2,7%, und 1,6% p.a.) und in Deutschland zu leicht

¹³⁹ Die Oxygenstahlkapazität wurde berechnet als Differenz der maximal möglichen Rohstahlproduktion minus der maximal möglichen elektrischen Rohstahlproduktion basierend auf Eurostat (2015b, 2015a).

¹⁴⁰ 2007.

unterdurchschnittlichen Wachstum (2,2% p.a.) gemessen an der Vergangenheit (1980-2008) kommt. Die Simulationsergebnisse bedeuten in allen Ländern einen mehr oder weniger starken Zubau in Elektrostahlkapazitäten, basierend auf Vergleichswerten des Jahres 2008¹⁴¹ aus Eurostat (2015b, 2015a). Begründet ist dieses Simulationsergebnis unter anderem durch die hohe Nachfrage nach Stahl (infolge des Hochwachstums-Szenarios) und der historisch bedingten hohen Schrottverfügbarkeit unter den in Abschnitt 5.2.4.3 getroffenen Annahmen zum Schrottaußenhandel.

Inwieweit jedoch die Elektrostahl-Produktionskapazität von insgesamt 57 Mio. Jahrestonnen auf knapp 66 bis 69 Mio. Jahrestonnen (abhängig vom betrachteten Szenario; Tabelle 61) in der Realität tatsächlich ausgebaut würde, ist eine offene Frage. Es könnte auch sein, dass die über die volle Kapazitätsauslastung hinausgehenden Mengen durch Schrottexporte und Stahlimporte (z.B. aus den Überkapazitäten in China) ausgeglichen würden.

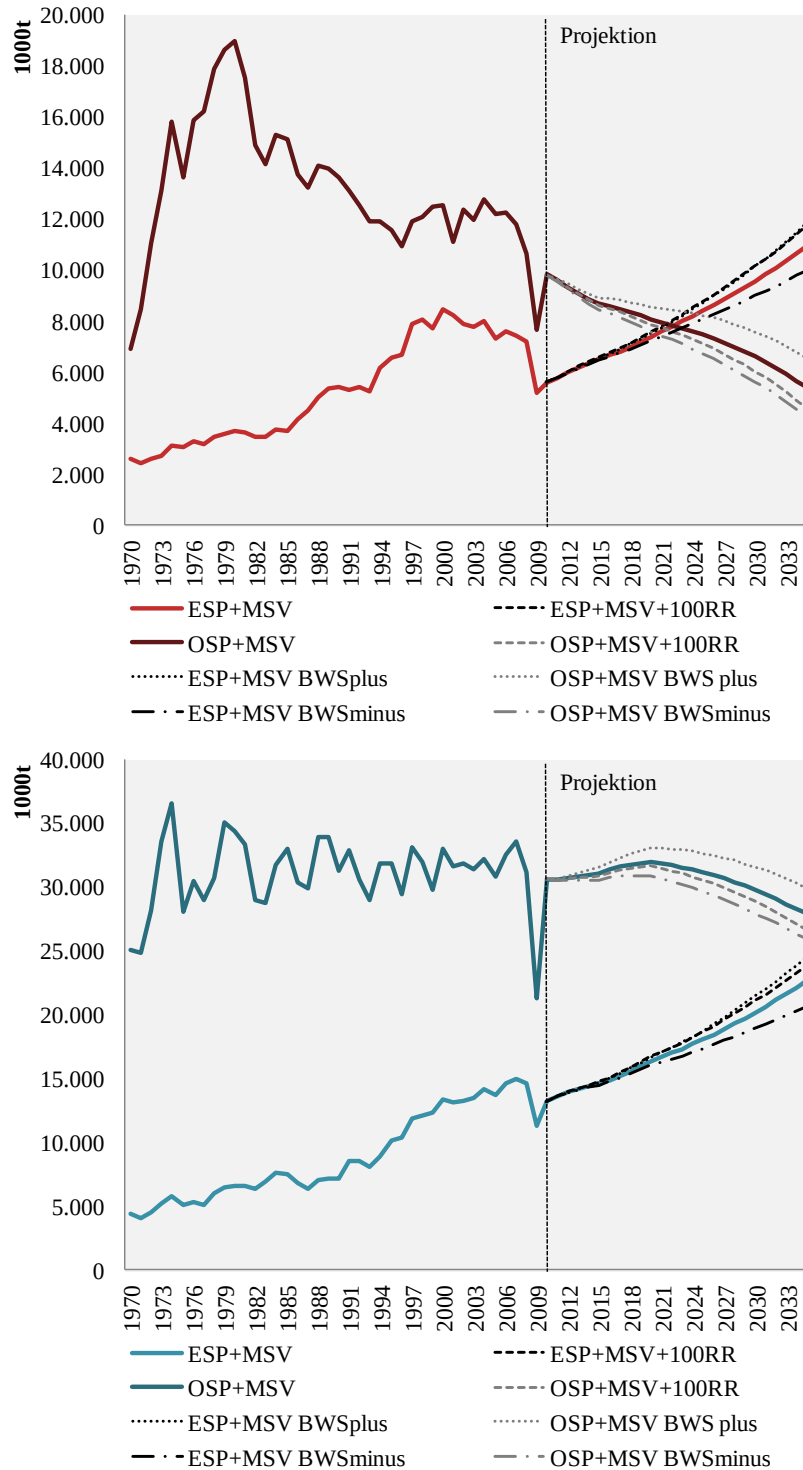
6.2.1 Sensitivitäten

Um die Robustheit des Modells bzw. den Einfluss wichtiger Treiber, wie zum Beispiel der inländischen Nachfrage, zu testen wurden drei **Sensitivitäten** für das Szenario nach MSV berechnet:

- Linearer Anstieg der End-of-Life Recyclingrate auf 100% von 2010 bis 2035 (+100RR),
- Graduelle Erhöhung der inländischen Nachfrage (Bruttowertschöpfung der stahlnachfragenden Branchen) um 20% bis 2035 (BWSplus),
- Graduelle Senkung der inländischen Nachfrage (Bruttowertschöpfung der stahlnachfragenden Branchen) um 20% bis 2035 (BWSminus).

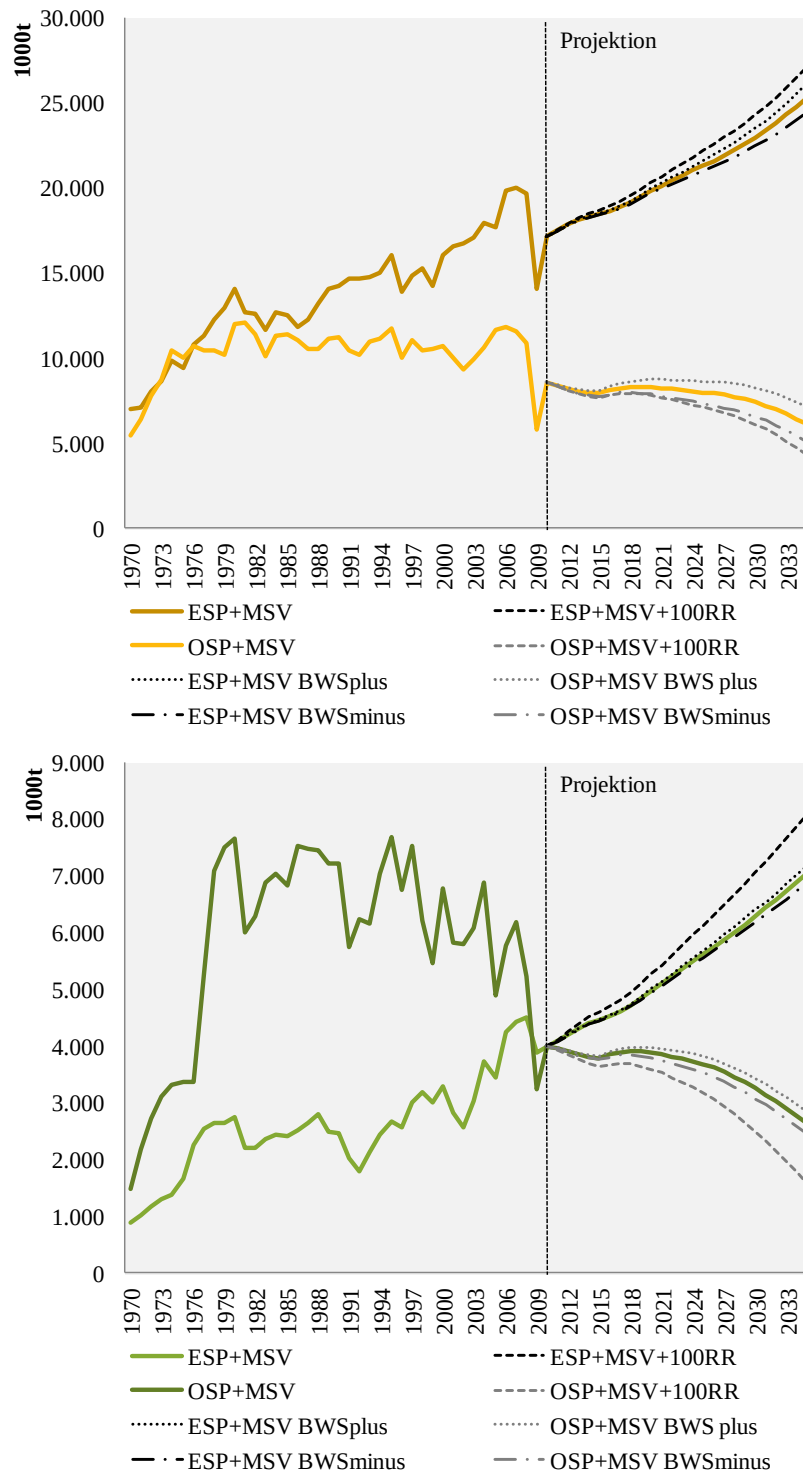
Die Trends gestalten sich in allen Simulationsläufen und Ländern gleich (Abbildung 21 und Abbildung 22), wodurch die Robustheit des Modells gegenüber diesen wichtigen Einflussgrößen, aber auch die ceteris paribus erwarteten Zusammenhänge (z.B. höhere Nachfrage führt zu höherer Produktion) bestätigt werden. Ein Anstieg der Bruttowertschöpfung (BWS) führt in allen Ländern zu einem Anstieg sowohl der Oxygen- als auch der Elektrostahlproduktion. Während eine Reduktion genau den gegenteiligen Effekt hat. Die Erhöhung der End-of-Life Recyclingrate auf 100 Prozent in 2035 erhöht ebenfalls die Elektrostahlproduktion, und führt ceteris paribus zu einer entsprechenden Reduktion der Oxygenstahlproduktion.

¹⁴¹ 2007 für Oxygenstahl in Polen.



Quelle: Daten von World Steel Association (mehrere Ausgaben) und eigene Berechnung

Abbildung 21: Sensitivitäten der Stahlproduktion nach MSV FR (oben), DE (unten): 100 EoL-Recycling, plus 20% Nachfrage, minus 20% Nachfrage



Quelle: Daten von World Steel Association (mehrere Ausgaben) und eigene Berechnung

Abbildung 22: Sensitivitäten der Stahlproduktion nach MSV IT (oben), PL (unten): 100 EoL-Recycling, plus 20% Nachfrage, minus 20% Nachfrage

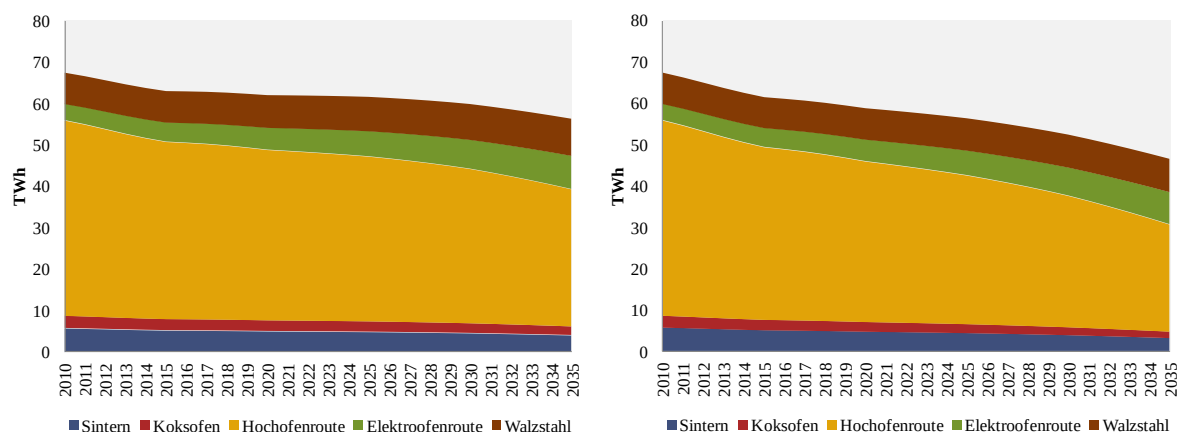
Im Ländervergleich lässt sich erkennen, dass vor allem in Polen verhältnismäßig größere Potentiale im End-of-Life Recycling existieren als in den übrigen Schwerpunktländern (Abbildung 22). So führt die Erhöhung der Recyclingrate zu einer 15 Prozent höheren Elektrostahlproduktion in 2035 und einer Reduktion der Oxygenstahlproduktion um rund 40% (dies entspricht in beiden Fällen rund 1 Million Tonnen Stahl). In den anderen Ländern sind die End-of-Life Recyclingraten bereits verhältnismäßig hoch, wodurch die Änderungen in dieser Sensitivität gegenüber dem Szenario nach MSV geringer ausfallen.

Die graduelle Erhöhung der Bruttowertschöpfung auf +20% in 2035 führt sowohl in Frankreich als auch in Deutschland zu einer Zunahme der Elektrostahlproduktion in 2035 von rund 9% (Abbildung 21). In Italien und Polen betragen die Zunahmen rund 3% bzw. 2% (Abbildung 22). Für die Oxygenstahlproduktion in Frankreich bedeutet dies einen Zuwachs von 21% in 2035. In Italien sind es auch rund 16 Prozent. In Polen und Deutschland um die 7 Prozent. Die graduelle Senkung der Bruttowertschöpfung um 20% führt zu vergleichbaren Ergebnissen, wobei es sich hier um entsprechende prozentuale Reduktionen anstatt von Erhöhungen handelt.

6.3 Energienachfragesimulation mit FORECAST Industry

Die in Kapitel 6.2 diskutierten Oxygenstahl- und Elektrostahlproduktionen sind die Haupttreiber der Energienachfragesimulationen der Stahlindustrie mit dem Modell FORECAST Industry. Zusätzlich dazu nutzt das bottom-up Modell die Wertschöpfungsentwicklung der Eisen- und Stahlindustrie, sowie die Produktionsprojektionen ausgewählter Prozesse (welche ebenfalls in Abhängigkeit der primären und sekundären Produktionsroute modelliert wurde, vgl. Abschnitt 5.2.4.2) zur Berechnung der Energienachfrage nach Prozess und Energieträger bis 2035. Die nachfolgend dargestellten Energieverbräuche beziehen sich auf die Berechnung der Energienachfrage ohne weitere Energieeffizienzverbesserungen gegenüber dem Basisjahr, auch „Frozen Efficiency“ genannt. Dies erlaubt den Einfluss der Produktionsmengen – einschließlich der MSV – eindeutig sichtbar zu machen, welcher ansonsten mit Energieeffizienzverbesserungen vermischt und daher nicht mehr klar bestimmbar würde.

Vor MSV sinkt die Energienachfrage in **Frankreich** um rund -0,7% p.a. zwischen 2010-2035 (vgl. Abbildung 23), von 67,5 auf 56,3 TWh. Dies ist insbesondere durch den Rückgang der Oxygenstahlproduktion, d.h. der energieintensiven Hochofenroute, bedingt (-1,4% p.a. zwischen 2010 und 2035).



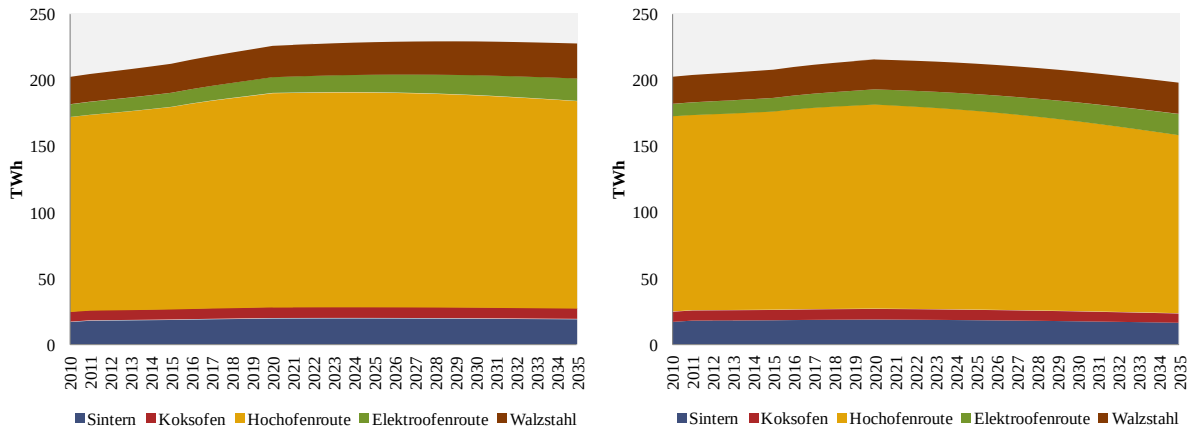
Quelle: FORECAST Industry

Abbildung 23: Energienachfrage nach Prozess FR (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen

Im Vergleich kann durch Materialstrategieverbesserungen rund 17% der Energienachfrage der Stahlindustrie in 2035 eingespart werden (46,6 TWh in 2035). Dies entspricht einem jährlichen Rückgang der Energienachfrage von runden -1,5% p.a. seit 2010.

Auf Prozessebene bedeutet dies eine 22-prozentige Reduktion der Energienachfrage nach MSV in 2035 in der Hochofenroute und den zugehörigen Prozessen (Sintern, Koksofen). Die Energienachfrage der Elektroofenroute ist nach MSV in 2035 nur um rund 3 % niedriger. Für Walzprozesse sinkt die Energienachfrage um circa 10% in 2035 durch Materialstrategieverbesserungen.

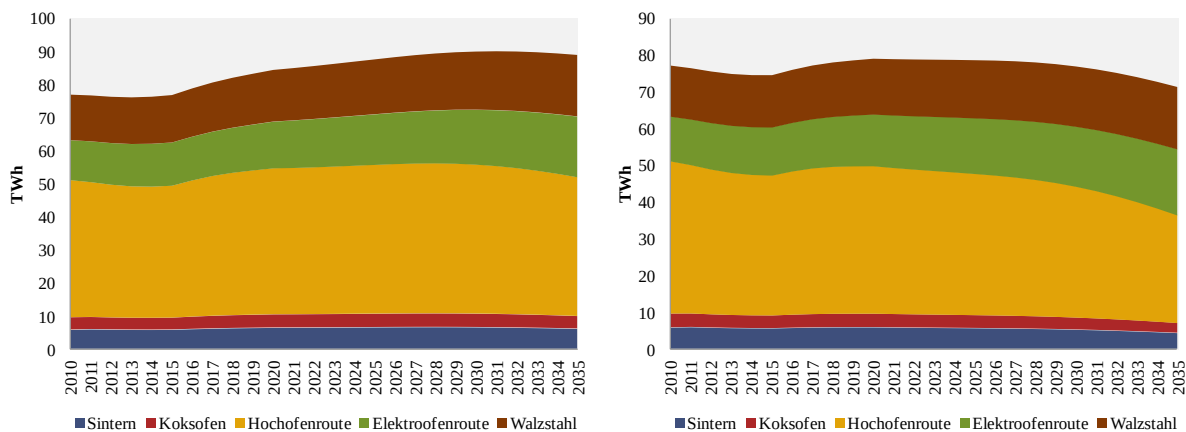
besserungen. Der Energieträger-Mix verändert sich durch die Materialstrategieverbesserungen nur geringfügig: leichter Zuwachs im Stromanteil, welcher der geringeren Oxygenstahlproduktion (Brennstoff-intensiv) und der höheren Elektrostahlproduktion (Strom-intensiv) geschuldet ist.



Quelle: FORECAST Industry

Abbildung 24: Energienachfrage nach Prozess DE (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen

In der Simulation vor MSV steigt die Energienachfrage in **Deutschland** von 202,5 TWh in 2010 auf 227,9 TWh in 2035 (vgl. Abbildung 24), dies entspricht einem jährlichen Wachstum von rund 0,5% p.a. Die Energienachfrage der Elektroofenroute steigt in der Projektion vor MSV durchschnittlich um 2,4% p.a. während die Hochofenroute nur einen Anstieg von 0,2% p.a. verzeichnet. Nach MSV sinkt der Energieverbrauch in 2035 um 13 % auf 198 TWh (Rückgang um knapp 30 TWh). Auf Prozessebene wird der stärkste Rückgang (-14% in 2035) im Vergleich mit dem Szenario ohne MSV in der Hochofenroute und den zugehörigen Prozessen verzeichnet. Aber auch die Elektroofenroute reduziert nach MSV rund 5% ihrer Energienachfrage in 2035. In der Walzstahlproduktion beträgt die Einsparung nach Materialstrategieverbesserung rund 10% in 2035. Insgesamt bedeutet dies eine Stagnation des deutschen Energieverbrauchs bis 2035 (mit leichtem Anstieg bis 2020 und folgender Reduktion bis 2035). Auch in Deutschland verursachen die MSV nur einen sehr geringen Zuwachs (+1%) im Anteil des Stroms am Energieträger-Mix.

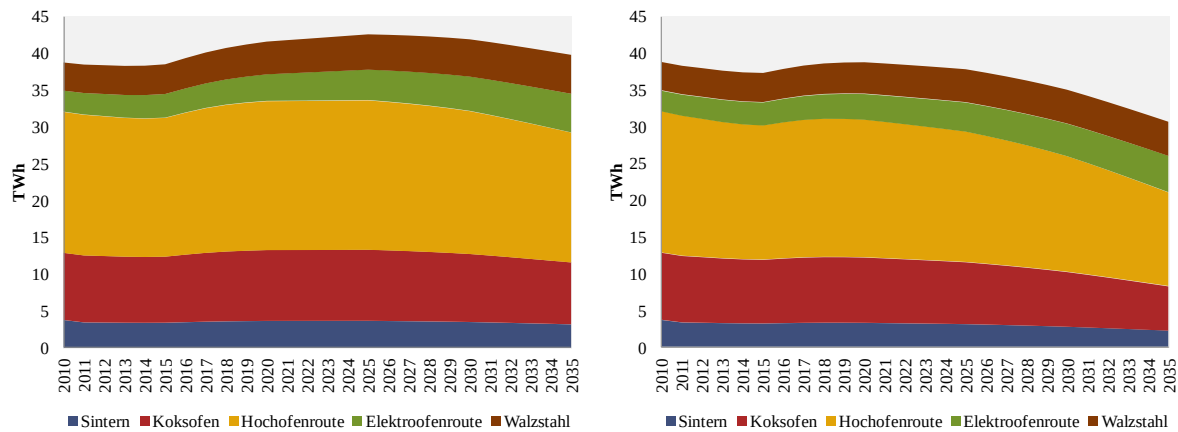


Quelle: FORECAST Industry

Abbildung 25: Energienachfrage nach Prozess IT (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen

Die Energienachfrage in **Italien** steigt vor MSV von rund 77 TWh auf 89,1 TWh in 2035 an, dies entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von rund 0,6% p.a. (vgl. Abbildung 25). Den höchsten jährlichen Anstieg der Energienachfrage vor MSV verzeichnet die Elektroofenroute mit rund 1,7% p.a. infolge des weiter unterstellten Produktionszuwachses, während die Hochofenroute bis 2035 stagniert. Der Einfluss der Materialstrategieverbesserungen reduziert die italienische Energienachfrage in 2035 um 20%, d.h. auf rund 71,3 TWh. Den stärksten Rückgang verzeichnen die Hochofenroute und die zugeordneten Prozesse (-30% in 2035). Der Energieträger-Mix in Italien verändert sich stärker in 2035 nach MSV als in Frankreich und Deutschland durch die deutlich höheren Anteile der Elektrostahlroute: von 23% Strom (20 TWh) und 77% Brennstoffe (69 TWh) auf 26% Strom (19 TWh) und 74% Brennstoffe (52 TWh).

Die Simulationsergebnisse in **Polen** vor MSV zeigen nur einen sehr geringen Zuwachs des Energieverbrauchs zwischen 2010 und 2035 um rund 0,1% p.a. von 38,8 auf 39,8 TWh, wobei bis 2025 ein zwischenzeitliches Maximum von 42,6 TWh erreicht wird. Nach MSV sinkt der polnische Verbrauch in 2035 um rund 23% auf 30,7 TWh und beschreibt somit den höchsten absoluten Rückgang unter den betrachteten Schwerpunktländern (vgl. Abbildung 26). Dieser entspricht einer jährlichen Rate von -0,9% p.a. Sinkt die Energienachfrage in der Hochofenroute vor MSV nur um rund -0,3% p.a. zwischen 2010 und 2035, sinkt dieser nach MSV weitaus stärker um rund -1,6% p.a. und reduziert sich im Vergleich zur Simulation ohne MSV in 2035 um -28% auf 12,7 TWh (19,3 TWh in 2010).



Quelle: FORECAST Industry

Abbildung 26: Energienachfrage nach Prozess PL (2010-2035) vor (links) und nach (rechts) Materialstrategieverbesserungen

Das erhebliche Wachstum der Energienachfrage in der Elektrostahlproduktion vor MSV (+2,5% p.a. 2010-2035) schwächt sich etwas in der alternativen Simulation auf +2,3% p.a. ab. Den größten absoluten Rückgang in 2035 verzeichnet die Hochofenroute (-28%) und den zugehörigen Prozessen, die Elektrolichtbogenroute sinkt verhältnismäßig schwach um nur -5%.

Der Energieträger-Mix setzt sich nach Materialstrategieverbesserungen in 2035 aus 18% Strom (6 TWh) und 82% Brennstoffe (25 TWh), zuvor lag dieser bei 16% Strom (6 TWh) und 84% Brennstoffe (34 TWh).

6.4 Simulation der gesamtwirtschaftlichen Effekte mit ASTRA

Materialstrategieverbesserungen, wie z.B. Materialeffizienzsteigerungen oder Materialsubstitution durch neue Werkstoffe, können sich nicht nur positiv auf die Energiebilanz eines Landes auswirken sondern gehen auch einher mit zusätzlichen Investitionen und Programmkosten, welche ebenfalls Auswirkungen auf die wirtschaftliche Aktivität, Struktur, Beschäftigung und das private Einkommen eines Landes haben können, ebenso wie die vermiedenen Energiekosten durch Materialstrategieverbesserungen in der Stahlindustrie.

Zur Simulation der zusätzlichen Investitionen durch Materialstrategieverbesserungen wurde wie bereits in Abschnitt 5.2.4.2 diskutiert ein einfacher Berechnungsansatz gewählt: die jährliche Rohstahlproduktions-Einsparung in Tonnen durch Materialstrategieverbesserungen im Vergleich zum Vorjahr, multipliziert mit der angenommen Stahlpreisentwicklung (linearer Anstieg von 500 €/Tonne in 2010 (geschätzter Durchschnittspreis basierend auf The World Bank Group (2015c)) auf 600 €/Tonne in 2035 begründet mit einer leichten Anhebung der Rohstoff- und Energiepreise), multipliziert mit einer über die Zeit konstanten unterstellten Amortisationszeit von 3,5 Jahren.

Die gesamten **zusätzlichen Investitionen** durch Materialstrategieverbesserungen werden dann top-down auf die entsprechenden Sektoren konstant über den Simulationszeitraum verteilt. Im Fall der zusätzlichen MSV in der Stahlindustrie handelt es sich bei den betroffenen Branchen in ASTRA um: Metallprodukte, Fahrzeugbau, Industrielle Maschinen, Computer, Elektronik, Gummi und Kunststoffe, Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe (Recycling), Kreditwesen, Sonstige Marktleistungen und Nicht-Marktleistungen. Die berechneten kumulierten Investitionen in Materialstrategieverbesserung von 2011 bis 2035 betragen in Frankreich rund 3,7 Mrd. €, in Deutschland rund 11,2 Mrd. €, in Italien rund 6,5 Mrd. € und in Polen rund 2,7 Mrd. €.

Für die Berücksichtigung **der Programmkosten** der Materialstrategieverbesserungen wird hier von einer stark vereinfachten Annahme (3 Prozent der Zusatzinvestitionen auf staatlicher Seite und 1 Prozent der Zusatzinvestitionen auf Seiten der Wirtschaft) ausgegangen, da empirische Erhebungen für die Fülle der entsprechenden „policy“-Maßnahmen nicht vorhanden sind (vgl. Abschnitt 5.2.4.2). Die berechneten kumulierten Programmkosten von 2011 bis 2035 betragen in Frankreich rund 147 Mio. €, in Deutschland rund 447 Mio. €, in Italien rund 262 Mio. € und in Polen rund 107 Mio. €.

Aus den Energieverbrauchsreduktionen werden dann die **Energiekostenreduktionen** (d.h. die vermiedenen Energiekosten) der Stahlindustrie berechnet. Die Differenz der Energieverbrauchsprojektionen auf FORECAST Industry Energieträgerebene (Biomasse u. Müll, Kohle, Fernwärme, Strom, Gas, Öl¹⁴²) zwischen den beiden Szenarien (vor und nach MSV) werden jährlich mit den entsprechenden Energieträgerpreisen bis 2035 multipliziert und anschließend aggregiert (vgl. Abschnitt 5.2.4.2). Die berechneten kumulierten vermiedenen Energiekosten von 2011 bis 2035 betragen in Frankreich rund 3,1, in Deutschland rund 9,7, in Italien rund 5,6 und in Polen rund 2,9 Milliarden Euro.

Die zusätzlichen sektoralen Investitionen, Programmkosten und die vermiedenen Energiekosten fließen dann in einen iterativen Berechnungslauf in das makroökonomische Modell ASTRA ein, welches dann die Effekte dieser zusätzlichen Investitionen auf Wertschöpfung, Beschäftigung, Außenhandel, etc. berechnet.

Diese Rückkopplung nach Materialstrategieverbesserungen führte für das Jahr 2035 zu einer **Erhöhung des Bruttoinlandsproduktes** gegenüber der Referenz von 0,02% in Frankreich, 0,06% in Deutschland, 0,04% in Italien und 0,28% in Polen. Dies entspricht ebenfalls einem Anstieg des BIP pro Kopfs in dieser Größenordnung für das Jahr 2035. Die gesamte **Bruttowertschöpfung** in den vier Kernländern stieg abhängig von der unterschiedlichen Wirtschaftsstruktur der Länder (siehe Abschnitt 5.2.1) um 0,02% in Frankreich, 0,04% in Deutschland, 0,06% in Italien und 0,37% in Polen. Für die **Beschäftigung** bedeutete dies ein

¹⁴² Im Fall der Stahlindustrie eigentlich Ölabfälle.

Plus in 2035 von 0,01% in Frankreich und Deutschland bzw. 0,02% in Italien und 0,04% in Polen.

Tabelle 62: Veränderung der Bruttowertschöpfung der Sektoren Energie und Metallprodukte

Land	$\Delta 2035$	$\Delta 2035$	$\Delta 2035$
	Energie	Metallprodukte	Bankwesen
Frankreich	-0,7%	+0,9%	+0,0%
Deutschland	-1,5%	+2%	-0,2%
Italien	-0,8%	+1,4%	-0,1%
Polen	-0,7%	+13,2%	+0,2%

Quelle: ASTRA-EC¹⁴³

Auf subsektoraler Ebene haben **Energie, Metallprodukte und Bankwesen** die größten Wertschöpfungs-Einbußen bzw. -Zugewinne aufgrund zusätzlicher Investitionen und vermiedenen Energiekosten zu verzeichnen.

Insgesamt verzeichnete Polen mit den noch höchsten Materialstrategieverbesserungspotentialen auch die stärksten ökonomischen Effekte auf Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung und Beschäftigung. Interessant ist jedoch, dass Deutschland die größten Einbußen nach Materialstrategieverbesserungen (trotz geringerer Potentiale) im Energiesektor zu verzeichnen hat. Dies deutet erstens auf die energieintensive Nutzung der Oxygenstahlproduktion in Deutschland hin sowie die Signifikanz der Eisen- und Stahlindustrie in der deutschen Wirtschaft.

¹⁴³ Aufgrund von, von dieser Arbeit unabhängigen, Weiterentwicklungen des Modells ASTRA, können nur relative Änderungen angezeigt werden.

7. Kritische Diskussion

Nachfolgend sollen die zuvor vorgestellte Methodik und die dazugehörigen Simulationsergebnisse kritisch diskutiert werden. Aufgeteilt wird diese Diskussion in Unsicherheit der Rahmenbedingungen, einen kurzen Vergleich mit ähnlichen, bereits im Methodenkapitel erwähnten, Ansätzen, eine Modellvalidierung/-plausibilisierung basierend auf offiziellen Statistiken sowie einer kritischen Diskussion der Modellannahmen und Schlussfolgerungen aus den Modellergebnissen. Der Mehrwert des entwickelten Ansatzes ist die transparentere, verständlichere und Szenario-konsistente Analyse von Energieszenarien unter der Berücksichtigung von inter- und intra-sektorealem Strukturwandel (einschließlich der Einflüsse von Materialstrategien wie z.B. Materialeffizienz und –substitution in der Industrie), sowie die Möglichkeit sehr schnell Szenarien oder Szenario-Varianten zu generieren. Konkretisiert wurde der hybride Modellierungsansatz in dieser Arbeit für das Beispiel der Stahlindustrie auf Länderebene für die Europäische Union. Die hier entwickelte Methodik kann auch für andere energieintensive Grundstoffe mit primärer und sekundärer Produktionsroute angewandt werden.

Wichtige Parameter, wie zum Beispiel die Entwicklung der Verteilung der sektoralen Nachfrage nach Stahlerzeugnissen, aber auch die Entwicklung wichtiger Bestimmungsgrößen der Schrottkreisläufe (durchschnittliche Nutzungsdauern, Schrottraten, etc.) wurden in dieser Arbeit mittels länderspezifischen Expertenbefragungen erhoben bzw. plausibilisiert und mit Hilfe eigener Annahmen und den verfügbaren statistischen Daten zu einem Modell auf Länderebene konfiguriert.

Wenngleich viel Analysearbeit in dieses Beispiel eines hybriden Modellierungsansatzes geflossen ist und manche bisher geschätzte Zusammenhänge empirisch geprüft bzw. durch Experten verifiziert wurden, bleiben kritische Fragen und Anmerkungen dieser Dissertation unvermeidbar. Denn

- einerseits lässt sich der regressus ad infinitum nicht führen, d.h., an einer Stelle der Rahmenbedingungen müssen immer Annahmen getroffen werden, um zu Wenn-Dann-Aussagen kommen zu können,
- andererseits sind Modellentwicklungen immer auch Vereinfachungen von Realität. Dies gilt insbesondere in einem dynamischen sozio-ökonomischen Feld wie der heutigen Energiewirtschaft Europas, die sowohl von der Globalisierung, der industriellen Produktion als auch der Klimapolitik in Zukunft stark betroffen sein wird, und in der sich viele statistisch abgesicherten Kausalitäten (der Vergangenheit) in Zukunft merklich ändern könnten.

Unsicherheit der generellen Rahmenbedingungen

Wie unsicher manche Rahmenbedingungen sein oder werden können, die man vor wenigen Jahren noch für stabil und robust hielt, zeigen die jüngsten Wanderungsbewegungen aus Krisengebieten. Hier könnten in wenigen Jahren völlig andere demographische Entwicklungen in europäischen Ländern wahrscheinlich werden, welche man vor 10 Jahren noch ausgeschlossen hätte.

Ähnliches mag für den Bestand der Europäischen Union in ihrer jetzigen Form gelten. Überkapazitäten von energieintensiven Grundstoffen in Europa und China führen möglicherweise zu erheblichen Strukturverschiebungen (wie man sie in der Vergangenheit im Bereich der Photovoltaik-Model-Herstellung beobachten konnte bzw. in den kürzlich erlassenen Anti-dumping-Zöllen der EU auf chinesische Stahlprodukte (European Commission 2016a)). Ob gravierende technologische Veränderungen wie z. B. durch eine intensive Digitalisierung von Produktionsprozessen und Lieferketten zu Verlagerungen von Produktionsstandorten führen, ist heute kaum absehbar (so zeigt z.B. die Studie „Wertschöpfung lohnt“ von Kinkel et al. (2015) , dass sich Eigenfertigung für deutsche Unternehmen noch lohnen kann).

An diesen Beispielen wird deutlich, dass die Setzung von Rahmenbedingungen zentral für die Ergebnisse sein kann, die man mit den Modellberechnungen erzielt und dass derartige Unsicherheiten bei den Rahmenbedingungen des Umfeldes eines Untersuchungsgegenstandes stets Grenzen der Aussagen markieren.

Vergleich des Ansatzes zu anderen Studien

Die im Modell des Autors getroffenen Annahmen zur sektoralen Nachfrageverteilung unterscheiden sich zu dem Optimierungsansatz von Pauliuk et al. (2013c, S. 26) und zur zukünftigen Weltregionen-Entwicklung in Pauliuk et al. (2013a, S. 3449–3451), durch deren empirische Basis; die in dieser Arbeit verwendeten Daten basieren, neben verfügbarer Literatur und Statistiken, auf länderspezifischen Befragungen und makroökonomischen Rahmendaten zur (Nachfrage-) Entwicklung des betrachteten Szenarios aus einem gesamtwirtschaftlichen EU-Länder-Modell. So wurden wichtige Variablen, wie zum Beispiel die länderspezifischen Trends der Entwicklung der Recyclingraten für alle Sektoren bis 2035 basierend auf der durchgeführten Expertenbefragung festgelegt. Dies dürfte in dieser Arbeit auf der Länderebene zu konkreten Simulationen des Stahlbedarfs und der Produktion führen, die auch nationale Eigenheiten und Gesetzgebungen berücksichtigen können.

Allerdings stehen derartige Länderanalysen bei vielen Grundstoffen häufig vor dem Problem, dass der Analytiker in die Situation der Projektion von Einzelentscheidungen auf Unternehmensebene gerät - in diesem Fall Stahlunternehmen bzgl. ihrer Standorte (zu mindestens auf der Hochofenroute). Qualität und Begründungen der in dieser Arbeit getroffenen Annahmen wurden bereits in Abschnitt 5.2.4.3 intensiv diskutiert.

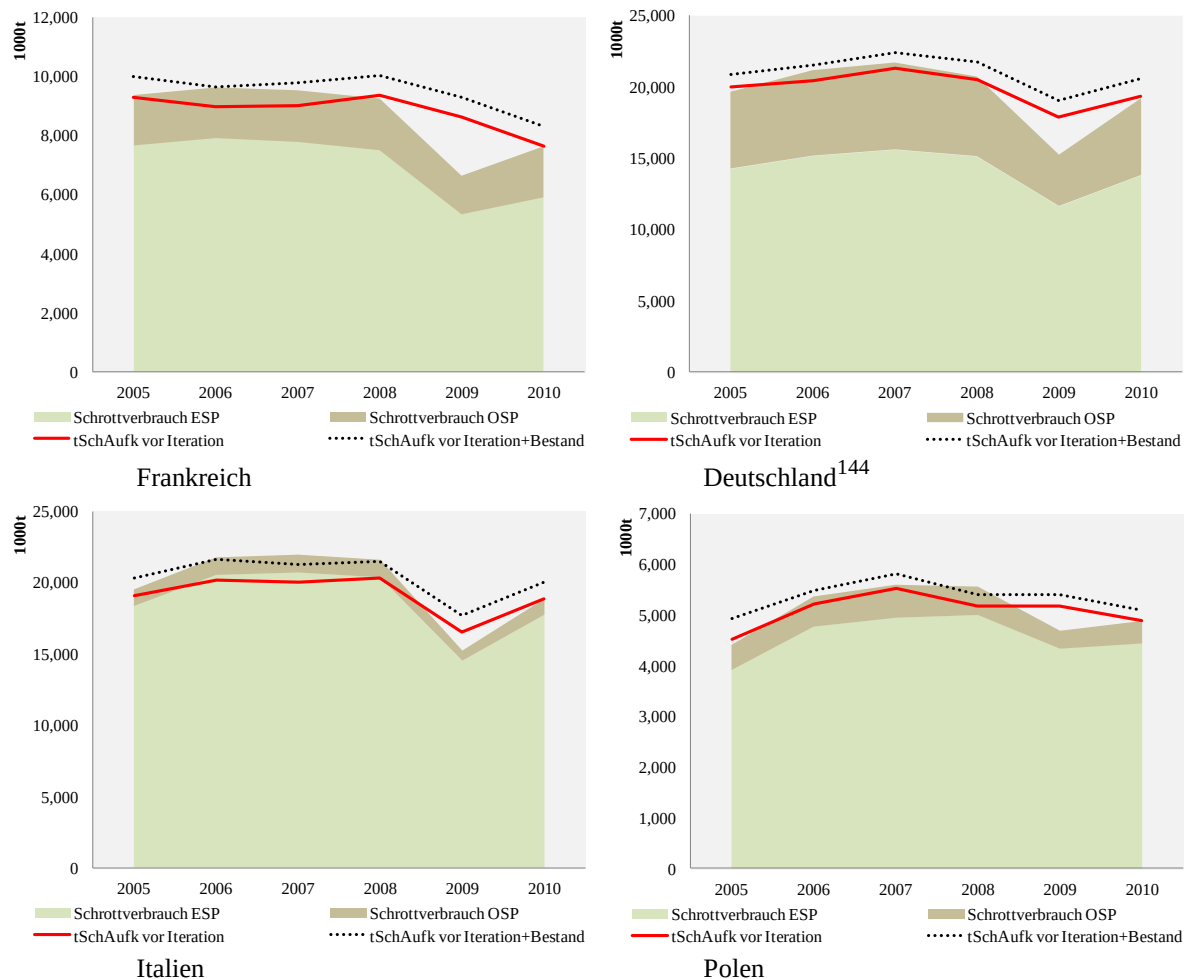
Auch im Vergleich mit Morfeldt et al (2015) und Xylia et al (2014) bleiben Unterschiede zu dieser Arbeit in der Plausibilisierung/Ermittlung wichtiger Parameter durch die hier durchgeführte Expertenbefragung bestehen. Des Weiteren handelt es sich bei dem Schrottverfügbarkeitsmodell SAAM um einen im Vergleich vereinfachten Ansatz (keine Eigenschrottmodellierung, keine Neuschrottmodellierung auf sektoraler Ebene), welcher keinen Schrotthandel oder indirekte Stahl-Nettoexporte, noch Trends zu höherer Wertschöpfung oder Veränderungen in Materialeffizienz, Materialsubstitution und Produktnutzung berücksichtigt.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zu den erwähnten Arbeiten ist der Modellierungskontext der hier vorgestellten Methode. Der hybride Modellierungskontext ermöglicht iterative Rechenläufe, um nicht nur die Energieeinsparung durch zusätzliche Materialstrategieverbesserungen zu ermitteln, sondern auch mittels monetärer Größen (vermiedene Energiekosten, Programmkosten, Investitionen in Materialstrategien) deren Einfluss auf die ökonomische Aktivität, die Beschäftigung, die strukturellen Veränderungen und die privaten Einkommen eines Landes abzubilden.

Modellvalidierung für den Zeitraum 2005-2010

Plausibilisiert werden die Annahmen des Materialflussverfahrens des Autors mittels der zuvor vorgestellten Schrotteinsatz-Parameter für die Oxygen- und Elektrostahlproduktion (in Tonne pro Tonne). Mit Hilfe dieser Parameter und der historischen Oxygenstahl- und Elektrostahlproduktion (World Steel Association mehrere Ausgaben) kann ein fiktiver inländischer Schrottverbrauch berechnet werden (Summe *Schrottverbrauch ESP* und *Schrottverbrauch OSP*; Abbildung 27), welcher als Kontrollgröße für das im Modell berechnete tatsächliche Schrottaufkommen (nach Berücksichtigung des Schrotthandels) dient (*tSchAufk vor Iteration*; Abbildung 27).

Das hier entwickelte Flussmodell für Stahlschrotte zeigt eine gut angepasste/kalibrierte Entwicklung für die Vergangenheit, wobei der kurzfristig heftige Konjunkturunbruch 2008-2009 verständlicherweise nicht simuliert werden konnte, da das Schrottflussmodell von gleichmäßigen Lebenszyklen der Stahlverwendung ausgeht und keine Lagerhaltung mitberücksichtigt, um konjunkturelle Schwankungen abbilden zu können. Für eine Langfristprojektion ist dies auch nicht erforderlich.



Quelle: eigene Berechnung (Lagerbestand aus Eurostat 2015c)

Abbildung 27: Plausibilitätskontrolle Schrottaufkommen und -verbrauch FR, DE, IT, PL (2005-2010)

Mussten die Einsatz-Parameter der drei Länder Frankreich, Italien, und Polen geschätzt werden, so sind insbesondere die Ergebnisse für Deutschland - mit den empirisch basierten Schrotteinsatz-Parametern - ein Indikator für die Plausibilität des Modells (hierbei handelt sich um die Modellergebnisse vor Iteration). Die sich auf Lager befindlichen Schrottbestände am Anfang jedes Jahres (Eurostat 2015c)¹⁴⁵ bieten weiteren Spielraum zwischen Aufkommen

¹⁴⁴ Zur Plausibilisierung wurden die historischen Modellergebnisse Deutschland ohne den finalen Iterationsschritt berechnet, welcher für die Projektion 2010-2035 notwendig ist (deshalb die leichte Abweichung zwischen Statistik und tSchAufk vor Iteration in Deutschland für das Jahr 2010), begründet mir der verfügbaren empirischen Verbandsinformation, welche zur Plausibilisierung nicht künstlich verändert werden sollte. Wie bereits in Abschnitt 5.2.4.3 Fußnote 131 erwähnt, wurden dann in der Projektion (2010-2035) die Modellergebnisse für Deutschland mit Iteration berechnet und hierbei auf den statistischen Ausgangswert von 19,2 Mio. Tonnen (Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh 2014, S. 25) kalibriert (Ungenauigkeit wurde auf Netto-Schrottexporte übertragen).

¹⁴⁵ Für 2009 und 2010 waren keine Daten verfügbar, hier wurden die Werte für 2008 eingesetzt. Dies erscheint plausibel, da sich die Lagerbestände der Schwerpunktländer seit 2005 relativ konstant verhalten haben. (Eurostat 2015c)

und Verbrauch des jeweiligen Jahres (Differenz zwischen *tSchAufk vor Iteration* und *tSchAufk vor Iteration+Bestand*). Wo möglich, werden zu Berechnung der Jahre 2005 bis 2010 historische Werte eingesetzt (sichtbarer Stahlverbrauch, indirekte Stahl-Nettoexporte, etc.) um die Annahmen zur sektoralen Verteilung der Nachfrage, Nutzungsdauer, Schrottraten zu plausibilisieren.

Im Vergleich zu den „*World steel recycling figures 2007 bis 2011*“ des Bureau of International Recycling Ferrous Division (2012, S. 12) liegen die hier berechneten fiktiven Schrottverbräuche unter dem dort angegebenen Stahlschrottverbrauch. Im Jahr 2010 betrug dieser laut Bureau of International Recycling Ferrous Division (2012, S. 12), welche ihre Informationen von EUROFER (Quelle unbekannt) bezogen, rund 8,1 Mio. Tonnen in Frankreich, 18,8 Mio. Tonnen in Deutschland, 20,4 Mio. Tonnen in Italien und rund 5,4 Mio. Tonnen in Polen. Das hier vorgestellte Modell nutzt einen fiktiven Schrottverbrauch in der Stahlindustrie als Kalibrierungsbasis von rund 19,2 Mio. Tonnen in Deutschland basierend auf der nationalen Statistik der Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014, S. 25), sowie geschätzten 7,6 Mio. Tonnen in Frankreich, 18,9 Mio. Tonnen in Italien, und 4,9 Mio. Tonnen in Polen. Da bereits für die empirisch belegten deutschen Daten eine Abweichung von rund 0,4 Mio. Tonnen beobachtet wurden, wird davon ausgegangen, dass es sich auch bei den Daten des Bureau of International Recycling Ferrous Division (2012, S. 12) um Schätzungen handelt. Des Weiteren liegt es nahe, dass auch für die übrigen Länder eine Unschärfe in dieser Größenordnung vorliegt. Was die im Modell angenommenen Zahlen für Frankreich und Polen durchaus plausibel erscheinen lässt. Durch den höheren Verbrauch in Italien erscheint auch hier die geringfügig höhere Abweichung immer noch verhältnismäßig.

Im Vergleich mit einer anderen Studie von Xylia et al. (2014), welche in Anlehnung an die Arbeiten von Morfeldt et al. (2013) und Pauliuk et al. (2013c) ebenfalls ein europäisches Länder-Schrottverfügbarkeitsmodell SAAM („*Scrap Availability Assessment Model*“, Xylia et al. (2014, S. 8–9)) entwickelt haben, liegen die in der mit der in dieser Arbeit ermittelten tatsächlichen Schrottaufkommen/-verbräuche, welche zur Stahlproduktion zur Verfügung stehen im Basisjahr 2010 zum Beispiel für Deutschland unter den von Xylia et al. (2014, S. 12) ermittelten Werten (eigene Schätzung aus Abbildung von Xylia et al. (2014, S. 12): größer 25 Mio. Tonnen wahrscheinlich rund 27,5 Mio. Tonnen; eigene Berechnung: 19,3 Mio. Tonnen nach Validierung mit Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014) (vgl. Abbildung 27)). Dies gilt ebenfalls für Polen.

Ursächlich hierfür können verschiedene Gründe sein:

- Xylia et al. (2014) berücksichtigen keinen indirekten Stahlhandel (keine explizite Erwähnung in der Modellbeschreibung) und somit auch nicht den tatsächlichen Stahlverbrauch eines Landes, welcher die Basis für die Alt-Schrottgenerierung bildet.

- Außenhandel mit Stahlschrott wird nicht explizit in der Modellbeschreibung von Xylia et al. (2014) erwähnt, was auf die fehlende Berücksichtigung dieser Größe hindeutet. Bei Deutschland handelt es sich zum Beispiel um einen historischen Netto-Schrott-Exporteur (vgl. Abbildung 15).
- Unterschiedliche Annahmen zu Schrottraten, Nutzungsdauer, sektoraler Verteilung, etc. - wie in Abschnitt 6.1 und 6.2.1 bereits diskutiert, haben die getroffenen Annahmen einen erheblichen Einfluss auf das Modellergebnis.

Im Kontext der Projektion, ist zu erwähnen, dass Xylia et al. (2014) keine Materialstrategieverbesserungen und somit auch nicht deren Auswirkungen auf die zukünftige Schrottverfügbarkeit, wie in der hier vorliegenden Arbeit analysiert, berücksichtigen. Für Deutschland prognostizieren Xylia et al. (2014, S. 12) einen Zuwachs von rund 1,6% p.a. bis 2030 (geschätzt aus Abbildung in Xylia et al. (2014, S. 12); 27,5 Mio. Tonnen in 2010 auf 38 Mio. Tonnen in 2030) in der deutschen Schrottverfügbarkeit. Die in dieser Arbeit berechneten Modellergebnisse zeigen einen Zuwachs von rund 1,9% p.a. bis 2030 für Deutschland. Das etwas stärkere Wachstum der Schrottverfügbarkeit in der hier durchgeführten Studie im Vergleich zu Xylia et al. (2014, S. 12) dürfte sowohl auf das höhere Wachstum in der in dieser Arbeit verwendeten „Hochwachstums-Szenario-Variante“ des makroökonomischen Modells ASTRA, als auch auf die unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung wichtiger Szenario-Parameter (z.B. im Materialflussmodell) zurück zu führen sein.

Aufgrund der Notwendigkeit der Vielzahl an Annahmen, welche in der vorgestellten Methodik getroffen werden mussten, sind die Ergebnisse dieser Modellierung, wie auch in vielen anderen Modellen, von relativ hohen Unsicherheiten geprägt. Deshalb wurden für drei, aus der Sicht des Autors, besonders Ergebnis-relevante Annahmen in Kapitel 6.2.1 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt: (1) durchschnittliche sektorale Nutzungsdauern, (2) Bruttowertschöpfungsentwicklung der stahlnachfragenden Sektoren und (3) die sektoralen End-of-Life Recyclingraten. Besonders sensitiv reagiert das Modell auf eine Änderung der angenommenen durchschnittlichen Nutzungsdauer (vgl. Abbildung 19). Aber auch die Bruttowertschöpfungsentwicklung der stahlnachfragenden Sektoren und die Erhöhung der End-of-Life Recyclingraten (je nach Ausgangsniveau) haben sichtbaren Einfluss auf die Modellergebnisse (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22).

Makroökonomische Annahmen und Simulationsergebnisse zur Produktion

Ein Beispiel des zuvor genannten hohen Einflusses der Rahmenbedingungen sind die hier verwendeten hohen Wachstumsraten der industriellen Bruttowertschöpfung von rund 2% p.a. einer „Hochwachstums-Szenario-Variante“ des makroökonomischen Modells ASTRA.

Dieses Wachstum ist mit hoher Wahrscheinlichkeit zu hoch, weil das BIP pro Kopf Wachstum der betrachteten Staaten in den letzten Jahren eher bei rd. 400 € pro Jahr und Kopf lag, d.h. bei durchschnittlich etwas mehr als 1% p.a. (mit Ausnahme von Polen)¹⁴⁶.

Das Wachstum der industriellen¹⁴⁷ Bruttowertschöpfung in Frankreich und Italien lag aber in der Vergangenheit (Periode 1999/1995 bis 2008¹⁴⁸) eher leicht unterdurchschnittlich zum Wachstum des BIP. Für Deutschland in der Periode 1995 bis 2008 war das industrielle Wachstum leicht überdurchschnittlich („Re-Industrialisierung“), jedoch nicht so deutlich wie in diesem Szenario angenommen. (The World Bank Group 2012d)

Dies bedeutet, dass man bei Annahme eines geringeren Wirtschaftswachstums auch zu geringeren Produktionszahlen kommen würde. In dieser Dissertation ging es aber nicht um die Entwicklung eines „wahrscheinlichen“ Produktions-Szenarios für die Stahlindustrie, sondern um die methodische Fragestellung, wie man ein makroökonomisches top-down Modell mit einem technologiespezifischen bottom-up Energiemodell intelligent koppelt und zugleich im Beispielbereich des Stahls auch die Möglichkeiten von Strukturwandel und Materialeffizienz und -substitution in all ihren Spielarten mitberücksichtigt.

Im Hinblick auf den Strukturwandel der Produktionsverfahren ist in den betrachteten Ländern der relativ starke Elektrostahlzuwachs der Annahme geschuldet, dass der verfügbare Schrott nach Schrottaußenhandel (Szenario-Annahme) inländisch entweder zum Teil noch in die Oxygenstahlherstellung (bis zu 20% Anteil) oder in die Elektrostahlproduktion mündet und es dort auch zu Kapazitätsausbau kommen kann.

In der Realität kann es jedoch aus verschiedenen Gründen, welche in diesem Modell nicht explizit modelliert wurden, zu einer anderen Entwicklung der Stahlproduktion kommen (z.B. steigende Strompreise in den EU-Ländern, höhere europäische Umwelt- oder CO₂-Emissionsminderungsaufgaben, steigende Stahlimporte in den europäischen Markt mit kostengünstigeren Stahlprodukten aus Schwellenländern (wie derzeit aus China), politische Entscheidungen gegen energieintensive Industrien (z.B. gegen Hüttenaluminium zugunsten der Produktion in Island), Streichungen von Vergünstigungen und Subventionen (z.B. bei Energie- und Stromsteuer) in der augenblicklichen Höhe, unternehmensinterne Überlegungen der großen Stahlkonzerne, ihre Produktionskapazitäten weltweit neu auszurichten). Unter diesen Gesichtspunkten könnten sich der Stahlschrott-Außenhandel, die Elektrostahlproduktion und selbst die Oxygenstahlproduktion anders entwickeln als hier angenommen. Argumente für eine erhöhte Elektrostahlproduktion könnten die prozessbedingten CO₂-Emissionen des Hochofens oder auch bessere Produktqualitäten sein, die man in Elektrostahlöfen in Zukunft erreichen könnte.

¹⁴⁶ BIP pro Kopf 1995 bis 2008: DE 1,5 % p.a., FR 1,4 % p.a., IT 0,9 % p.a. (The World Bank Group 2012d).

¹⁴⁷ Verarbeitendes Gewerbe.

¹⁴⁸ 1999-2008 für Frankreich.

Fazit: Selbst wenn statistisch gesicherte Zusammenhänge zwischen den stahlnachfragenden Branchen für die Stahlproduktion anhand der Vergangenheitsdaten gefunden wurden, müssen die Gleichungen nicht zwingend die zukünftige Entwicklung beschreiben, nicht einmal für die nächsten 10 Jahre.

Die Rückkopplung der policy-veränderten Investitionen und Kosten durch Materialstrategieverbesserungen an das makroökonomische Modell

Investitionen in Materialstrategien (Effizienz, Substitution, etc.), die zusätzlich durch Politikmaßnahmen in entsprechenden Szenarien simuliert werden, können in einem kleinen Modul zusammengefasst und dann entsprechend ihren Vorleistungen auf die Branchen des makroökonomischen Modells aufgeteilt werden. Darüber hinaus sind auch die Programmkosten der Gebietskörperschaften und der Selbstorganisationen der Wirtschaft (z.B. Subventionen, Verwaltungskosten, Informationskosten) für die simulierten Politikmaßnahmen sowie die vermiedenen Energiekosten der Stahlindustrie abbildbar.

Die in der Arbeit verwendeten Daten für die Zusatzinvestitionen in Materialstrategien (hier für Stahl) waren über eine einfache Methode der anlegbaren Investitionen über die jährlichen Materialeinsparungen geschätzt worden. Hierbei werden die jährlich eingesparten Materialkosten mit einer durchschnittlichen Amortisationsdauer multipliziert, um auf diese Weise zu einer quantitativ plausiblen Größenordnung des Investitionsvolumens zu kommen. Von diesem Ergebnis werden dann auch die Programmkosten als Anteile am Investitionsvolumen geschätzt. Hier wird es in Zukunft darum gehen, empirisch basierte Investitionsvolumina für die verschiedenen Materialeffizienz- und-substitutions-Investitionen zu generieren und zu verwenden und auch bei den Programmkosten mit möglichst empirischen Daten zu arbeiten.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war, einen konzeptionellen Brückenschlag zwischen einem makroökonomischen Modell – hier konkretisiert am Beispiel des top-down Modells ASTRA - und einem technologiespezifischen bottom-up Energienachfragemodell für die Industrie – hier konkretisiert am Beispiel FORECAST Industry - zu schaffen. Dabei sollten beispielhaft auch Produktions- und Nachfrageveränderungen in der Grundstoffindustrie infolge von verstärktem Recycling, Verbesserung der Materialeigenschaften und Materialsubstitution sowie durch Veränderungen im Nutzerverhalten berücksichtigt werden. Dies erfolgte am Beispiel einer Fallstudie für Stahl und dessen Verwendung in ausgewählten europäischen Ländern. Schließlich sollten durch ökonometrisch geschätzte Verhaltensgleichungen der Zusammenhänge zwischen ökonomischen Variablen des makroökonomischen Modells und der physischen Produktion (als Input für das bottom-up-Modell bzw. Nachfrage), sowie durch eine Materialflussmodellierung die Modellqualität, Konsistenz, Transparenz und der Einsatz zur Szenario Modellierung verbessert werden. Bisher erfolgte dieser Brückenschlag durch (oft nicht dokumentierte und nicht nachvollziehbare) Schätzungen der Analysten, wodurch bei der Berechnung mehrerer Szenario-Varianten jeweils neue Schätzungen mit großem Zeitaufwand erforderlich waren.

Das in dieser Arbeit vorgestellte und entwickelte Modell zeigt, dass eben dieser Brückenschlag unter den gewünschten Kriterien möglich ist, und maßgeblich zur Verbesserung der Transparenz von Energiebedarfsmodellen mit ihrer Einbettung in gesamtwirtschaftliche Modelle und Zusammenhänge beiträgt. Der Brückenschlag ermöglicht als hybrides Modellsystem mit gleichzeitiger Simulation des Stoffflusses von Grundstoffen in einer Ökonomie außerdem zügig iterative Rechenläufe bei unterschiedlichen Annahmen von Rahmenbedingungen ökonomischer, demographischer oder technologischer Art.

Schlussfolgerungen

Methodisch hat sich im Laufe dieser Arbeit gezeigt, dass insbesondere für die länder- und sektorspezifische Materialflussmodellierung ein verhältnismäßig hoher Datenaufwand betrieben werden muss bzw. kann. Qualität und Differenzierung dieser Daten für die unterschiedlichen Stahlanwendungssektoren beeinflusst maßgeblich das Modellergebnis, was sich z.B. auch in der Sensitivitätsanalyse der durchschnittlichen Nutzungsdauer gezeigt hat. Folglich erhält man durch diese detaillierte und differenzierte Modellierung zwar bessere Ergebnisse, muss jedoch auch mit einem entsprechend höheren Datenbedarf rechnen.

Die Beantwortung der Frage wie viel Datenaufwand für eine gute Ergebniserzielung berechnet ist, kann man durchaus von der regionalen Ausrichtung und deren historischen Entwicklung abhängig machen. Analysiert man kontinuierliche Entwicklungen, wie zum Beispiel in

den USA, und möchte dabei nur begrenzt (z.B. 10 Jahre) in Zukunft blicken, so können - so weit keine unerwarteten und signifikanten Veränderungen absehbar sind - mit verhältnismäßig geringerem Aufwand durchaus gute Ergebnisse erzielt werden. Für Länder, wie zum Beispiel Deutschland, mit historisch ökonomischen Einschnitten wie der Nachkriegszeit und Wiedervereinigung, sind derartige Projektionen schwieriger zu entwickeln, und ein höherer Datenaufwand durchaus gerechtfertigt bzw. notwendig.

Die **Simulationsergebnisse**, welche auf einer industriellen „Hochwachstums-Szenario-Variante“ (mit rund 2% p.a. im Verarbeitenden Gewerbe der betrachteten Schwerpunktländer) des makroökonomischen Modells ASTRA basieren, zeigen, dass unter den zugrunde liegenden Annahmen einer leichten Reindustrialisierung es noch zu einem Anstieg der Rohstahlproduktion gegenüber dem heutigen Niveau in den betrachteten Schwerpunktländern (Frankreich, Deutschland, Italien, Polen) kommen könnte. Dieser Anstieg würde in der Elektroofenroute stattfinden (dies aber nur unter den hier getroffenen Szenario-Annahmen zu Außenhandel mit Stahlschrott und stahlhaltigen Gütern).

Betrachtet man die Schwerpunktländer im Vergleich, so erkennt man, dass der tatsächliche Stahlverbrauch in Polen, mit 3,1% p.a. vor MSV, verhältnismäßig stärker wächst als in Frankreich (2,2% p.a.), Deutschland (2,2% p.a.) und Italien (2,7%). Diese Beobachtung gilt ebenso für die Entwicklung nach MSV (vgl. Tabelle 56). Betrachtet man jedoch die entsprechende Entwicklung der Rohstahlproduktion, so zeichnet sich ab, dass die Stahlproduktion in Polen trotz stärkerem inländischen Nachfragewachstums und Restrukturierung der Wirtschaft, keinem signifikant stärkeren Produktionswachstum unterliegt (1,3% p.a. in Polen gegenüber 1,2% p.a. in Italien, 1% p.a. in Deutschland und 0,7% p.a. in Frankreich vor MSV; vgl. Tabelle 61). Ähnliches gilt auch für Entwicklung nach MSV, wobei hier das Produktionswachstum in Polen (0,7% p.a.) unter dem von Italien (0,8% p.a.) liegt. Italien hat sich in der Vergangenheit auf die weniger energieintensive Elektroofenroute spezialisiert und kann, auch durch dessen geographische Küstenlage, verhältnismäßig einfach den Rohstoff Schrott einführen und Stahlprodukte verschiffen. Italien war in 2013, nach Deutschland, unter den zehn wichtigsten Stahl Im- und Exporteuren (Rang 6 und Rang 9) (worldsteel 2014, S. 25). Obwohl auch Frankreich noch zu den wichtigsten weltweiten Stahlhändlern gehört (worldsteel 2014, S. 25), scheinen sich dort Produktionszuwächse auch im „Hochwachstums-Szenario“, im Vergleich zu den anderen Schwerpunktländern, eher etwas niedriger zu gestalten. Die Frage die man sich hier stellen kann, ist ob dies eventuell auf eine weniger erfolgreiche Grundstoffindustrie hindeuten kann, z.B. im Vergleich zu Deutschland.

Trotz der sehr hohen Wachstumsannahmen dieses Szenarios, wäre die Oxygenstahl-Produktionskapazität der vier Länder mit fast 75 Mio. Tonnen und ohne Materialstrategieverbesserungen (MSV) im Jahre 2035 nur zu knapp 70% ausgelastet. Mit MSV läge die Überkapazität der Oxygenstahlproduktion bei etwa 44% (Auslastung zu 56%). Diese absehbaren

Überkapazitäten bei Annahme sehr hohen Wirtschaftswachstums legt die Stilllegungen von Hochofen-/ Oxygenstahl-Kapazitäten und einen entsprechend harten Wettbewerb der betroffenen Stahlunternehmen nahe, auch Fusionen wären unter diesen Rahmenbedingungen nicht ausgeschlossen.

Des Weiteren zeigen die Simulationsergebnisse, dass die hier angenommenen Fortschritte in der Stahlnutzung und seiner Substitution, dem Stahlrecycling und im verändertem Verhalten durchaus ein Potential zur Reduktion der Energienachfrage der Stahlindustrie in 2035 (Frankreich: -17%, Deutschland: -13%, Italien: -20%, Polen: -23%) haben, und folglich auch die Treibhausgasemissionen entsprechend gesenkt werden könnten. Dieses Ergebnis zeigt beispielhaft, dass die geringeren Raten der Effizienzverbesserung beim Energiebedarf der Grundstoffindustrien durch die Materialstrategieverbesserungen erhöht werden können¹⁴⁹. Insgesamt erreichen diese beiden Effizienzeffekte erhebliche Beiträge zur Reduktion energiebedingter Treibhausgasemissionen, da die Grundstoffindustrie derzeit etwa die Hälfte der industriellen Treibhausgas-Emissionen (Bruyn et al. 2015, S. 9) verursacht. Hinzu kommt, dass die Produktion in den Hochöfen zurückgehen dürfte und damit auch deren prozessbedingte Emissionen - ebenfalls ein kleiner Beitrag zur Erreichung des weltweiten 2°C-Ziels bis Mitte des Jahrhunderts.

Allerdings müssen auch die prozessbedingten Emissionen der Eisen- und Stahlindustrie, die im Jahre 2012 rund 16,4 Mio. Tonnen betragen (Umweltbundesamt (Hrsg.) 2014, S. 326), ganz erheblich (wenn nicht vollständig) abgesenkt werden (z.B. durch Energieträger- und/oder Prozesswechsel). Das Umweltbundesamt (Hrsg.) (2013, S. 15) geht davon aus, dass die Primärstahlerzeugung dann nicht mehr über die Hochofen-Oxygenstahl-Route abgedeckt wird, sondern über die Elektrostahlerzeugung anhand von Schrott und Schwammeisen (DRI-Verfahren) unter dem Einsatz regenerativer Energieträger (Umweltbundesamt (Hrsg.) 2013, S. 15).

Insbesondere in Ländern, welche bisher wenige Anstrengungen im Materialstrategiebereich unternommen haben, könnten sich hier durchaus signifikante Potentialen im Bereich der industriellen Grundstoffe eröffnen. So könnten zum Beispiel alternative Strategien wie die Förderung von Materialeffizienz- und -substitutionsmaßnahmen, als auch verstärkte nachhaltige Produktnutzung (Lebensdauerverlängerung und Pooling) ein ebenso wichtiges strategisches Aktions- und Politikfeld zur Reduktion des Energiebedarfs, Vermeidung von CO₂- und anderen Treibhausgas-Emissionen und damit zur Bekämpfung des Klimawandels sein, wie das Aktions- und Politikfeld der Energieeffizienz.

¹⁴⁹ Reduktion der Rohstahlproduktion im Vergleich um durchschnittlich 0,5% p.a.; Reduktion des Energieverbrauchs (unter den getroffenen Annahmen; z.B. zu Schrotthandel und Einsatz der Elektroofenroute) von 0,8% p.a.

Politikmaßnahmen im Bereich Material- und Energieeffizienz (nicht im Detail in dieser Arbeit diskutiert) ebenso wie strukturelle Änderungen, können in dem hybriden Modellsystem dieser Arbeit gut durch die **Rückkopplung** an das **makroökonomische Modell** abgebildet werden. Dabei spielen die berechneten vermiedenen Energiekosten, Investitionen in Materialstrategien und die Annahmen zu Programm- und Transaktionskosten eine wichtige Rolle, sind jedoch auch mit hohen Unsicherheiten belastet. Bei sehr intensiven Politikszenarios kann es auch Sinn machen Iterationen der industriellen Produktion zu berechnen (nicht im Umfang dieser Arbeit abgebildet), da insbesondere Investitionsgüterindustrie auf Kosten der Rohstoff-/Grundstoffindustrie von diesen Entwicklungen profitieren kann. Intensive politische Änderungen und Maßnahmen, wie zum Beispiel die Transformation der deutschen Wirtschaft zur Erreichung des 2°C-Klimazieles würden dann auch höhere Wachstumsdynamiken im Bereich der Investitionsgüter verursachen.

Der vorgestellte **hybride Modellierungsansatz** ermöglicht nicht nur - wie zu Beginn dieser Arbeiten geplant - eine Verbesserung der gesamten Modellqualität sowie eine übersichtliche und transparente Darstellung bzw. Erläuterung der Annahmen zur Entwicklung der ökonomischen und physischen Treibergrößen sowie die geplante plausible und Szenario-konsistente Ergebniserzeugung. Sie zeigt auch, dass alternative wichtige Faktoren, Entwicklungen und Maßnahmen, wie zum Beispiel strukturelle Änderungen sowohl in der Nachfrage nach Grundstoffen als auch innerhalb der Produktionsstrukturen (z.B. Primär- und Sekundärerzeugung) und Materialstrategien bei der Analyse der zukünftigen Energienachfrage in Kombination mit weiteren Energieeinsparoptionen (z.B. Energieeffizienz, Wechsel von Brennstoffen und Reduktionsmitteln) einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der Treibhausgasemissionsreduktionsziele leisten können. Dennoch wird die Stahlindustrie sehr wahrscheinlich die Hochofenroute durch Direktreduktionsverfahren mit regenerativ erzeugten Reduktionsmitteln ersetzen und die heute fossil basierten Energieträger durch erneuerbare Energieträger substituieren müssen, wenn die CO₂-Ziele vor 2050 erreicht werden sollen (Umweltbundesamt (Hrsg.) 2013, S. 15). Des Weiteren haben die Arbeiten gezeigt, dass die Modellergebnisse bezüglich Produktion(sroute) und folglich Energiebedarf sehr sensitiv auf die zugrundeliegenden Szenario-Rahmendaten (z.B. Wachstum der Bruttowertschöpfung der stahlnachfragenden Sektoren) und Modellannahmen (z.B. gewählte methodische Zusammenhänge, durchschnittliche Nutzungsdauer stahlhaltiger Produkte) reagieren. Weshalb hier noch einmal sehr deutlich darauf hingewiesen werden muss, dass es sich hierbei um Annahmen-abhängige Szenario-konsistente Projektionen handelt und nicht um Prognosen, d.h. eine „realistische“ Vorhersage der Zukunft handeln kann. Prognosen in diesem Vorhersage-Sinne sind für sozialökonomische Systeme prinzipiell nicht möglich. Denn alle getroffenen Modellannahmen und auch die Szenario-Rahmendaten sind mit mehr oder weniger **hohen Unsicherheiten** belastet. Dies darf bei der Nutzung und Interpretation von Modellen und Modellergebnissen nicht vergessen werden. Allzu oft wird dies in der politischen und öffentlichen Diskussion

vernachlässigt und Modellergebnisse als „Prognosen“ oder „wahrscheinlichste“ Szenarien verkauft, was zwar aus der Situation der Nutzer verständlich, aber dennoch nicht möglich ist. Modelle bilden nur innerhalb des ihnen gesteckten Annahmen-Rahmens nach dem Prinzip der Wenn-Dann-Aussagen Informationen zur Entscheidungsunterstützung für bestimmte Fragestellungen ab. Darüber hinaus erhöht die Globalisierung der Stahlindustrie durch Internationalisierung der Märkte, Umstellungen in den stahlnachfragenden Branchen die Unsicherheit mit welcher die Modellergebnisse der hier analysierten Schwerpunktländer behaftet sind. Auch demographische Entwicklungen und Migration tragen zur Unsicherheit der Prognostik bei.

Ausblick

In Zukunft könnte der hier entwickelte Ansatz, nach entsprechenden Expertenbefragungen auf alle Länder der EU und auch auf die großen globalen Player der Stahlindustrie erweitert werden (z.B. USA, Brasilien, China, Indien, etc.). Eine derartige Erweiterung würde dann auch Möglichkeiten zu einer detaillierteren Modellierung des Außenhandels mit Halb- und Fertigerzeugnissen aus Stahl und stahlhaltigen Produkten bieten.

Ebenso könnten weiterführende Arbeiten diesen Ansatz auf andere Grundstoffe umlegen, wie zum Beispiel Aluminium, Glas, Papier sowie Produkte der Grundstoffchemie (z.B. Ethylen, Chlor oder Sauerstoff), die man für die relevanten europäischen Staaten in Betracht ziehen könnte, um die Effizienz- und Struktureffekte der verbesserten Energieintensität der Grundstoffindustrieweige besser zu verstehen und transparent darstellen zu können. Hierzu gehört auch, jeweils zwischen primärer und sekundärer Produktionsroute sowie dem Eintritt neuer Produktionstechnologien (z.B. DRI) zu unterscheiden. Hier würde sich eine Kombination mit den Arbeiten von Experten zu neuen Prozesstechnologien im Bereich Stahl anbieten, welche sich mit der Energieeffizienz der unterschiedlichen Stahlproduktionstechnologien beschäftigt.

Ebenso würden auch die bereits erwähnten iterativen Produktionsläufe zur Abbildung intensiver Politiken eine interessante weitere Möglichkeit der Modellnutzung bergen.

9. ANHANG

9.1 Anhang zu Kapitel 3

Tabelle 63: Zuordnung der HS 1992 Codes zur Typisierung von Industrieprodukten

Produkt	HS Code
Chlor	280110
Ethylen	290121
Sauerstoff	280440
Ammoniak	2814
Methanol	290511
Soda	281511
(Industrie-)Ruß	2803
Salpetersäure	2808
Polypropylen, -ethylen	Gummi-/Kunststoffe
Polysulfone	-
Titandioxid	320610
Stärke	1108
Zucker (raffiniert)	170199
Klinker	252310
Brannkalk	252210
Koks	270400
Sinter	-
Zellstoff	4702
Holzstoff	4701
Stahl	7203
Aluminium	7601
Zink	7901
Kupfer	7403
Zement	2523
Papier	48 (Summe aller Unterkategorien, 4-Steller)
Gips	252010
Walzstahl	7208-7213
HW Aluminium	7603-7614
HW Zink	7903-7906
HW Kupfer	7404-7414
Hohlglas	7010
Flachglas	7003, 7004, 7005
übrige Glasprodukte	7001, 7002, 7006, 7007, 7008, 7009, 7011, 7012, 7013, 7014, 7015, 7016, 7017, 7018, 7020
Glasfasern	7019
Keramik	69 (Summe aller Unterkategorien, 4-Steller)
Gummi-/Kunststoffe	39, 40 (Summe aller Unterkategorien, 4-Steller)
Kalkprodukte	-
Ziegel	6901
Bier	2203
Backwaren	1905
Milcherzeugnisse	4 (Summe aller Unterkategorien, 4-Steller)
Fleischwaren	16 (Summe aller Unterkategorien, 4-Steller)

Quelle: United Nations 2014b, 2014c, 2014d, 2014a, 2014e, 2014f; United Nations 2016

9.2 Anhang zu Kapitel 5

Tabelle 64: Schrotteinsatz pro Tonne Elektrostahl (in Tonnen)

Land	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Frankreich	1,039	1,062	1,038	1,050	1,066	1,080
Deutschland	1,002	1,033	1,039	1,039	1,040	1,038
Italien	1,096	1,114	1,107	1,084	1,130	1,087
Polen	k.A.	k.A.	1,140	1,131	1,123	1,120

Quelle: eigene Berechnung aus Eurostat (2015c) und World Steel Association (mehrere Ausgaben)

Literaturverzeichnis

Allwood, J. M. (2013): Transitions to material efficiency in the UK steel economy. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371 (1986), S. 20110577. DOI: 10.1098/rsta.2011.0577.

Allwood, J. M.; Cullen, J. M.; Carruth, M. A.; Cooper, D. R.; McBrien, M.; Milford, R. L. et al. (2012): *Sustainable Materials. with both eyes open*. Cambridge, UK: UIT Cambridge. Online verfügbar unter <http://www.withbotheyesopen.com/pdftransponder.php?c=100>, zuletzt geprüft am 08.09.2014.

Allwood, Julian M.; Cullen, Jonathan M.; Carruth, Mark A.; Milford, Rachel L.; Patel, Alexandra C.H.; Moynihan, Muiris et al. (2011): Going on a metal diet. Using less liquid metal to deliver the same services in order to save energy and carbon. WellMet2050. University of Cambridge. Cambridge, UK. Online verfügbar unter <http://www.lcmp.eng.cam.ac.uk/wp-content/uploads/T2-Report-web.pdf>, zuletzt geprüft am 15.02.2015.

APEAL (2011): 2009 Recycling Rates in Europe. Steel for packaging achieves a new record in europe with a 72% recycling rate in 2009. Press release. Unter Mitarbeit von Patricia Mobbs. The Association of European Producers of Steel for Packaging (APEAL). Brussels. Online verfügbar unter http://www.apeal.org/uploads/Mediaroom/11-05_APEAL%20PRESS%20RELEASE%20_%202009%20Recycling%20rates.pdf, zuletzt geprüft am 23.02.2015.

Arens, Marlene; Worrell, Ernst; Schleich, Joachim (2012): Energy intensity development of the German iron and steel industry between 1991 and 2007. In: *Energy* 45 (1), S. 786–797. DOI: 10.1016/j.energy.2012.07.012.

Baltagi, Badi H. (2013): *Econometric Analysis of Panel Data*. Fifth Edition. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

Bataille, Chris; Jaccard, Mark; Nyboer, John; Rivers, Nic (2006): Towards General Equilibrium in a Technology-Rich Model with Empirically Estimated Behavioral Parameters. In: *The Energy Journal* Special Issue on Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down, S. 93–112. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI2-5.

Bataille, Christopher G. F. (2005): Design and application of a technologically explicit hybrid energy-economy policy model with micro and macro economic dynamics. Dissertation. Simon Fraser University, British Columbia, Canada. School of Resource and Environmental Management. Online verfügbar unter <http://summit.sfu.ca/system/files/iritems1/4519/etd1538.pdf>, zuletzt geprüft am 07.05.2014.

bauforumstahl e. V. (2014): Ressourceneffizienz der Stahlbauweise. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.bauforumstahl.de/ressourceneffizienz-der-stahlbauweise>, zuletzt geprüft am 14.02.2015.

Berlo, Kurt; Durand, Antoine; Höfele, Vera; Nanning, Sabine; Meyer, Sabine; Clausnitzer, Klaus-Dieter et al. (2011): Erschließung von Minderungspotenzialen spezifischer Akteure, Instrumente und Technologien zur Erreichung der Klimaschutzziele im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (EMSAITEK). Endbericht zu PART 1 ; Untersuchung eines spezifischen Akteurs im Rahmen der NKI: Klimaschutz durch Maßnahmen von Stadtwerken unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher Erfordernisse. Hg. v. Inst. für Zukunftssysteme. Saarbrücken. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/files/3951/3951_EMSAITEK.pdf; urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-39511, zuletzt geprüft am 27.12.2016.

Bialdiga, K. (2015a): Ein bisschen Optimismus. Die deutschen Stahlhersteller haben die Krise relativ gut überstanden - dank rigider Sparprogramme und zahlreicher Innovationen. Doch die weltweiten Überkapazitäten bleiben ein großes Problem. Stahl: Eine Beilage der Süddeutschen Zeitung. In: *Süddeutsche Zeitung*, 10.06.2015 (130), S. 27.

Bialdiga, K. (2015b): "In der EU ist die Trendwende vollzogen" Stahlpräsident Hans Jürgen Kerkhoff sieht großes Potenzial für die Branche, fordert aber Rückhalt von der Politik. Interview: Kirsten Bialdiga. Stahl: Eine Beilage der Süddeutschen Zeitung. In: *Süddeutsche Zeitung*, 10.06.2015 (130), S. 27.

Böhringer, Christoph (1998): The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. In: *Energy Economics* 20 (3), S. 233–248. DOI: 10.1016/S0140-9883(97)00015-7.

Böhringer, Christoph; Löschel, Andreas (2006): Promoting Renewable Energy in Europe: A Hybrid Computable General Equilibrium Approach. In: *The Energy Journal* Special Issue (Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down), S. 135–150. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI2-7.

Böhringer, Christoph; Rutherford, Thomas F. (2006): Combining Top-Down and Bottom-up in Energy Policy Analysis: A Decomposition Approach. Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung. Mannheim (ZEW Discussion Paper, 06-007). Online verfügbar unter <ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp06007.pdf>, zuletzt geprüft am 07.05.2014.

Böhringer, Christoph; Rutherford, Thomas F. (2008): Combining bottom-up and top-down. In: *Energy Economics* 30 (2), S. 574–596. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2007.03.004>, zuletzt geprüft am 07.05.2014.

Boonekamp, P.G.M. (2013): Evaluation of realised energy savings with simulation models. A new policy tool for the Netherlands. Hg. v. ECN. ECN (ECN-E--13-004). Online verfügbar unter <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2013/e13004.pdf>, zuletzt geprüft am 1.05.2014.

Booz & Company (o.J.): Die wichtigsten Stahlabnehmerbranchen (in Prozent). Hg. v. www.stahl-online.de (Stahl-Zentrum). Düsseldorf. Online verfügbar unter http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/08/Wichtigste_Stahlabnehmerbranchen_Booz.jpg, zuletzt geprüft am 15.03.2015.

Börse Frankfurt (2014a): Aluminium Kursinformationen. Home/Rohstoffe/Die meist betrachteten Wertpapiere des Tages/Aluminium. Deutsche Börse AG. Online verfügbar unter <http://www.boerse-frankfurt.de/de/rohstoffe/aluminium+com+XC0009677839>, zuletzt geprüft am 20.06.2014.

Börse Frankfurt (2014b): Kupfer Kursinformationen. Home/Rohstoffe/Die meist betrachteten Wertpapiere des Tages/Kupfer. Deutsche Börse AG. Online verfügbar unter <http://www.boerse-frankfurt.de/de/rohstoffe/kupfer+com+XC0005705501>, zuletzt geprüft am 20.06.2014.

Börse Frankfurt (2014c): Zink Kursinformationen. Home/Rohstoffe/Die meist betrachteten Wertpapiere des Tages/Zink. Deutsche Börse AG. Online verfügbar unter <http://www.boerse-frankfurt.de/de/rohstoffe/zink+com+XC0005705584>, zuletzt geprüft am 20.06.2014.

Bruyn, S. M. de; Vergeer, R.; Schep, E.; Hoen, M. 't; Korteland, M.; Cludius, J. et al. (2015): Ex-post investigation of cost pass-through in the EU ETS. An analysis for six sectors. Unter Mitarbeit von CE Delft and Oeko-Institut. Hg. v. European Commission. European Commission. Luxembourg. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/revision/docs/cost_pass_through_en.pdf, zuletzt geprüft am 19.03.2017.

Bureau of International Recycling Ferrous Division (2012): World steel recycling in figures 2007 - 2011. Steel Scrap - a Raw Material for Steelmaking. Hg. v. Bureau of International Recycling Ferrous Division. Bureau of International Recycling aisbl. Brussels. Online verfügbar unter <http://www.bir.org/assets/Documents/publications/brochures/FerrousStatsIssue3FinalLowRes.pdf>, zuletzt geprüft am 11.01.2016.

Capros, P. (o.J.): PRIMES ENERGY SYSTEM MODEL. National Technical University of Athens (NTUA); E3MLab. Online verfügbar unter http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PRIMES%20Manual/PRIMES_ENERGY_SYSTEM_MODEL.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2014.

Capros, P.; Vita, A. de; Tasios, N.; Papadopoulos, D.; Siskos, P.; Apostolaki, E. et al. (2013): EU Energy, Transport and GHG Emissions: Trends to 2050. Reference Scenario 2013. Hg. v. European Commission. Directorate-General for Energy, Directorate-General for Climate Action and Directorate-General for Mobility and Transport. Luxembourg. Online verfügbar un-

ter https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2050_update_2013.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2015.

Carruth, Mark A.; Allwood, Julian M.; Moynihan, Muiris C. (2011): The technical potential for reducing metal requirements through lightweight product design. In: *Resources, Conservation and Recycling* Volume 57, S. 48–60. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.09.018.

Catenazzi, Giacomo (2009): Advances in techno-economic energy modeling. Costs, dynamics and hybrid aspects. Dissertation. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich. Online verfügbar unter <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:41888/eth-41888-02.pdf>, zuletzt geprüft am 07.05.2014.

Clark, Colin (1957): The conditions of economic progress. Third Edition Largely Rewritten. London: MacMillan & Co Ltd, St Martin's Press Inc (New York).

Cooper, Daniel R.; Allwood, Julian M. (2012): Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life. In: *Environ. Sci. Technol.* 46 (18), S. 10334–10340. DOI: 10.1021/es301093a.

Cullen, Jonathan M.; Allwood, Julian M.; Bambach, Margarita D. (2012a): Mapping the Global Flow of Steel: From Steelmaking to End-Use Goods. In: *Environ. Sci. Technol.* 46 (24), S. 13048–13055. DOI: 10.1021/es302433p.

Cullen, Jonathan M.; Allwood, Julian M.; Bambach, Margarita D. (2012b): Mapping the Global Flow of Steel: From Steelmaking to End-Use Goods. Supporting Information. In: *Environ. Sci. Technol.* 46 (24). Online verfügbar unter http://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/es302433p/suppl_file/es302433p_si_001.pdf, zuletzt geprüft am 16.03.2015.

Daniëls, B. W.; van Dril, A.W.N. (2007): Save production: A bottom-up energy model for Dutch industry and agriculture. In: *Energy Economics* 29 (4), S. 847–867. DOI: 10.1016/j.eneco.2007.02.001.

de Vries, H.J.M. de; Blok, K.; Patel, M. K.; Weiss, M.; Joosen, S.; Visser, E. de et al. (2006): Assessment of the interaction between economic and physical growth. EPIST project. Report UCE-34. Hg. v. E.H. Lysen. Utrecht University, Utrecht Centre for Energy research (UCE) and Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP). Bilthoven (Netherlands Research Programme on Scientific Assessment and Policy Analysis for Climate Change).

Deutsche Bahn AG (2015): Umweltschutz im Überblick: Vorreiterrolle im Umweltschutz. Berlin. Online verfügbar unter http://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/oekologie/umwelt_im_ueberblick/umwelt_ueberblick_cs.html, zuletzt aktualisiert am 07.04.2015, zuletzt geprüft am 10.06.2015.

Deutsche Bundesbank (2013): Euro-Referenzkurse der Europäischen Zentralbank. Jahresdurchschnitte. Online verfügbar unter http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomi-

[sche_Zeitreihen/its_details_value_node.html?listId=www_s331_b01012_1&tsId=BBK01.WJ5637](http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomi-sche_Zeitreihen/its_details_value_node.html?listId=www_s331_b01012_1&tsId=BBK01.WJ5637), zuletzt aktualisiert am 02.01.2013 Uhr, zuletzt geprüft am 22.08.2013.

E3MLab/ICCS at National Technical University (2014): PRIMES MODEL 2013-2014. Detailed model description. E3MLab/ICCS at National Technical University. Athens, Greece. Online verfügbar unter

<http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PRIMES%20Manual/The%20PRIMES%20MODEL%202013-2014.pdf>, zuletzt geprüft am 09.01.2015.

EIA (2013a): Model Documentation Report: Macroeconomic Activity Module (MAM) of the National Energy Modeling System. U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585. Online verfügbar unter

[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/nems/documentation/macroeconomic/pdf/m065\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/nems/documentation/macroeconomic/pdf/m065(2013).pdf), zuletzt geprüft am 26.03.2014.

EIA (2013b): Model Documentation Report: Industrial Demand Module of the National Energy Modeling System. U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585. Online verfügbar unter

[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/nems/documentation/industrial/pdf/m064\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/nems/documentation/industrial/pdf/m064(2013).pdf), zuletzt geprüft am 26.03.2014.

Enerdata (2017): POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. A globally recognised, comprehensive simulation model for worldwide energy supply, demand and prices. Online verfügbar unter <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html>, zuletzt geprüft am 11.04.2017.

EUKLEMS database (2013): EU KLEMS Growth and Productivity Accounts: November 2009 Release, updated March 2011. Basic Tables. The construction of this database is financially supported by the European Commission, Research Directorate General as part of the 6th Framework Programme, Priority 8, “Policy Support and Anticipating Scientific and Technological Needs” and as part of the 7th Framework Programme, Theme 8: Socio-Economic Sciences and Humanities, Grant agreement no: 225 281. Online verfügbar unter <http://www.euklems.net/>, zuletzt geprüft am 21.08.2013/04.07.2014(Greece).

EUROFER (2015): Sector shares in total EU steel consumption in 2010. Home/About Steel/Growing with Steel. EUROFER - The European Steel Association. Brussels. Online verfügbar unter <http://www.eurofer.org/About%20Steel/Growing%20with%20Steel.fhtml>, zuletzt geprüft am 31.01.2015.

European Commission (2011a): Energy Roadmap 2050. Part 1/2. European Commission. Brussels (Commission Staff Working Paper, SEC(2011) 1565). Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/sec_2011_1565_part1.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2014.

European Commission (2011b): Energy Roadmap 2050. Part 2/2. European Commission. Brussels (Commission Staff Working Paper, SEC(2011) 1565). Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/sec_2011_1565_part2.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2014.

European Commission (2011c): Final report of the Advisory Group on the Energy Roadmap 2050: Summary record of the PRIMES Peer review Meeting. Results of the public consultation on the Energy Roadmap 2050. Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN Energy Roadmap 2050. European Commission. Brussels (Commission Staff Working Paper, Ener.a.1.dir(2011)1238714). Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/sec_2011_1569_2.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2014.

European Commission (2016a): European Commission imposes anti-dumping duties on Chinese steel products. Press release. European Commission. Brussels. Online verfügbar unter http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-3328_en.htm, zuletzt aktualisiert am 11.03.2017.

European Commission (2016b): Commission staff working document SWD(2016) 420 final, PART 8/13 Annex 2 - Summaries of sectoral case studies 2.1 Iron and steel. Accompanying the document REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Energy prices and costs in Europe {COM(2016) 769 final}. European Commission. Brussels. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/report_on_energy_prices_and_costs_in_europe_-_staff_working_document420_parts_1-13.zip, zuletzt geprüft am 30.11.2016.

Eurostat (2013): Annual detailed enterprise statistics for industry (NACE Rev. 2, B-E) [sbs_na_ind_r2]. European Commission. Online verfügbar unter http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database#, zuletzt aktualisiert am 30.10.2013, zuletzt geprüft am 31.10.2013.

Eurostat (2014): End-of-life vehicles: Reuse, recycling and recovery, Totals [env_waselvt]. European Commission. Online verfügbar unter http://Citavi4/Projects/LiteraturD2013AndreaHerbst/appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waselvt&lang=en, zuletzt aktualisiert am 25.08.2014, zuletzt geprüft am 04.09.2014.

Eurostat (2015a): Annual statistics on capacity (1 000 tonnes per year) [ste_s3b_cap]. Maximum possible production - Crude steel. European Commission. Online verfügbar unter http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do;jsessionid=CnbDKAZFs6INOWVqJ5huPMECCsUZ_dNWMFnUAMUGhxxPG_Ea4C8t!-1567953477, zuletzt aktualisiert am 03.09.14, zuletzt geprüft am 23.03.15.

Eurostat (2015b): Annual statistics on capacity (1 000 tonnes per year) [ste_s3b_cap]. Maximum possible production - Crude steel: electric. European Commission. Online verfügbar unter http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do;jsessionid=CnbDKAZFs6INOWVqJ5huPMECCsUZ_dNWMFnUAMUGhxxPG_Ea4C8t!-1567953477, zuletzt aktualisiert am 03.09.14, zuletzt geprüft am 23.03.15.

Eurostat (2015c): Annual statistics on the steel and cast iron scrap balance sheet (in tonnes) [ste_s10_scra]. Stocks on first day of year. European Commission. Online verfügbar unter http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do;jsessionid=CnbDKAZFs6INOWVqJ5huPMECCsUZ_dNWMFnUAMUGhxxPG_Ea4C8t!-1567953477, zuletzt aktualisiert am 03.09.14, zuletzt geprüft am 05.06.15.

Eurostat (2015d): Electricity prices for industrial consumers - bi-annual data (from 2007 onwards) [nrg_pc_205]. Electrical energy - Band IC : 500 MWh < Consumption < 2 000 MWh - Kilowatt-hour - Excluding taxes and levies - Euro. European Commission. Online verfügbar unter http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_205&lang=en, zuletzt aktualisiert am 01.09.15, zuletzt geprüft am 03.09.15.

Eurostat (2015e): Gas prices for industrial consumers - bi-annual data (from 2007 onwards) [nrg_pc_203]. Natural gas - Band I3 : 10 000 GJ < Consumption < 100 000 GJ - Kilowatt-hour - Excluding taxes and levies - Euro. European Commission. Online verfügbar unter http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_203&lang=en, zuletzt aktualisiert am 01.09.15, zuletzt geprüft am 03.09.15.

Eurostat (2015f): Gross value added and income by A*10 industry breakdowns [nama_10_a10]. Value added, gross: chain linked volumes (2005), million euro. European Commission. Online verfügbar unter <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>, zuletzt aktualisiert am 22.07.15, zuletzt geprüft am 29.07.15.

Eurostat (2015g): VGR Aggregate nach Industrie (bis zu NACE A*64) [nama_10_a64]. European Commission. Online verfügbar unter <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do;jsessionid=Q-6lcsESPOkRzgLKkyDVUQDJTSmeiKgwK7x9AmAbn14kYS9YUcvvg!-1659859138>, zuletzt aktualisiert am 28.05.15, zuletzt geprüft am 30.05.2015.

Fisher, Allan G.B. (1966): The clash of progress and security. Unter Mitarbeit von Augustus M. Kelley. New York: Sentry Press (Reprints of Economic Classics).

Fleiter, Tobias; Fehrenbach, Daniel; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.025.

Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang (Hg.) (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Unter Mitarbeit von Simon Hirzel, Marlene Arens, Clemens Rohde, Felix Cebulla, Rainer Elsand, Daniel Fehrenbach et al. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Flues, Florens; Rübelke, Dirk; Vögele, Stefan (2013): Energy Efficiency and Industrial Output: The Case of the Iron and Steel Industry. Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) (ZEW Discussion Paper, No. 13-101). Online verfügbar unter <http://juser.fz-juelich.de/record/141137/files/FZJ-2013-06338.pdf>, zuletzt geprüft am 23.02.2015.

Fourastié, Jean (1969/1954): Die grosse Hoffnung des zwanzigsten Jahrhunderts. 2. Auflage. Köln-Deutz: Bund-Verlag GmbH.

Fraunhofer ISI (2015): FORECAST/eLOAD. Methodology/Forecast annual energy demand. Fraunhofer Institute for. Online verfügbar unter <http://www.forecast-model.eu/forecast-en/content/methodology.php>, zuletzt geprüft am 20.01.2015.

Fraunhofer ISI; TRT Trasporti e Territorio srl (2015): ASsessment of TRAnsport Strategies (ASTRA model). Structure and POP module and MAC module. Online verfügbar unter <http://www.astra-model.eu/index.htm>, zuletzt geprüft am 28.01.2015.

Fridley, David; Zheng, Nina; Zhou, Nan; Ke, Jing; Hasanbeigi, Ali; Morrow, Bill; Price Lynn (2012): China Energy and Emissions Paths to 2030. 2nd Edition. Hg. v. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. China Energy Group, Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL-4866E).

Gerspacher, A.; Arens, M.; Eichhammer, W. (2011): Zukunftsmarkt Energieeffiziente Stahlherstellung. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. FKZ 03KSW016A und B. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fallstudie_EisenStahl.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2015.

Gielen, Dolf; Newman, John; Patel, Martin K. (2008): Reducing Industrial Energy Use and CO₂ Emissions: The Role of Materials Science. In: *MRS BULLETIN* 33 (4), S. 471–477. DOI: 10.1557/mrs2008.92.

Greene, William H. (2012): *Econometric Analysis*. Seventh Edition. Edinburgh Gate, Harlow, England: Pearson Education Limited publishing as Prentice Hall.

Greenpeace (2012): *Energy [R]evolution 2012. A sustainable world energy outlook*. Greenpeace International, EREC and GWEC (JN 330). Online verfügbar unter <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Climate-Reports/Energy-Revolution-2012/>, zuletzt geprüft am 29.06.2014.

Groenenberg, Heleen; Blok, Kornelis; van der Sluijs, Jeroen (2005): Projection of energy-intensive material production for bottom-up scenario building. In: *Ecological Economics* 53 (1), S. 75–99. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.09.010.

Handelsblatt GmbH/dpa Deutsche Presse-Agentur GmbH (2015): Stahlbranche: Zehntausende Stellen durch Überkapazität bedroht. Handelsblatt - Unternehmen - Industrie. Hg. v. Gabor Steingart Handelsblatt GmbH - ein Unternehmen der Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH & Co. KG. Düsseldorf. Online verfügbar unter <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/stahlbranche-zehntausende-stellen-durch-ueberkapazitaet-bedroht/12300100.html>, zuletzt geprüft am 14.10.2015.

Haraguchi, Nobuya; Rezonja, Gorazd (2010a): In Search of General Patterns of Manufacturing Development. United Nations Industrial Development Organization. Vienna (Research and Statistics Branch Working Paper, 02). Online verfügbar unter http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Publications/Research_and_statistics/Branch_publications/Research_and_Policy/Files/Working_Papers/2010/WP022010%20In%20search%20of%20general%20patterns%20of%20manufacturing%20development.pdf, zuletzt geprüft am 31.07.2013.

Haraguchi, Nobuya; Rezonja, Gorazd (2010b): Patterns of Manufacturing Development Revisited. United Nations Industrial Development Organization. Vienna (Research and Statistics Branch Working Paper, 22/2009). Online verfügbar unter http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Publications/RSF_DPR/WP22PatternsofManufacturingDevelopmentRevisited.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2013.

Haraguchi, Nobuya; Rezonja, Gorazd (2011): Emerging Patterns of Manufacturing Structural Change. United Nations Industrial Development Organization. Vienna (Research and Statistics Branch Working Paper, 04/2010). Online verfügbar unter http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Publications/Research_and_statistics/Branch_publications/

tions/Research_and_Policy/Files/Working_Papers/2010/WP%2004%20Emerging%20Patterns%20of%20Manufacturing%20Structural%20Change.pdf, zuletzt geprüft am 05.08.2013.

Hartbich, I.; Steiger, H. (2014): Warnsignale aus der Stahlindustrie. In: *VDI nachrichten* 2014, 10.10.2014 (41), S. 1.

Helmus, Manfred; Randel, Anne (2014): Sachstandsbericht zum STAHLRECYCLING IM BAUWESEN. Hg. v. bauforumstahl e. V. Bergische Universität Wuppertal. Wuppertal. Online verfügbar unter <http://www.bauforumstahl.de/upload/news/Sachstandsbericht.pdf> oder <http://www.bauforumstahl.de/news/sachstandsbericht-zum-stahlrecycling>, zuletzt geprüft am 19.11.2014.

Herbst, Andrea; Biere, David; Fleiter, Tobias; Jochem, Eberhard; Schade, Wolfgang; Krail, Michael; Kühn, André (2014a): Coupling of ASTRA and Forecast Industry: A case study for the basic metals industry. ESA² Short Report. Hg. v. Energy System Analysis Agency (ESA²). Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Karlsruhe.

Herbst, Andrea; Fleiter, Tobias; Jochem, Eberhard (2013): Mutually linking bottom-up energy demand models with macroeconomic models. Dealing with inter- and intra-sectoral structural change. IAEE International Conference. Fraunhofer Institute of Systems and Innovation Research (ISI). International Association for Energy Economics. Daegu, South Korea, 16.06.2013.

Herbst, Andrea; Fleiter, Tobias; Jochem, Eberhard (2014b): Modelling recycling and material efficiency trends in the European steel industry. eceee 2014 Industrial Summer Study proceedings: Retool for a competitive and sustainable industry (peer-reviewed). Papendal, Arnhem, the Netherlands. Online verfügbar unter http://proceedings.eceee.org/papers/proceedings2014/2-066-14_Herbst_PR.pdf?returnurl=http%3A%2F%2Fproceedings.eceee.org%2Fvisabstrakt.php%3Fevent%3D4%26doc%3D2-066-14, zuletzt geprüft am 16.02.2014.

Herbst, Andrea; Fleiter, Tobias; Jochem, Eberhard (2016): Einfluss von Materialstrategieverbesserungen auf die industrielle Energienachfrage. Eine Fallstudie für die deutsche Stahlindustrie. 14. Symposium Energieinnovation, 10-12.02.2016. Fraunhofer ISI. Graz/Österreich. Online verfügbar unter https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/pr/Stream_F/Session_F5/PR_Herbst.pdf, zuletzt geprüft am 18.01.2017.

Herbst, Andrea; Reitze, Felix; Toro, Felipe Andrés; Jochem, Eberhard (2012a): Bridging macroeconomic and bottom up energy models – the case of efficiency in industry. Proceedings of the ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency. Hg. v. ECEEE Industrial Summer Study. Arnhem, Netherlands.

Herbst, Andrea; Toro, Felipe; Reitze, Felix; Jochem, Eberhard (2012b): Introduction to Energy Systems Modelling. In: *Swiss Journal of Economics and Statistics* 148 (2), S. 111–135.

Hoechle, Daniel (2007): Robust standard errors for panel regressions with cross-sectional dependence. In: *Stata Journal* 7 (3), S. 281. Online verfügbar unter <http://www.stata-journal.com/article.html?article=st0128>, zuletzt geprüft am 17.05.2015.

Hourcade, Jean-Charles; Jaccard, Mark; Bataille, Chris; Gheri, Frédéric (2006): Hybrid Modelling: New Answers to Old Challenges. Introduction to the Special Issue of The Energy Journal. In: *The Energy Journal* Special Issue (2), S. 1–11.

Hourcade, Jean-Charles; Jaccard, Mark; Bataille, Chris; Gheri, Frédéric (2010): Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges. Reprint from The Energy Journal special issue Hybrid Modeling of Energy Environment Policies : 1-12. C.I.R.E.D (Author manuscript, published in "The Energy Journal 2, Special issue (2006) 1-12"). Online verfügbar unter http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/47/12/34/PDF/Hourcade_Jaccard_Bataille_Gheri_2006_Hybrid_Modeling.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2014.

IAEA (2006): Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2). User's Manual. International Atomic Energy Agency (IAEA). Vienna (Computer Manual Series, 18). Online verfügbar unter http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CMS-18_web.pdf, zuletzt geprüft am 01.05.2014.

IEA (2012): Methodology macroeconomics impact. Macroeconomic analysis using the OECD ENV-Linkages model. International Energy Agency OECD/IEA. Online verfügbar unter <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2013/Methodologymacroeconomicimpacts.pdf>, zuletzt geprüft am 29.04.2014.

IEA (2013a): World Energy Model. Documentation. 2013 Version. Hg. v. Marco Baroni. International Energy Agency OECD/IEA. Online verfügbar unter http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2013/WEM_Documentation_WEO2013.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2014.

IEA (2013b): World Energy Outlook 2013. International Energy Agency OECD/IEA. Paris Cedex, France. Online verfügbar unter http://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2013_weo-2013-en, zuletzt geprüft am 29.06.2014.

Institut Bauen und Umwelt e.V. (2010): MSH-Profil von VALLOUREC & MANNESMANN TUBES

. Kreisförmige, quadratische und rechteckige Stahlbauhohlprofile (Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025) (EPD-VMT-2010111-D). Online verfügbar unter http://bau-umwelt.de/download/CY3d3d90e6X12edc748612X72a6/EPD_VMT_2010111_D.pdf, zuletzt geprüft am 10.06.2015.

Institut Bauen und Umwelt e.V. (2013): Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche. bau-forumstahl e.V. (Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804) (EPD-BFS-20130094-IBG1-DE). Online verfügbar unter http://bau-umwelt.de/download/CY12a8bfccX144e055beb6XY47c5/EPD_BFS_20130094_IBG1_DE.pdf, zuletzt geprüft am 10.06.2015.

Institut Bauen und Umwelt e.V. (2014): Structural section steel. CELSA Group (Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804) (EPD-CEL-20130219-IBD1-EN). Online verfügbar unter http://bau-umwelt.de/download/CY3c4936c1X144f9129e42X47ae/EPD_CEL_20130219_IBD1_EN.pdf, zuletzt geprüft am 10.06.2015.

International Energy Agency (2015a): Energy Prices and Taxes: Energy End-Use Prices. Industry Electricity Total Price (USD/MWh). OECDiLibrary (IEA Online Data Services). OECD/IEA. Paris Cedex, France. Online verfügbar unter http://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/end-use-prices/energy-prices-in-us-dollars_data-00442-en?isPartOf=/content/datacollection/ene-pric-data-en, zuletzt aktualisiert am EPT(4Q2014), zuletzt geprüft am 02.03.2015.

International Energy Agency (2015b): Energy Prices and Taxes: Energy End-Use Prices. Industry Natural Gas Total Price (USD/MWh). OECDiLibrary (IEA Online Data Services). OECD/IEA. Paris Cedex, France. Online verfügbar unter http://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/end-use-prices/energy-prices-in-us-dollars_data-00442-en?isPartOf=/content/datacollection/ene-pric-data-en, zuletzt aktualisiert am EPT(4Q2014), zuletzt geprüft am 02.03.2015.

IPTS (2010): Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. POLES Manual. Version 6.1. Institute for Prospective Technological Studies; JRC European Commission. Online verfügbar unter <http://ipts.jrc.ec.europa.eu/activities/energy-and-transport/documents/POLESdescription.pdf>, zuletzt geprüft am 01.05.2014.

Jaccard, Mark (2009): Combining top down and bottom up in energy economic models. In: Joanne Evans und Lester C. Hunt (Hg.): International Handbook on the Economics of Ener-

gy. Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA: Edward Elgar, S. 311–331. Online verfügbar unter

<http://www.emrg.sfu.ca/media/publications/2009/JaccardHybridsHandbookofEnergyEcon09-2.pdf>, zuletzt geprüft am 30.04.2014.

Jaccard, Mark; Associates (2014): Policy Modelling. Sustainable Policy Modelling - CIMS. Energy and Materials Research Group, Simon Fraser University. Online verfügbar unter <http://www.emrg.sfu.ca/Our-Research/Policy-Modelling>, zuletzt geprüft am 30.04.2014.

Jaccard, Mark; Nyboer, John; Bataille, Chris; Sadownik, Bryn (2003): Modeling the Cost of Climate Policy: Distinguishing Between Alternative Cost Definitions and Long-Run Cost Dynamics. In: *The Energy Journal* 24 (1), S. 49–73.

Jochem, E.; Reitze, F. (2014): Material Efficiency and Energy Use. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09120-X.

Jochem, Eberhard (2004a): Material Use, Efficiency, and Substitution: Impact on Energy Demand. In: *Encyclopedia of Energy* 3.

Jochem, Eberhard (2004b): Steps towards a sustainable development. A White Book for R&D of energy-efficient technologies. Online verfügbar unter <http://www.novatlantia.ch/wp-content/uploads/2014/10/Weissbuch.pdf>, zuletzt geprüft am 28.02.2017.

Jochem, Eberhard; Barker, Terry; Scricciu, Serban; Schade, Wolfgang; Helfrich, Nicki; Edenhofer, Ottmar et al. (2007): Adaptation and Mitigation Strategies: Supporting European Climate Policy. Deliverable M1.1. Report of the Base Case Scenario for Europe and full description of the model system. Hg. v. Eberhard Jochem. Fraunhofer Institute of Systems and Innovation Research (ISI) (Project no. 018476-GOCE).

Jochem, Eberhard; Schade, Wolfgang; Barker, Terry; Scricciu, Serban; Helfrich, Nicki; Miima, Sivana et al. (2009): Adaptation and Mitigation Strategies Supporting European Climate Policy. Deliverable D-M1.2. Report of the Reference and 2°C Scenario for Europe. Hg. v. Eberhard Jochem und Wolfgang Schade. Fraunhofer Institute of Systems and Innovation Research (ISI) (Project no. 018476-GOCE).

Jochem, Eberhard; Schön, Michael; Angerer, Gerhard; Ball, Michael; Bradke, Harald; Celik, Birgül et al. (2004): Werkstoffeffizienz. Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. Ein Projekt für das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit Förderkennzeichen 0327313A: Fraunhofer IRB Verlag.

Kinkel, Steffen; Rieder, Bernhard; Horvat, Djerdj; Jäger, Angela (2015): Wertschöpfung lohnt. Vorteile und Notwendigkeit lokaler Wertschöpfungsketten. Analyse der Industrieposition in Baden-Württemberg, exemplarisch auch für das Zukunftsfeld Elektromobilität. Hoch-

schule Karlsruhe Technik und Wirtschaft; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.hs-karlsruhe.de/fileadmin/hska/GOEM/Baum_Hochschule/Presse/2015/Gesamtstudie_WSlohnt_final_10-12-2015.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2017.

Kitous, A.; Saveyn, B.; Gervais, S.; Wiesenthal, T.; Soria, A. (2013): Analysis of the Iran Oil Embargo. Hg. v. European Commission. European Commission Joint Research Centre Institute for prospective technological studies. Luxembourg. Online verfügbar unter <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC77983.pdf>, zuletzt geprüft am 05.05.2014.

Kitous, Alban; Criqui, Patrick; Bellevrat, Elie; Chateau, Bertrand (2010): Transformation Patterns of the Worldwide Energy System – Scenarios for the Century with the POLES Model. In: *The Energy Journal* 31 (Special Issue 1: The Economics of Low Stabilization), S. 49–82. Online verfügbar unter http://edden.upmf-grenoble.fr/IMG/pdf/AK-PC-EB-PB_transformation_energyJournal_vol31.pdf, zuletzt geprüft am 01.05.2014.

Klempert, O. (2014): "Wir sehen nur Nordamerika als langfristig kalkulierbaren Standort". Interview mit Wolfgang Eder (Voestalpine). In: *VDI nachrichten* 2014, 10.10.2014 (41), S. 2.

Krail, M.; Schade, S. (2014): ASSIST Final Report. Summary of the project approach and findings, Deliverable D8.3 of ASSIST (Assessing the social and economic impacts of past and future sustainable transport policy in Europe). Project co-funded by European Commission 7th RTD Programme. Fraunhofer-ISI. Karlsruhe, Germany. Online verfügbar unter http://www.assist-project.eu/assist-project-wAssets/docs/ASSIST_D8-3_Final_Report.pdf, zuletzt geprüft am 25.05.2015.

Krail, M.; Schade, S.; Fermi, F.; Fiorello, D.; Laparidou, K. (2014): Approach and Results of the Validation of the ASTRA-EC Model. Deliverable D5.1 of ASSIST (Assessing the social and economic impacts of past and future sustainable transport policy in Europe). Project co-funded by European Commission 7th RTD Programme. Fraunhofer-ISI. Karlsruhe, Germany. Online verfügbar unter http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fassist-project.eu%2Fassist-project-wAssets%2Fdocs%2FASSIST_D5-1_Approach_and_Results_of_the_Validation_of_the_ASTRA-EC_Model.pdf&ei=XpRcVMXcJMPBOeP3gbAE&usg=AFQjCNHspnZPO0ZE-vJRV75zce9rH6hgvA&sig2=aDXQwrnC0Ec5Rusg37fRPA&bvm=bv.79184187,d.ZWU&cad=rja, zuletzt geprüft am 07.11.2014.

Krause, Florentin (1996): The costs of mitigating carbon emissions. A review of methods and findings from European studies. In: *Energy Policy* 24 (10-11), S. 899–915. DOI: 10.1016/S0301-4215(96)80356-9.

Lemken, Thomas; Liedtke, Christa; Biengen, Katrin; Salzer, Corinna (2008): Stahl - ein Werkstoff mit Innovationspotenzial. Ergebnisse des ‚Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung‘. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal. Online verfügbar unter http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCwQFjAB&url=http%3A%2F%2Fpub.wupperinst.org%2Ffiles%2F3009%2F3009_Werkstoff_Stahl.pdf&ei=YHrfVOGUJY_OaPjagaAD&usg=AFQjCNGU2oEcVEYm7eBSkKviK-sv_RsEwg&sig2=sm_-woYNgK9RWfaR3Jbe9A&bvm=bv.85970519,d.d2s, zuletzt geprüft am 14.02.2015.

Lösch, O.; Idrissova, F.; Jochem, E.; Mai, M.; Schön, M.; Reitze, F.; Toro, F. (2015): Klimaschutz durch Energieeffizienz: Konzept zur Erhöhung der Energieeffizienz, insbesondere durch die Weiterentwicklung der Energiebesteuerung sowie flankierender Maßnahmen („Klimaschutz durch Energieeffizienz“). April 2012 bis März 2015 Endbericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES). Karlsruhe, Berlin (03KSE029). Online verfügbar unter http://www.irees.de/irees-wAssets/docs/publications/projektbericht-report/160202_IREES_Endbericht_03KSE029.pdf, zuletzt geprüft am 02.03.2017.

Löschel, Andreas (2002): Technological change in economic models of environmental policy: a survey. In: *Ecological Economics* 43 (2-3), S. 105–126. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00209-4.

Maddison, Angus (2001): The world economy: A millennial perspective. Paris: OECD Publishing (Development centre studies). Online verfügbar unter <http://fachliteratur.isi.fraunhofer.de/volltext/OECD-WorldEconomy.pdf>.

Michaelis, Peter; Jackson, Tim (2000): Material and energy flow through the UK iron and steel sector. Part 1: 1954–1994. In: *Resources, Conservation and Recycling* 29 (1-2), S. 131–156. DOI: 10.1016/S0921-3449(00)00048-3.

Milford, Rachel L.; Allwood, Julian M.; Cullen, Jonathan M. (2011): Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO₂ abatement in the steel and aluminium sectors. In: *Resources, Conservation and Recycling* 55 (12), S. 1185–1195. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.021.

Milford, Rachel L.; Pauliuk, Stefan; Allwood, Julian M.; Müller, Daniel B. (2013): The Roles of Energy and Material Efficiency in Meeting Steel Industry CO₂ Targets. In: *Environmental Science and Technology* 47 (7), S. 3455–3462. DOI: 10.1021/es3031424.

Morfeltdt, Johannes; Nijs, Wouter; Silveira, Semida (2015): The impact of climate targets on future steel production – an analysis based on a global energy system model. In: *Journal of Cleaner Production* 103, S. 469–482. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.045.

Morfeltdt, Johannes; Silveira, Semida; Nijs, Wouter (2013): Case study: How to decarbonize European steel production? A global perspective. Shaping our energy system – combining European modelling expertise. Hg. v. Energy System Analysis Agency (ESA²). Karlsruhe, Germany.

Müller, Daniel B.; Wang, Tao; Duval, Benjamin (2011a): Patterns of Iron Use in Societal Evolution. In: *Environ. Sci. Technol.* 45 (1), S. 182–188. DOI: 10.1021/es102273t.

Müller, Daniel B.; Wang, Tao; Duval, Benjamin (2011b): Patterns of Iron Use in Societal Evolution. Supporting Information. In: *Environ. Sci. Technol.* 45 (1). Online verfügbar unter http://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/es102273t/suppl_file/es102273t_si_001.pdf, zuletzt geprüft am 14.09.2014.

Müller, Daniel B.; Wang, Tao; Duval, Benjamin; Graedel, T. E. (2006): Exploring the engine of anthropogenic iron cycles. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103 (44), S. 16111–16116. DOI: 10.1073/pnas.0603375103.

Müller, Esther; Hilty, Lorenz M.; Widmer, Rolf; Schluep, Matthias; Faulstich, Martin (2014): Modeling Metal Stocks and Flows: A Review of Dynamic Material Flow Analysis Methods. In: *Environmental Science and Technology* (48), S. 2102–2113. DOI: 10.1021/es403506a.

Murphy, Rose Elise (2013): Use of Empirically-Based Models to Evaluate the Potential of Energy Efficiency and Forest Carbon Sequestration for Mitigating Climate Change. Dissertation/PhD Thesis. Simon Fraser University, British Columbia, Canada. Online verfügbar unter http://rem-main.rem.sfu.ca/theses/MurphyRose_2013_PhD.pdf, zuletzt geprüft am 30.04.2014.

National Technical University of Athens (NTUA) (o.J.a): PRIMES MODEL. Version used for the 2010 scenarios for the European Commission including new sub-models. Hg. v. E3Mlab of ICCS/NTUA. Online verfügbar unter http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PRIMES%20Manual/The_PRIMES_MODEL_2010.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2014.

National Technical University of Athens (NTUA) (o.J.b): The PRIMES Energy System Model. Summary Description. Hg. v. European Commission Joule-III Programme. Athens, Greece. Online verfügbar unter <http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PRIMES%20Manual/PRIMsd.pdf>, zuletzt geprüft am 28.04.2014.

Öko-Institut; Forschungszentrum Jülich; DIW; Fraunhofer ISI; Ziesing, H.-J. (2013): Politiksszenarien für den Klimaschutz VI - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Forschungskennzahl 3709 41 109, UBA-FB 001730. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4412.html>; <http://fachliteratur.isi.fraunhofer.de/isipubl-intern/politiksszenarien-klimaschutz-treibhausgas-2050.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2015.

Pauliuk, Stefan; Milford, Rachel L.; Müller, Daniel B.; Allwood, Julian M. (2013a): The Steel Scrap Age. In: *Environ. Sci. Technol.* (47), S. 3448–3454. DOI: 10.1021/es303149z.

Pauliuk, Stefan; Milford, Rachel L.; Müller, Daniel B.; Allwood, Julian M. (2013b): The Steel Scrap Age. Supplementary Information. In: *Environ. Sci. Technol.* (47). DOI: 10.1021/es303149z.

Pauliuk, Stefan; Wang, Tao; Müller, Daniel B. (2013c): Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. In: *Resources, Conservation and Recycling* 71, S. 22–30. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.11.008.

Pauliuk, Stefan; Wang, Tao; Müller, Daniel B. (2013d): Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. Supplementary Information. In: *Resources, Conservation and Recycling* 71.

Remus, Rainer; Aguado, Miguel A.; Roudier, Serge; Delgado Sancho, Luis (2013): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). European Commission Joint Research Centre Institute for prospective technological studies. Sevilla, Spain (Industrial Emissions Directive 2010/75/EU). Online verfügbar unter http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/IS_Adopted_03_2012.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2013.

Renda, Andrea; Pelkmans, Jaques; Egenhofer, Christian; Marcu, Andrei; Schrefler, Lorna; Luchetta, Giacomo et al. (2013): Assessment of cumulative cost impact for the steel industry. Final Report. Hg. v. European Commission. Centre for European Policy Studies; Economisti Associati. Brussels. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/metals-minerals/files/steel-cum-cost-imp_en.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2013.

Sansom, M.; Meijer, J. (2002): Life-cycle assessment (LCA) for steel construction. Final report. European Commission. Luxembourg (technical steel research: Steel structures). Online verfügbar unter http://bookshop.europa.eu/de/life-cycle-assessment-lca-for-steel-construction-pbKINA20570/downloads/KI-NA-20-570-EN-S/KINA20570ENS_002.pdf?FileName=KINA20570ENS_002.pdf&SKU=KINA20570ENS_PDF&CatalogueNumber=KI-NA-20-570-EN-S, zuletzt geprüft am 10.06.2015.

Schade, Wolfgang; Jochem, Eberhard; Barker, Terry; Catenazzi, Giacomo; Eichhammer, Wolfgang; Fleiter, Tobias et al. (2009): Adaptation and Mitigation Strategies: Supporting European Climate Policy. 2-degree scenario for Europe – policies and impacts. Deliverable D3 (M1.3) of work package M1. Hg. v. Wolfgang Schade und Eberhard Jochem. Fraunhofer Institute Systems and Innovation Research (ISI); European Commission 6th RTD Programme. Karlsruhe, Germany.

Schäfer, Andreas (2005): Structural change in energy use. In: *Energy Policy* 33 (4), S. 429–437. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.09.002.

Stahlpreise.eu (2014): Stahlpreise 18.06.14. Box auf rechter Bildschirmhälfte. Research Concepts LTD. London, England. Online verfügbar unter <http://www.stahlpreise.eu/>, zuletzt geprüft am 20.06.2014.

StataCorp. (2009): Stata Statistical Software. Release 11. Version. College Station, TX: StataCorp LP.

StataCorp. (2015a): Base Reference Manual. hausman — Hausman specification test: Stata Press. Online verfügbar unter <http://www.stata.com/manuals14/rhausman.pdf>, zuletzt geprüft am 06.01.2017.

StataCorp. (2015b): Longitudinal-Data/Panel-Data Reference Manual. xtunitroot — Panel-data unit-root tests: Stata Press. Online verfügbar unter <http://www.stata.com/manuals14/xtxtunitroot.pdf>, zuletzt geprüft am 06.12.2016.

StataCorp. (2016a): Stata 14 help for hausman. hausman -- Hausman specification test. Hg. v. StataCorp. 1996–2016 StataCorp LP. USA. Online verfügbar unter <http://www.stata.com/help.cgi?hausman>, zuletzt geprüft am 22.04.2016.

StataCorp. (2016b): Stata 14 help for robust. robust -- Robust variance estimates. Hg. v. StataCorp. 1996–2016 StataCorp LP. USA. Online verfügbar unter <http://www.stata.com/help.cgi?robust>, zuletzt geprüft am 22.04.2016.

StataCorp. (2016c): Stata 14 help for xtglsl. xtglsl -- Fit panel-data models by using GLS. Hg. v. StataCorp. 1996–2016 StataCorp LP. USA. Online verfügbar unter <http://www.stata.com/help.cgi?xtglsl>, zuletzt geprüft am 22.04.2016.

StataCorp. (2016d): Stata 14 help for xtpcse. xtpcse -- Linear regression with panel-corrected standard errors. Hg. v. StataCorp. 1996–2016 StataCorp LP. USA. Online verfügbar unter <http://www.stata.com/help.cgi?xtpcse>, zuletzt geprüft am 22.04.2016.

StataCorp. (2016e): Stata 14 help for xtunitroot. xtunitroot -- Panel-data unit-root tests. Hg. v. StataCorp. 1996–2016 StataCorp LP. USA. Online verfügbar unter <http://www.stata.com/help.cgi?xtunitroot>, zuletzt geprüft am 22.04.2016.

Steelonthenet.com (2015): Met Coke Prices - Europe 2010-2015. Steelmaking input costs - blast furnace raw materials. Steelonthenet.com. Online verfügbar unter <http://www.steelonthenet.com/files/blast-furnace-coke.html>, zuletzt aktualisiert am 20.08.2015, zuletzt geprüft am 28.08.2015.

The World Bank Group (2012a): Data by country: Austria: GDP, GDP per capita. World Development Indicators; World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country/austria>, zuletzt geprüft am 10.10.2012.

The World Bank Group (2012b): Data by country: Austria: Population (total). World Development Indicators; (1) United Nations Population Division. World Population Prospects, (2) United Nations Statistical Division. Population and Vital Statistics Reprot (various years), (3) Census reports and other statistical publications from national statistical offices, (4) Eurostat: Demographic Statistics, (5) Secretariat of the Pacific Community: Statistics and Demography Programme, and (6) U.S. Census Bureau: International Database. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country/austria>, zuletzt geprüft am 10.10.2012.

The World Bank Group (2012c): Data by country: Austria: Population density (people per sq. km of land area). World Development Indicators; Food and Agriculture Organization and World Bank population estimates. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country/austria>, zuletzt geprüft am 10.10.2012.

The World Bank Group (2012d): Data by country: Belgium, Czech Republic, Germany, Denmark, Estonia, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Lithuania, Luxembourg, Latvia, Malta: GDP, GDP per capita, Manufacturing value added. World Development Indicators; World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 12.10.2012.

The World Bank Group (2012e): Data by country: Belgium, Czech Republic, Germany, Denmark, Estonia, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Lithuania, Luxembourg, Latvia, Malta: Population (total). World Development Indicators; (1) United Nations Population Division. World Population Prospects, (2) United Nations Statistical Division. Population and Vital Statistics Reprot (various years), (3) Census reports and other statistical publications from national statistical offices, (4) Eurostat: Demographic Statistics, (5) Secretariat of the Pacific Community: Statistics and Demography Programme, and (6) U.S. Census Bureau: International Database. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 12.10.2012.

The World Bank Group (2012f): Data by country: Belgium, Czech Republic, Germany, Denmark, Estonia, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Lithuania, Luxembourg, Latvia, Malta: Population density (people per sq. km of land area). World Development Indicators; Food and Agriculture Organization and World Bank population estimates. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 12.10.2012.

The World Bank Group (2012g): Data by country: Ireland: GDP, GDP per capita. World Development Indicators; World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 18.10.2012.

The World Bank Group (2012h): Data by country: Ireland: Population (total). World Development Indicators; (1) United Nations Population Division. World Population Prospects, (2) United Nations Statistical Division. Population and Vital Statistics Reprot (various years), (3) Census reports and other statistical publications from national statistical offices, (4) Eurostat: Demographic Statistics, (5) Secretariat of the Pacific Community: Statistics and Demography Programme, and (6) U.S. Census Bureau: International Database. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 18.10.2012.

The World Bank Group (2012i): Data by country: Ireland: Population density (people per sq. km of land area). World Development Indicators; Food and Agriculture Organization and World Bank population estimates. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 18.10.2012.

The World Bank Group (2012j): Data by country: Spain, Great Britain, Netherlands, Romania, Slovakia, Slovenia, Sweden, Poland, Portugal: GDP, GDP per capita. World Development Indicators; World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 16.10.2012.

The World Bank Group (2012k): Data by country: Spain, Great Britain, Netherlands, Romania, Slovakia, Slovenia, Sweden, Poland, Portugal: Population (total). World Development Indicators; (1) United Nations Population Division. World Population Prospects, (2) United Nations Statistical Division. Population and Vital Statistics Reprot (various years), (3) Census reports and other statistical publications from national statistical offices, (4) Eurostat: Demographic Statistics, (5) Secretariat of the Pacific Community: Statistics and Demography Programme, and (6) U.S. Census Bureau: International Database. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 16.10.2012.

The World Bank Group (2012l): Data by country: Spain, Great Britain, Netherlands, Romania, Slovakia, Slovenia, Sweden, Poland, Portugal: Population density (people per sq. km of land area). World Development Indicators; Food and Agriculture Organization and World Bank population estimates. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 16.10.2012.

The World Bank Group (2014a): Data by country: Cyprus, Bulgaria, Latvia: GDP per capita, GDP. World Development Indicators; World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 04.07.2014.

The World Bank Group (2014b): Data by country: Cyprus, Bulgaria, Latvia: Population (total). World Development Indicators; (1) United Nations Population Division. World Population Prospects, (2) United Nations Statistical Division. Population and Vital Statistics Report (various years), (3) Census reports and other statistical publications from national statistical offices, (4) Eurostat: Demographic Statistics, (5) Secretariat of the Pacific Community: Statistics and Demography Programme, and (6) U.S. Census Bureau: International Database. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 04.07.2014.

The World Bank Group (2014c): Data by country: Cyprus, Bulgaria, Latvia: Population density (people per sq. km of land area). World Development Indicators; Food and Agriculture Organization and World Bank population estimates. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country>, zuletzt geprüft am 04.07.2014.

The World Bank Group (2014d): Data by country: Germany and China: GDP per capita. World Development Indicators; World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://data.worldbank.org/country/germany>, <http://data.worldbank.org/country/china>, zuletzt geprüft am 21.06.2014.

The World Bank Group (2015a): Global Economic Monitor (GEM) Commodities. Coal, Australia, \$/mt, real 2010\$ (World). World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://databank.worldbank.org/data/views/variableselection/selectvariables.aspx?source=Global-Economic-Monitor-%28GEM%29-Commodities#>, zuletzt aktualisiert am 07/31/2014, zuletzt geprüft am 30.03.2015.

The World Bank Group (2015b): Global Economic Monitor (GEM) Commodities. Iron ore, \$/dmtu, real 2010\$ (World). World DataBank. The World Bank Group. Online verfügbar unter

<http://databank.worldbank.org/data/views/variableselection/selectvariables.aspx?source=Global-Economic-Monitor-%28GEM%29-Commodities>, zuletzt aktualisiert am 07/31/2014, zuletzt geprüft am 23.05.2015.

The World Bank Group (2015c): Global Economic Monitor (GEM) Commodities. Steel hr coilsheet, \$/mt, real 2005\$; Steel wire rod, \$/mt, real 2005\$; Steel, rebar, \$/mt, real 2005\$; Steel cr coilsheet, \$/mt, real 2005\$. World DataBank. The World Bank Group, zuletzt aktualisiert am 31.07.2014, zuletzt geprüft am 27.04.2015.

Toro, Felipe; Herbst, Andrea; Reitze, Felix; Jochem, Eberhard (2015): Electricity Demand modelling and projections in Europe combining the advantages of macro-economic and technologyoriented models by hard links. Workshop on International Electricity Modelling, January 15th 2015. Hg. v. IREES GmbH. EIA, U.S. Dept. of Energy. Washington. Online verfügbar unter http://www.eia.gov/electricity/workshop/pdf/SessionD1_Toro.pdf, zuletzt geprüft am 18.01.2017.

Torres-Reyna, Oscar (2013): Panel Data Analysis. Fixed & Random Effects (using Stata 10.x) (ver. 4.1). Princeton University (Data analysis notes: links and general guidelins). Online verfügbar unter <http://www.princeton.edu/~otorres/Stata/statnotes>; <http://dss.princeton.edu/training/>, zuletzt geprüft am 24.01.2013.

U.S. Bureau of Labour Statistics (2015): Databases, Tables & Calculators by Subject. CPI Inflation Calculator. United States Department of Labour. Washington DC. Online verfügbar unter http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm, zuletzt geprüft am 01.03.2015.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 - Hintergrundpapier. Unter Mitarbeit von Katja Purr u.a. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Hintergrundpapier). Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050>, zuletzt geprüft am 27.12.2016.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2014): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2012. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Climate Change | 24/2014). Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention>, zuletzt geprüft am 27.12.2016.

United Nations (2013): National Accounts Main Aggregates Database. GDP/breakdown at constant 2005 prices in US Dollars (all countries and regions). United Nations Statistics Division. New York. Online verfügbar unter <http://unstats.un.org/unsd/snaama/dnllist.asp>, zuletzt aktualisiert am Latest Data Upload: December 2012, zuletzt geprüft am 18.03.2013.

United Nations (2014a): UN Comtrade Database: 16 (all subcategories 4-digit), 69 (all subcategories 4-digit), 4 (all subcategories 4-digit), 48 (all subcategories 4-digit), 7404 bis 7414, 7603 bis 7614, 7003 bis 7005, 7208 bis 7213, 7001, 7002, 7006, 7007, 7008, 7009, 7011, 7012, 7013, 7014, 7015, 7016, 7017, 7018, 7020 - Germany (HS 1992). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/db/>, zuletzt geprüft am 18.05.2014.

United Nations (2014b): UN Comtrade Database: 1905, 2203, 7010, 7019, TOTAL, 6901-Germany (HS 1992). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/db/>, zuletzt geprüft am 17.05.2014.

United Nations (2014c): UN Comtrade Database: 252010, 2523 - Germany (HS 1992). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/db/>, zuletzt geprüft am 16.05.2014.

United Nations (2014d): UN Comtrade Database: 7203, 39 (all subcategories 4-digit), 40 (all subcategories 4-digit), 290511 - Germany (HS 1992). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/db/>, zuletzt geprüft am 19.06.2014.

United Nations (2014e): UN Comtrade Database: 7901, 170199, 270400, 7403, 280440, 2808, 281511, 1108, 4702, 7601, 2814, 252210, 2803, 280110, 4701, 252310 - Germany (HS 1992). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/db/>, zuletzt geprüft am 15.05.2014.

United Nations (2014f): UN Comtrade Database: 7903 bis 7906 - Germany (HS 1992). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/db/>, zuletzt geprüft am 18.02.2014.

United Nations (2015a): Energy Statistics Database. Coke oven coke - production. United Nations Statistics Division. New York. Online verfügbar unter <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3AOK>, zuletzt aktualisiert am 10.04.2015, zuletzt geprüft am 12.05.2015.

United Nations (2015b): Flexible GHG Data queries. Sinter (2.C.1.3.) Annual Activity Data in t. United Nations Framework Convention on Climate Change. Online verfügbar unter <http://unfccc.int/di/FlexibleQueries/Event.do?event=go>, zuletzt geprüft am 12.05.2015.

United Nations (2015c): UN Comtrade Database: All Commodities (SITC2: TOTAL). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/data/>, zuletzt geprüft am 02.03.2015/03.03.2015.

United Nations (2015d): UN Comtrade Database: Iron and steel (SITC2: 67). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/data/>, zuletzt geprüft am 02.03.2015/03.03.2015.

United Nations (2015e): UN Comtrade Database: Waste and scrap metal of iron or steel (SITC2: 282). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/data/>, zuletzt geprüft am 02.03.2015/03.03.2015.

United Nations (2016): UN Comtrade Database: 290121, 320610 - Germany (HS 1992). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division Trade, Statistics. New York. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/data/>, zuletzt geprüft am 11.03.2016.

VDI-Richtlinie 3423, Januar 2002: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung.

Vermeij, Jeroen (2015): Sector shares in steel demand per country for the year 2010 (EUROFER). Brussels, 11.02.2015. Email an Andrea Herbst. PDF.

Volkers, Cees (o.J.): National Energy Outlook Modelling System. ECN. Petten, The Netherlands. Online verfügbar unter <http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDYQFjAA&url=ftp%3A%2F%2Fftp.ecn.nl%2Fpub%2Fwww%2Flibrary%2Freport%2F2013%2Ff13046.pdf&ei=1BViU7f1HeLnywOu44CYDw&usg=AFQjCNGzeEONSUM1GxQgHykeB16Kf8jm5w&sig2=HwgXXN6567w-YLN7l9cRqQ&bvm=bv.65636070,d.bGQ&cad=rja>, zuletzt aktualisiert am 01.05.2014.

Wirtschaftsvereinigung Stahl & Stahlinstitut VDEh (2014): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2014/2015. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH.

World Steel Association (mehrere Ausgaben): Steel Statistical Yearbook. various issues. available from 1978 to 2014. Hg. v. World Steel Association (worldsteel). worldsteel Committee on Economic Studies. Brussels. Online verfügbar unter <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/yearbook-archive.html>, zuletzt geprüft am 14.03.2015.

World Steel Association (2012): Indirect trade in steel. Definitions, methodology and applications. A working paper issued by the World Steel Association (worldsteel). Brussels (April 2012), April 2012. Online verfügbar unter <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/working-papers/Indirect-trade/document/Indirect%20trade.pdf>, zuletzt geprüft am 13.01.2013.

World Steel Association (2013): Steel Statistical Yearbook. Hg. v. World Steel Association (worldsteel). worldsteel Committee on Economic Studies. Brussels. Online verfügbar unter <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/yearbook-archive.html>, zuletzt geprüft am 14.03.2015.

World Steel Association (2014): Steel Statistical Yearbook. Hg. v. World Steel Association (worldsteel). worldsteel Committee on Economic Studies. Brussels. Online verfügbar unter <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/yearbook-archive.html>, zuletzt geprüft am 14.03.2015.

worldsteel (2009): The three Rs of sustainable steel. Fact sheet. Online verfügbar unter <https://www.steel.org/~media/Files/SMDI/Sustainability/3rs.pdf?la=en>, zuletzt geprüft am 10.06.2015.

worldsteel (2012): Sustainable steel: At the core of a green economy. Hg. v. World Steel Association. World Steel Association (worldsteel). Brussels. Online verfügbar unter <http://www.worldsteel.org/publications/bookshop/product-details.~Sustainable-steel--At-the-core-of-a-green-economy~PRODUCT~sustainability2012~.html>, zuletzt geprüft am 02.09.2014.

worldsteel (2013): Steel Solutions in the Green Economy: FutureSteelVehicle. Hg. v. World Steel Association (worldsteel). World Steel Association (worldsteel). Brussels. Online verfügbar unter <http://www.worldsteel.org/publications/bookshop/product-details.~Steel-Solutions-in-the-Green-Economy--FutureSteelVehicle~PRODUCT~SteelSolutions2~.html>, zuletzt geprüft am 02.09.2014.

worldsteel (2014): World steel in figures in 2014. Hg. v. World Steel Association (worldsteel). Brussels. Online verfügbar unter <https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/World-Steel-in-Figures-2014/document/World%20Steel%20in%20Figures%202014%20Final.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2016.

Worrell, Ernst; Ramesohl, Stephan; Boyd, Gale (2004): Advances in Energy Forecasting Models Based on Engineering Economics. In: *Annu. Rev. Environ. Resourc.* 29 (1), S. 345–381. DOI: 10.1146/annurev.energy.29.062403.102042.

Xylia, Maria; Silveira, Semida; Kuder, Ralf; Brunke, Jean-Christian; Blesl, Markus (2014): Low-CO₂ steel production: European perspective on the steel market and the role of scrap. Shaping our energy system – combining European modelling expertise. Hg. v. Energy System Analysis Agency (ESA²). Karlsruhe, Germany.

Zhang, ZhongXiang; Folmer, Henk (1998): Economic modelling approaches to cost estimates for the control of carbon dioxide emissions. In: *Energy Economics* 20 (1), S. 101–120. DOI: 10.1016/S0140-9883(97)00019-4.

