

Ein Ansatz zur Bewertung klimapolitischer Instrumente am Beispiel der Metallerzeugung und -verarbeitung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
DISSERTATION
von
Dipl.-Wi.-Ing. Patrick Breun

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Februar 2016
Referent: Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann
Korreferent: Prof. Dr. rer. pol. Magnus Fröhling

Vorwort

Die vorliegende Arbeit untersucht die Auswirkungen klimapolitischer Instrumente auf die Metallerzeugung in Deutschland und greift damit ein aktuelles, in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft kontrovers diskutiertes Thema auf. Sie entstand zwischen 2010 und 2016 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) sowie am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung (DFIU) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Den Anstoß dazu lieferte das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt DECARBONISE.

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Frank Schultmann sowie meinem Korreferenten Herrn Prof. Dr. Magnus Fröhling für die Betreuung meiner Arbeit, die stetige fachliche sowie persönliche Förderung und das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner Zeit am Lehrstuhl. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Orestis Terzidis sowie Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Waldmann für die Teilnahme am Prüfungskomitee und die - zwar fordernde - aber stets angenehme Prüfungsatmosphäre. Darüber hinaus gilt mein Dank den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern meiner Forschungsgruppe „Planung und Bewertung industrieller Wertschöpfungsketten“ für die stets angenehme und erfolgreiche Zusammenarbeit. Insbesondere Sophia und Konrad haben mich durch zahlreiche Diskussionen und konstruktive Anregungen auf den richtigen Pfad gebracht.

Nicht zuletzt geht ein ganz besonderer Dank an meine Partnerin Lene sowie an meine Eltern und Freunde für die fortwährende moralische Unterstützung, vor allem in der Schlussphase der Arbeit.

Karlsruhe, Februar 2016

Patrick Breun

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung und Aufbau	4
2. Rahmenbedingungen und Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente	7
2.1. Bedeutung des Klimawandels und Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland	7
2.2. Klimapolitische Instrumente	15
2.2.1. Wirkungsweisen klimapolitischer Instrumente	15
2.2.2. Entwicklung der Klimapolitik	18
2.2.3. Der Emissionszertifikatehandel	21
2.2.4. Energie- und Stromsteuern	25
2.2.5. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz	28
2.2.6. Weitere klimapolitische Instrumente	31
2.3. Metallerzeugung in Deutschland	34
2.3.1. Die Eisen- und Stahlindustrie	38
2.3.1.1. Eisen- und Stahlproduktion über die Hochofenroute	39
2.3.1.2. Stahlproduktion über die Elektrostahlroute	41
2.3.1.3. Treibhausgasemissionen der Eisen- und Stahlproduktion	42
2.3.1.4. Wirtschaftlichkeit der deutschen Eisen- und Stahlindustrie	44
2.3.2. Die Aluminiumindustrie	46
2.3.2.1. Produktion von Primäraluminium	47
2.3.2.2. Produktion von Sekundäraluminium	48
2.3.2.3. Treibhausgasemissionen der Aluminiumproduktion	49

2.3.2.4.	Wirtschaftlichkeit der deutschen Aluminiumindustrie	51
2.4.	Ableitung von Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente	52
3.	Ansätze zur Bewertung klimapolitischer Instrumente	55
3.1.	Integrated Assessment Modelle	55
3.1.1.	Der Begriff Integrated Assessment Modell	56
3.1.2.	Überblick über existierende Integrated Assessment Modelle	58
3.1.3.	Beschreibung ausgewählter zentraler Integrated Assessment Modelle	65
3.2.	Makroökonomische Input-Output-Modelle	79
3.2.1.	Abgrenzung von Input-Output-Modellen zu anderen vergleichbaren Ansätzen	79
3.2.2.	Defizite existierender Input-Output-Modelle	81
3.3.	Agenten- und aktorsbasierte Modellierung	84
3.4.	Modelle zur Abbildung stoffstrombasierter Produktionsprozesse	86
3.5.	Überblick über den zu entwickelnden Modellierungsansatz	92
3.5.1.	Überblick über das Input-Output-Teilmodell (top-down)	95
3.5.2.	Überblick über das aktorsbasierte Teilmodell (bottom-up)	98
3.5.3.	Wechselwirkungen zwischen beiden Teilmodellen (hybrides Modell)	101
4.	Entwicklung des makroökonomischen Teilmodells	103
4.1.	Grundlagen der Input-Output-Rechnung	103
4.1.1.	Mathematische Herleitung der Zusammenhänge einer Input-Output-Tabelle	104
4.1.2.	Mengen- und Preismodell	108
4.2.	Erweiterungen des Grundmodells	112
4.2.1.	Dynamisierung des Input-Output-Modells	112
4.2.1.1.	Endogenisierung des Input-Output-Modells	115
4.2.1.2.	Abbildung der klimapolitischen Instrumente im Input-Output-Modell	119

4.2.1.3.	Ableitung der aktualisierten Input-Output-Tabelle	126
4.2.2.	Umweltökonomische Erweiterung des Input-Output-Modells	128
4.2.3.	Analysen auf Basis des erweiterten Input-Output-Modells	140
4.3.	Zusammenfassung und kritische Würdigung des makroökonomischen Teilmodells	145
5.	Entwicklung des technisch-betriebswirtschaftlichen Teilmodells der Metallerzeugung	147
5.1.	Modellierung der Produktionsprozesse	148
5.1.1.	Erstellung der Technologiematrix und Modellierung werksinterner Stoff- und Energieflüsse	148
5.1.2.	Implementierung energieeffizienzsteigernder Technologien	164
5.2.	Modellierung der Investitionsentscheidung	170
5.2.1.	Berechnung der Investitionen	170
5.2.2.	Berechnung der Gesamtkosten	172
5.2.2.1.	Berechnung der variablen Herstellkosten	172
5.2.2.2.	Berechnung der Fixkosten	176
5.2.2.3.	Berechnung der Overhead-Kosten	177
5.2.2.4.	Berechnung der Allgemeinkosten	178
5.2.2.5.	Berechnung der klimabezogenen Ausgaben	179
5.2.2.6.	Berechnung der Erlöse	186
5.2.3.	Durchführung der Investitionsentscheidung	187
5.3.	Schnittstellen zum makroökonomischen Teilmodell	190
5.3.1.	Berücksichtigung der Technologiediffusion in den Koeffizienten des makroökonomischen Teilmodells	192
5.3.2.	Ableitung der indirekten Emissionen eines Werkes	195
5.3.3.	Aufteilung der nachgefragten Mengen auf die einzelnen Werke	202
5.4.	Zusammenfassung und kritische Würdigung des technisch-betriebswirtschaftlichen Teilmodells	206

6. Datenbasis beider Teilmodelle	209
6.1. Datenbasis des makroökonomischen Teilmodells	209
6.1.1. Ableitung der verwendeten Input-Output-Tabellen	210
6.1.1.1. Die monetäre Input-Output-Tabelle . . .	210
6.1.1.2. Die Energieträgermatrix	212
6.1.1.3. Die Kohlenstoff-Input-Output-Tabelle . .	213
6.1.2. Ableitung weiterer makroökonomischer Daten . . .	217
6.2. Datenbasis des technisch-betriebswirtschaftlichen Teilmo- dells der Metallerzeugung	221
6.2.1. Ableitung der anlagenspezifischen Koeffizienten durch ein nichtlineares Optimierungsmodell	222
6.2.2. Technische und wirtschaftliche Daten zu den energieeffizienzsteigernden Technologien	237
6.2.2.1. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz am Hochofen	238
6.2.2.2. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz an der Sinteranlage	242
6.2.2.3. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz an der Kokerei	244
6.2.2.4. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz am Konverter	246
6.2.2.5. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz am Elektrolichtbogenofen	247
6.2.2.6. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz im Walzwerk	249
6.2.2.7. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz in der Anodenfabrik	251
6.2.2.8. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz bei der Aluminiumoxid- produktion	252
6.2.2.9. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz bei der Aluminiumelektrolyse . .	253
6.2.2.10. Technologien zur Steigerung der Energie- effizienz in Refinern und Remeltern . . .	255
6.2.2.11. Investitionen der betrachteten Tech- nologien	256
6.2.3. Ableitung weiterer technisch-betriebswirtschaftlicher Daten	260

7. Anwendung des entwickelten Modells auf die Rahmenbedingungen der deutschen (Metall-) Industrie	265
7.1. Analyse der entwickelten Datenbasis	265
7.2. Untersuchte Szenarios	274
7.3. Ergebnisse aus den untersuchten Szenarios	282
7.3.1. Analyse des Basisszenarios und der Treibhausgasreduktionspotenziale	285
7.3.1.1. Modellvalidierung	285
7.3.1.2. Analyse der makroökonomischen Entwicklungen	287
7.3.1.3. Ableitung der Treibhausgasreduktionspotenziale	294
7.3.2. Analyse der klimapolitischen Zielerreichung	306
7.3.3. Analyse der Auswirkungen klimapolitischer Instrumente	313
8. Zusammenfassung	333
A. Anhang	341
A.1. In der Modellierung verwendete Indizes, Parameter und Variablen	341
A.2. Im makroökonomischen Teilmodell berücksichtigte Sektoren	365
A.3. Im technisch-betriebswirtschaftlichen Teilmodell berücksichtigte Stoffe	372
Literaturverzeichnis	375

Abbildungsverzeichnis

2.1.	In Deutschland emittierte direkt wirkende Treibhausgase sowie europäische und deutsche Minderungsziele	10
2.2.	Aufteilung der 2011 in Deutschland emittierten Treibhausgase auf die Sektoren	12
2.3.	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern und Endenergieverbrauch nach Sektoren in den Jahren 1990 und 2012	13
2.4.	Vergleich der durchschnittlich zu zahlenden EEG-Umlagen für begünstigte Unternehmen nach EEG 2009, EEG 2012 und EEG 2014	29
2.5.	Metallproduktion in Deutschland nach Menge und Wert .	35
2.6.	Importe und Exporte von Erzen und Metallen inkl. Halbzeugen in Deutschland 2012	36
2.7.	Verteilung der CO ₂ -Emissionen auf die deutschen Stahl- und Aluminiumwerke	38
2.8.	Stoff- und Energieflüsse zwischen den Anlagen eines integrierten Hüttenwerks	40
2.9.	Treibhauspotenzial der Walzstahlproduktion inklusive aller Vorketten in einem Bezugszeitraum von 100 Jahren	43
2.10.	Entwicklung des Verbraucherpreisindex sowie ausgewählter Erzeugerpreisindizes und Einfuhrpreisindizes . .	45
2.11.	Treibhauspotenzial der Aluminiumproduktion inklusive aller Vorketten in einem Bezugszeitraum von 100 Jahren .	49
3.1.	Qualitative Einordnung ausgewählter Integrated Assessment Modelle mit Fokus auf dem sozio-ökonomischen Teilsystem	78
3.2.	Überblick über die Struktur des zu entwickelnden Modells	96

4.1.	Überblick über die Struktur des IO-Teilmodells mit Fokus auf der Simulation wirtschaftlicher Entwicklungen	113
4.2.	Klassifizierung der Sektoren und mögliche anthropogene Kohlenstoffflüsse zwischen diesen	132
4.3.	Überblick über die Struktur der umweltökonomischen Erweiterung sowie der Wechselwirkungen mit den wirtschaftlichen Entwicklungen	133
5.1.	Überblick über die Struktur des aktorsbasierten Teilmodells	149
5.2.	Im aktorsbasierten Teilmodell betrachtete Verfahrensrouten mit den jeweiligen Zwischenprodukten	151
5.3.	Schrittweise Allokation des im Hochofen eingesetzten Kokes und Sinters zu intern produziertem Koks/Sinter und extern bezogenem Koks/Sinter für ein integriertes Hüttenwerk	158
6.1.	Auf die Bruttowertschöpfung bezogene Abschreibungen aller Wirtschaftszweige und Endenergieverbrauch der Industrie je 1.000 Euro Bruttowertschöpfung	219
6.2.	Technische Ober- und Untergrenzen des Brennstoffeinsatzes für verschiedene Walzwerke der deutschen Eisen- und Stahlindustrie	228
6.3.	Regressionsanalyse der Leistung einer installierten GET bezogen auf den Druck an der Gicht und die Auslegekapazität verschiedener Hochöfen	241
7.1.	Durch das NLP ermittelte kohlenstoffhaltige Flüsse zwischen den Anlagen eines integrierten Hüttenwerks zur Produktion von einer Tonne Rohstahl, dargestellt als Sankey-Diagramm	266
7.2.	Durch das NLP ermittelte kohlenstoffhaltige Flüsse zwischen den Anlagen eines Aluminiumwerks zur Produktion von einer Tonne Primäraluminium, dargestellt als Sankey-Diagramm	268
7.3.	Durch das NLP ermittelte (direkte) CO ₂ -Emissionen aller modellierten Anlagen im Jahr 2007 ergänzt um die berichteten PFC-Emissionen der PRTR-Datenbank	269

7.4. Durch das NLP ermittelte (direkte und normierte) CO ₂ -Emissionen aller deutschen integrierten Hüttenwerke im Jahr 2007 und Vergleich mit den Durchschnittswerten der ecoinvent-Datenbank	271
7.5. Durch das NLP ermittelte (direkte und normierte) CO ₂ -Emissionen aller deutschen primären Aluminiumwerke im Jahr 2007 ergänzt um die berichteten PFC-Emissionen der PRTR-Datenbank und Vergleich mit den Durchschnittswerten der ecoinvent-Datenbank	272
7.6. Durch das NLP ermittelte (direkte und normierte) CO ₂ -Emissionen aller deutschen Elektrolichtbogenöfen im Jahr 2007	273
7.7. Ausgewählte makroökonomische Entwicklungen im Szenario <i>BAU</i>	281
7.8. Vergleich der tatsächlichen Treibhausgasemissionen Deutschlands mit den im Szenario <i>BAU</i> simulierten . . .	286
7.9. Vergleich der tatsächlichen Treibhausgasemissionen der Metallerzeugung mit den im Szenario <i>BAU</i> simulierten . .	287
7.10. Entwicklungen ausgewählter makroökonomischer Parameter im Szenario <i>BAU</i>	288
7.11. Über alle Sektoren aggregierte Kohlenstoffflüsse im Szenario <i>BAU</i>	290
7.12. Kosten, Erlöse und Emissionseinsparungen aller Werke im Szenario <i>BAU</i>	295
7.13. Getätigte Investitionen bei unterschiedlichen Verhaltensmustern im Szenario <i>BAU</i>	298
7.14. Kapitalwerte der Technologien sowie deren direkt induzierte Emissionsminderung im Szenario <i>BAU</i>	300
7.15. Kapitalwerte der Technologien sowie deren direkt und indirekt induzierte Emissionsminderung im Szenario <i>BAU</i>	302
7.16. Vergleich unterschiedlicher Verhaltensmuster bei der Investitionsentscheidung hinsichtlich des Gewinns und der Emissionseinsparungen im Szenario <i>BAU</i>	303
7.17. Treibhausgasemissionen im Szenario <i>BAU</i> sowie in den Extremszenarios, verglichen mit den klimapolitischen Zielen Deutschlands	308
7.18. Entwicklung der Treibhausgasemissionen bei Variation der Exporte in allen Sektoren	309

7.19. Entwicklung der Treibhausgasemissionen bei Variation der Energieeffizienz in allen Sektoren	310
7.20. Entwicklung der Umweltentnahmen und Bestandszunahmen an Kohlenstoff in der Szenariokombination	311
7.21. Entwicklung der Treibhausgasemissionen bei Kombination der Szenarios und bei einer Reduktion der Treibhausgase CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC sowie SF ₆ um 94%.	313
7.22. Kosten, Erlöse und Emissionseinsparungen aller Werke bei Kombination der Szenarios	315
7.23. Entwicklung des Gewinns aggregiert über alle Werke bei Variation der Entlastungstatbestände klimapolitischer Instrumente	316
7.24. Getätigte Investitionen bei Kombination der Szenarios . .	317
7.25. Entwicklung der Treibhausgasemissionsminderungen aller Werke bei Variation des Zertifikatspreises	319
7.26. Bis zum Jahr 2030 getätigte kumulierte Investitionen bei verschiedenen Zertifikatspreisen	320
7.27. Durch die Implementierung von BVT generierte Emissionsminderungen im Szenario <i>CO₂-PR₅₀₀</i>	321
7.28. Entwicklung des Gewinns im Jahre 2030 aggregiert über alle Werke bei Variation des Zertifikatspreises und der Zuteilungsregeln	322
7.29. Gewinn und Emissionsminderungen der Verfahrensrouten Primärstahl-, Sekundärstahl-, Primäraluminium- und Sekundäraluminiumproduktion, induziert durch verschiedene klimapolitische Instrumente	324
7.30. Ausgewählte, über die Produktionsmengen gemittelte Inputs und Emissionen pro t Zwischenprodukt für verschiedene Szenarios, abgeleitet aus der durchschnittlichen Technologiematrix	327

Tabellenverzeichnis

2.1.	Treibhauswirksamkeiten verschiedener Gase	11
2.2.	Überblick über die wichtigsten UN-Klimakonferenzen . . .	19
2.3.	Überblick über die Handelsperioden in Deutschland . . .	22
2.4.	Energiesteuern und Entlastungen differenziert nach ausgewählten Energieträgern	27
2.5.	Gesamtentlastungen der energieintensiven Industrie in Deutschland 2011	33
3.1.	Einordnung ausgewählter zentraler Integrated Assessment Modelle mit Fokus auf dem sozio-ökonomischen Teilsystem	60
3.2.	Gegenüberstellung des otello-Modells und des in dieser Arbeit verfolgten Ansatzes	92
4.1.	Schematische Darstellung einer Input-Output-Tabelle . . .	107
4.2.	Schematische Darstellung der verwendeten Kohlenstoff- IO-Tabelle	130
5.1.	Auszug einer Technologiematrix am Beispiel eines inte- grierten Hüttenwerks	160
5.2.	Im aktorsbasierten Teilmodell betrachtete Kostenarten und Erlöse	173
5.3.	Überblick über die Schnittstellen beider Teilmodelle . . .	191
6.1.	Weitere im makroökonomischen Teilmodell verwendete und im Simulationslauf konstant gehaltene Daten	220
6.2.	Masse an Kohlenstoff bezogen auf den Energiegehalt verschiedener Prozessgase sowie Erdgas	222
6.3.	Entscheidungsvariablen des NLPs zur Abschätzung der anlagenspezifischen Koeffizienten	224
6.4.	Technische Ober- und Untergrenzen kohlenstoffhaltiger Stoffe am Beispiel einer Kokerei	227

6.5.	Mit dem entwickelten NLP durchgeführte Modellläufe . . .	235
6.6.	Anzahl der im aktorsbasierten Teilmodell betrachteten Stoffe je Verfahrensroute	236
6.7.	Auswirkungen der Direkteinblasung verschiedener Reduktionsmittel auf die Inputkoeffizienten eines Hochofens . . .	240
6.8.	Auswirkungen verschiedener Technologien zur Abwärmenutzung auf die Input- und Outputkoeffizienten einer Sinteranlage	244
6.9.	Investitionen der berücksichtigten effizienzsteigernden Technologien	257
6.10.	Aufteilung der Investitionen der Eisen- und Stahlindustrie im Jahr 2002 auf die einzelnen Anlagentypen	261
6.11.	Weitere im aktorsbasierten Teilmodell verwendete und im Simulationslauf konstant gehaltene Daten	262
7.1.	Im Basisszenario <i>BAU</i> verwendete zeitabhängige Inputparameter	275
7.2.	Betrachtete Szenarios zur Untersuchung der Zielerreichung und Lastenverteilung	283
7.3.	Betrachtete Szenarios zur Untersuchung des Einflusses klimapolitischer Instrumente	284
7.4.	Kohlenstoffintensität der zehn Sektoren mit den höchsten Treibhausgasemissionen	292
7.5.	Auswirkung verschiedener Möglichkeiten der Direkteinblasung von Reduktionsmitteln auf den Kohlenstoffinput . .	299
7.6.	Auswirkungen verschiedener Technologien auf die direkten und indirekten Emissionsminderungen im Szenario <i>BAU</i> .	305
7.7.	Auswirkungen verschiedener Szenarios auf ausgewählte Preisindizes in 2030	331
A.1.	In der Modellierung verwendete Indizes	341
A.2.	In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen	345
A.3.	Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im aktorsbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen	365
A.4.	Im aktorsbasierten Teilmodell berücksichtigte Stoffe und deren Preise im Basisjahr	372

Abkürzungsverzeichnis

AAG	Angewandtes allgemeines Gleichgewichtsmodell
AB	Akteursbasiertes Modell
AN	Anodenfabrik
BAU	Business-as-usual
BAY	Bayer-Verfahren
BEE	Bundesverband Erneuerbare Energie
BEEP	Best Economic Environmental Pathway
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BVT	Beste verfügbare Techniken
CCS	Carbon Capture and Storage
CDM	Clean Development Mechanism
CEPCI	Chemical Engineering plant cost index
CH ₄	Methan
COP	Conference of the Parties
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CWPB	Centre-worked PreBaked
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DEU	Deutschland
DL	Dienstleistungen
EAF	Elektrolichtbogenofen
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEIO	Environmentally Extended Input-Output
EEV	Endenergieverbrauch
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EFPI	Einfuhrpreisindex
EGKS	Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl
EID	Energieintensive Industrien in Deutschland

ELE	Schmelzflusselektrolyse
EnergieStG	Energiesteuergesetz
ENE-EFF	Energieeffizienz
EOS	Emission Optimised Sintering
EPER	Europäisches Schadstoffemissionsregister
EPI	Erzeugerpreisindex
EPOSINT	Environmental process optimised sintering
ETS	Emissions Trading System
EXP	Exporte
E3	Energy-Environment-Economy
GAMS	Generic Algebraic Modeling System
GET	Gichtgasentspannungsturbine
GIE	Blockgießanlage
HFC	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HO	Hochofen
H ₂ O	Wasser(dampf)
IAM	Integrated Assessment Modell
IO	Input-Output
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVU	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
JI	Joint Implementation
KIO	Kohlenstoff-Input-Output
KOK	Kokerei
KON	Konverter
KRG	Konvertergasrückgewinnung
KTK	Kokstrockenkühlung
KW	Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LCA	Life-Cycle Assessment
LEEP	Low emission and energy optimised sintering process
LES	Linear Expenditure System
MAT-EFF	Materialeffizienz
MRIO	Multiregionales Input-Output
NAP	Nationale Allokationspläne

NE	Nicht-Eisen
NLP	Nichtlineares Optimierungsmodell
NMKW	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
OEA	Organisation of the European Aluminium Recycling Industry
PEV	Primärenergieverbrauch
PFC	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
PFPB	Point Feeder PreBaked
PRTR	Pollutant Release and Transfer Register
RE	Refiner / Remelter
RES	Restriktive Klimapolitik
RHB	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe
SchadReg- ProtAG	Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SI	Sinteranlage
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
StaBa	Statistisches Bundesamt
StromStG	Stromsteuergesetz
SUK	Stoffumwandlungskoeffizient
SWPB	Side-worked PreBaked
TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
UBA	Umweltbundesamt
UGR	Umweltökonomische Gesamtrechnung
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
VPI	Verbraucherpreisindex
WA	Walzwerk
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WMO	World Meteorological Organization
ZuG	Zuteilungsgesetz
ZuV	Zuteilungsverordnung

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

„Keine Entscheidung zu treffen ist auch eine Entscheidung“ [259] zitiert die Süddeutsche Zeitung im April 2014 die Wissenschaftlerin Koko Warner im Bezug auf den Umgang der Staatengemeinschaft mit dem Klimawandel. Der Artikel bezieht sich auf den Weltklimabericht aus dem Jahre 2014 des IPCC¹, der vor den Folgen des Klimawandels warnt und damit auf die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs hinweist. Die Kernbotschaften dieses Berichts zeigen, dass die Einhaltung der Zwei-Grad-Obergrenze für den Temperaturanstieg bis 2050 zwar möglich ist, jedoch umfassende Klimaschutzmaßnahmen und einen tiefgreifenden Wandel von Gesellschaft und Wirtschaft voraussetzt [31]. Trotz zahlreicher Verbesserungen hinsichtlich der Energieeffizienz überlagerten in jüngster Zeit die Zunahme der Bevölkerung sowie der Wirtschaftsaktivitäten die realisierten Energieeinsparungen und führten zu einem Treibhausgasemissionsanstieg auf globaler Ebene. Aus diesem Grund hat sich Deutschland nun zum Ziel gesetzt die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40% und bis 2030 um 55% gegenüber dem Basisjahr 1990 zu senken und somit eine Vorreiterrolle bei der Bekämpfung des Klimawandels einzunehmen [25]. Des Weiteren setzt sich Deutschland für eine EU-weite Reduktion von 40% bis 2030 ein. Auch wenn die Treibhausgasemissionen in Deutschland seit 1990 nahezu stetig gefallen sind [278], erscheinen die gesteckten Ziele sehr ambitioniert. Um diese Ziele zu erreichen müssen entsprechende Anreize, bspw. durch klimapolitische Instrumente, geschaffen werden.

Gleichzeitig lässt sich jedoch feststellen, dass für die energieintensiven Industrien, welche einen großen Teil der Treibhausgasemissionen in Deutschland

¹Intergovernmental Panel on Climate Change, fünfter Sachstandsbericht

bedingen, zahlreiche Ausnahmen bezüglich der vorhandenen klimapolitischen Instrumente existieren. So ist von Gesamtentlastungen von etwa 8,2 Mrd. € im Jahre 2011 auszugehen [247]. Diese sind durch reduzierte Energie- und Stromsteuern, verringerte KWK²- und EEG³-Umlagen sowie die kostenlose Zuteilung von CO₂-Zertifikaten bedingt, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Industrien zu sichern. Die Fragen, die sich somit stellen, sind, ob die gewährten Entlastungstatbestände die gesteckten klimapolitischen Ziele konterkarieren oder bereits ein hinreichend großer Anreiz zur Minderung von Treibhausgasemissionen besteht und inwiefern eine Aufhebung dieser Entlastungstatbestände die Wirtschaftlichkeit energieintensiver Industrien beeinflusst. Die energieintensiven Industrien in Deutschland (EID) führen zahlreiche Gründe für eine weitere Gewährung der finanziellen Entlastungen auch in der Zukunft an und weisen vor allem auf eine ungleiche Lastenverteilung durch die hohen, zum Teil politisch bedingten, Energiekosten im internationalen Vergleich und die sich daraus ergebenden Wettbewerbsnachteile hin [111]. Dies kommt ebenfalls in Positionspapieren zum Ausdruck, die zu Gesetzesentwürfen bspw. zur Änderung der Energie- und Stromsteuer sowie der EEG-Umlage Stellung beziehen [109, 110]. In diesen wird betont, dass die energieintensiven Industrien den Ausgangspunkt industrieller Wertschöpfungsketten darstellen und somit auch die Wettbewerbsfähigkeit nachgelagerter Industrien durch zu hohe Kostensteigerungen beeinträchtigt werden kann.

Eine wichtige internationale Plattform zur Festlegung und Aufteilung von nationalen Treibhausgasemissionsminderungsverpflichtungen stellen die UN-Klimakonferenzen dar. Aus der bekanntesten ging 1997 das sogenannte Kyoto-Protokoll hervor, das erstmals eine rechtlich verbindliche Begrenzung der Treibhausgasemissionen für die meisten Industrieländer vorgab [45]. Seither sind die Verhandlungen über die zukünftigen Verpflichtungen zunehmend ins Stocken geraten. Zu deren Festlegung sind u.a. Kenntnisse über die nationalen technisch und wirtschaftlich realisierbaren Treibhausgasemissionsminderungspotenziale notwendig, weshalb es gilt, die nationalen Konsum- und Produktionsstrukturen zu verstehen und zu einer fairen Lastenverteilung zu kommen. Bezüglich der Produktionsstrukturen liegt dabei ein besonderes Augenmerk auf der Energiewirtschaft sowie auf

²Kraft-Wärme-Kopplung

³Erneuerbare-Energien-Gesetz

dem verarbeitenden Gewerbe⁴. Während erstere tendenziell weniger in einem internationalen Wettbewerbsumfeld steht, ist letzteres, abhängig vom Industriezweig, einem verstärkten Wettbewerbsdruck durch Importe aus dem Ausland ausgesetzt. Dies gilt vor allem für die deutsche Metallindustrie, die im Jahre 2011 etwa 28% der Treibhausgasemissionen des verarbeitenden Gewerbes verursachte (vgl. [73]) und eine der wichtigsten energieintensiven Industrien darstellt.

Beeinflusst durch die beschriebenen ambitionierten Emissionsziele sowie dem aufgezeigten wirtschaftlichen Umfeld obliegt es im Endeffekt Entscheidern aus der Politik adäquate zukünftige klimapolitische Instrumente zu entwickeln bzw. bestehende so anzupassen, dass allen Rahmenbedingungen Rechnung getragen wird. Unterstrichen durch die Relevanz dieses Themas für die UN-weiten Verhandlungen über Minderungsverpflichtungen, ist es somit unerlässlich die vielfältigen Auswirkungen und induzierten Wechselwirkungen klimapolitischer Instrumente zu analysieren, um zu einer fundierten Entscheidungsgrundlage zu gelangen. Dabei stellen sich insbesondere folgende Fragen: Welche Industrien sollten in welchem Umfang Treibhausgasemissionen mindern? Welchen Anreiz liefern hierzu klimapolitische Instrumente? Inwieweit sind energieintensive Industrien durch verschärfte nationale Klimapolitiken im internationalen Wettbewerb gefährdet? Welche zwischensektoralen Effekte sind hinsichtlich Emissionsminderungen und Preissteigerungen zu erwarten? Zur Beantwortung dieser Fragen wird in der vorliegenden Arbeit ein Modellsystem entwickelt, das die wichtigsten volkswirtschaftlichen und technisch-betriebswirtschaftlichen Einflussfaktoren detailliert modelliert und so Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der zukünftigen Ausgestaltung klimapolitischer Instrumente leisten kann.⁵

⁴Die Anteile der Energiewirtschaft und des verarbeitenden Gewerbes an den gesamten deutschen CO₂-Emissionen betragen im Jahre 2010 46% bzw. 15% [33]

⁵Die vorliegende Arbeit entstand überwiegend im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 01LA1111A geförderten Forschungsprojektes DECARBONISE. Teile dieser Arbeit wurden von Breun et al. [16, 42–44] bereits vorab publiziert (Insbesondere Teile der Abschnitte 2.3.1, 5.1, 5.2 und 6.2.1). Ohne Zitat übernommene Teilmhalte dieser Quellen wurden dabei ausschließlich von dem Autor der vorliegenden Arbeit erarbeitet.

1.2. Zielsetzung und Aufbau

Um die im vorangegangenen Abschnitt aufgeworfenen Fragen zu beantworten bedarf es einer integrierten Analyse der durch klimapolitische Instrumente induzierten ökonomischen und ökologischen Auswirkungen. Hierfür wird in der vorliegenden Arbeit ein zweistufiges Modellsystem entwickelt, welches sowohl die Reaktionen einzelner Industrien, im speziellen der Metallindustrie, als auch makroökonomische Zusammenhänge berücksichtigt. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den folgenden Punkten:

- Im Vordergrund stehen die Wirkungen einer Anpassung bestehender marktorientierter klimapolitischer Instrumente, die den Handel mit Treibhausgas-Zertifikaten, die Strom- und Energiesteuer sowie die EEG-Umlage umfassen, was eine detaillierte Modellierung aller Facetten dieser Instrumente voraussetzt.
- Eine technisch fundierte Abbildung der Produktionsprozesse der betrachteten Industrien sowie möglicher Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgasemissionen sind notwendig, um die jeweiligen Minderungspotenziale beziffern zu können. Dabei gilt es, die komplexen Stoff- und Energieflüsse zwischen einzelnen Produktionsaggregaten hinreichend genau auf Werks- bzw. Anlagenebene zu simulieren.
- Zur Abschätzung der Auswirkungen klimapolitischer Instrumente auf die Wirtschaftlichkeit der Produktionsprozesse ist eine genaue Analyse von deren Kostenstrukturen zielführend, was ebenfalls werks- bzw. anlagenspezifisch erfolgen sollte.
- Da die Ergreifung von Maßnahmen als Reaktion auf klimapolitische Instrumente durch einzelne Industrien Auswirkungen auf vor- bzw. nachgelagerte Produktionsstufen haben kann, gilt es diese indirekten Effekte, die sich in geänderten Treibhausgasemissionen und Kosten widerspiegeln können, abzuschätzen und auf diese Weise zu einem Gesamtbild der Auswirkungen zu kommen.
- Letztlich verursacht die Nachfrage des Endverbrauchers als Treiber für Produktionsprozesse die industriellen Treibhausgasemissionen. Darum sind die Effekte von Nachfrageänderungen auf die gesamtwirtschaftlichen Entwicklungen explizit in die Betrachtungen mit

einzu beziehen und Auswirkungen auf die entstehenden Emissionen zu analysieren.

Die Integration der genannten Punkte in einem ganzheitlichen Ansatz ermöglicht die Bewertung klimapolitischer Instrumente unter Beachtung etwaiger entstehender Wechselwirkungen. Bevor dieser Ansatz jedoch in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellt wird, zeigt Kapitel 2 zunächst die Bedeutung des Klimawandels, die derzeitige Emissionssituation in Deutschland sowie die gesteckten Minderungsziele auf und gibt einen Überblick über existierende klimapolitische Instrumente. Daran anschließend werden die Spezifika der Metallindustrie erläutert und darauf aufbauend Anforderungen an das zu entwickelnde Modellsystem abgeleitet.

Da das zu entwickelnde Modellsystem aus zwei Teilmodellen besteht, werden in Kapitel 3 in einem ersten Schritt zunächst der Gesamtansatz und in einem zweiten Schritt die beiden Teilmodelle in die bestehende Literatur eingeordnet. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einem Überblick über den gewählten Modellierungsansatz.

Das in Kapitel 4 vorgestellte makroökonomische Teilmodell basiert auf einem Input-Output-Ansatz, weshalb zunächst eine kurze Einführung in die Input-Output-Analyse gegeben wird und anschließend die zur Beantwortung der Forschungsfragen notwendigen Anpassungen und besondere Spezifika des verwendeten Ansatzes herausgearbeitet werden.

Die technische Modellierung der Produktionsprozesse erfolgt in Kapitel 5 unter Zuhilfenahme eines aktorsbasierten Ansatzes, welcher sich ebenfalls auf die Input-Output-Analyse stützt. Dabei werden wiederum die Besonderheiten des entwickelten Teilmodells hervorgehoben sowie die Schnittstellen zum makroökonomischen Teilmodell beschrieben.

Kapitel 6 widmet sich den im Rahmen der Modellläufe eingesetzten Ausgangsdaten. Da vor allem Daten zu den werksspezifischen Stoff- und Energieflüssen häufig nicht öffentlich verfügbar sind oder in unzureichender Granularität vorliegen, werden diese durch ein nichtlineares Optimierungsmodell generiert, welches ebenfalls in Kapitel 6 beschrieben wird.

In Kapitel 7 werden die zu untersuchenden Szenarios präsentiert und im Anschluss die durch das Modellsystem erzeugten Ergebnisse hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Kriterien miteinander verglichen und so die Auswirkungen verschiedener klimapolitischer Instrumente quantifiziert.

Kapitel 8 fasst die Arbeit zusammen und zeigt mögliche Handlungsalternativen bezüglich der Ausgestaltung klimapolitischer Instrumente auf. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten.

2. Rahmenbedingungen und Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente

Ziel dieses Kapitels ist das Aufzeigen der gegebenen Rahmenbedingungen nationaler Klimapolitiken sowie die Analyse der Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente. Hierzu werden zunächst die Bedeutung des Klimawandels sowie die sich daraus ergebenden Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen mit Bezug auf Deutschland dargestellt (Abschnitt 2.1). Im Anschluss daran werden die derzeit zum Einsatz kommenden klimapolitischen Instrumente erläutert (Abschnitt 2.2). Abschnitt 2.3 zeigt die Besonderheiten der Metallerzeugung auf, der bei der Ausgestaltung klimapolitischer Instrumente eine Sonderrolle zukommt. Das Kapitel schließt mit der Ableitung von Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente (Abschnitt 2.4).

2.1. Bedeutung des Klimawandels und Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland

Die Notwendigkeit zur Bekämpfung des Klimawandels und zur Reduktion von Treibhausgasemissionen ergibt sich aus dem entstehenden Treibhaus-effekt, welcher an dieser Stelle kurz beschrieben wird. Die Beschreibung folgt dabei im Wesentlichen [53, 142]. Neben Stickstoff N_2 (78,08 Vol.%),

Sauerstoff O_2 (20,95 Vol.%) und Argon Ar (0,93 Vol.%) enthält die Atmosphäre Spurengase, die teilweise treibhauswirksam sind. Diese haben auf die einfallende kurzwellige Sonnenenergie eine sehr kleine Absorptionswirkung, absorbieren jedoch die ausgehende Erdstrahlung in deutlich größerem Umfang, was einen „Wärmestau“ und eine Erhöhung der mittleren Temperatur um etwa 30 K zur Folge hat. Zur Kategorie der treibhauswirksamen Gase zählen Wasserdampf H_2O , Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4 , Distickstoffmonoxid N_2O , Schwefelhexafluorid SF_6 , teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe HFC sowie perfluorierte Kohlenwasserstoffe PFC. Ein großer Teil dieser Spurengase gelangt auf natürlichem Wege in die Atmosphäre (natürlicher Treibhauseffekt), ein weiterer Teil entsteht auf Grund menschlicher Aktivitäten, wird also anthropogen bspw. durch die Verbrennung fossiler Energieträger verursacht (anthropogener Treibhauseffekt). Bezüglich der Einschätzung des anthropogenen Anteils eines Gases in der Atmosphäre divergieren die Aussagen der Klimawissenschaftler, womit auch der anthropogene Beitrag zur Erderwärmung umstritten ist. Jedoch gilt es als belegt, dass die Konzentration der Treibhausgase in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen hat (vgl. [142]). Darüber hinaus erkennen der größte Anteil der Wissenschaftler wie auch alle offiziellen Institutionen auf Ebene der Bundesregierung, der Europäischen Union und der Vereinten Nationen den Menschen als (Mit-)Verursacher des Klimawandels an [53], was sich ebenfalls in der nationalen und internationalen Klimapolitik widerspiegelt und auch in dieser Arbeit vorausgesetzt wird.

Als Antwort auf die Debatte über den Klimawandel und auf Grund des Fehlens einer unabhängigen, objektiven Informationsquelle für politische Entscheidungsträger bezüglich der möglichen Folgen und potenzieller Anpassungsmaßnahmen wurde 1988 der IPCC durch das UNEP¹ und die WMO² ins Leben gerufen [162]. Seither trägt der IPCC regelmäßig in den sogenannten Sachstandsberichten aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel zusammen. Im aktuellsten veröffentlichten fünften Sachstandsbericht aus den Jahren 2013 und 2014 wird der menschliche Einfluss als Hauptursache der Erderwärmung als äußerst wahrscheinlich eingestuft, eine weitere Temperaturveränderung im späten 21. Jahrhundert gilt als praktisch sicher (vgl. [163]). Weiterhin werden als evidente Folgen des Klimawandels die Erwärmung des Ozeans, der Anstieg des Meeresspiegels und

¹United Nations Environment Programme

²World Meteorological Organization

das Abschmelzen der Eisschilde in Grönland und in der Antarktis sowie fast aller Gletscher angeführt, was zugleich den akuten Handlungsbedarf zur Bekämpfung des Klimawandels aufzeigt.

Um das Ausmaß des Handlungsbedarfs zu quantifizieren wurde bereits bei den Klimaschutzverhandlungen in Cancún 2010 ein Zwei-Grad-Ziel vereinbart, an dem sich seither alle klimapolitischen Maßnahmen orientieren [53]. Dieses Ziel besagt, dass eine Erderwärmung von über 2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit die Anpassungsfähigkeit der Gesellschaft überfordern würde und deshalb nicht überschritten werden dürfe. Dabei beruft sich das Zwei-Grad-Ziel nur indirekt auf die Aussagen und Modellrechnungen des IPCC (vgl. bspw. [5]), da dieser definitionsgemäß keine Werturteile, sondern lediglich reine Fakten wiedergibt (vgl. [186]), und ist vielmehr als grober, gerundeter Richtwert zu sehen, der ebenfalls einen gewissen Wiedererkennungswert hat (vgl. [164]). Der Wert wurde bereits in den Siebzigern von William D. Nordhaus geprägt, der festhielt, dass die geschätzte maximale (natürliche) Abweichung in den vergangenen 100.000 Jahren etwa 2°C betrug [216] und deshalb auch zukünftige langfristige Klimaänderungen innerhalb dieses normalen Bereichs bleiben sollten. Auch neuere, genauere Schätzungen bestätigen Nordhaus' These [164].

Die EU übersetzt das Zwei-Grad-Ziel, gestützt auf Szenariorechnungen aus dem vierten Sachstandsbericht des IPCC [130], in eine notwendige Reduktion der Treibhausgasemissionen in Industrieländern von 80 bis 95% in 2050 gegenüber dem Basisjahr 1990 [180].³ Als weiterer Meilenstein wird dabei das Erreichen einer 40%-Reduktion in 2030 definiert [98]. Auch Deutschland visiert eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95% in 2050 an, gibt auf dem entsprechenden Entwicklungspfad jedoch mehrere und ambitioniertere Meilensteine an (vgl. z.B. [139]). Diese Ziele sind zusammen mit den in Deutschland emittierten Treibhausgasen in Abbildung 2.1 dargestellt. Das Diagramm zeigt über die letzten Jahre nahezu monoton abnehmende Treibhausgasemissionen, wobei ebenfalls deutlich wird, dass die derzeitige Abnahmerate nicht ausreichend ist, um die klimapolitischen Ziele zu erreichen und somit in Zukunft umfassendere Maßnahmen ergriffen werden müssen.

³Global wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von insgesamt 50% bis 2050 angestrebt, wobei hier neben den Industrieländern auch Schwellen- und Entwicklungsländer einbezogen werden.

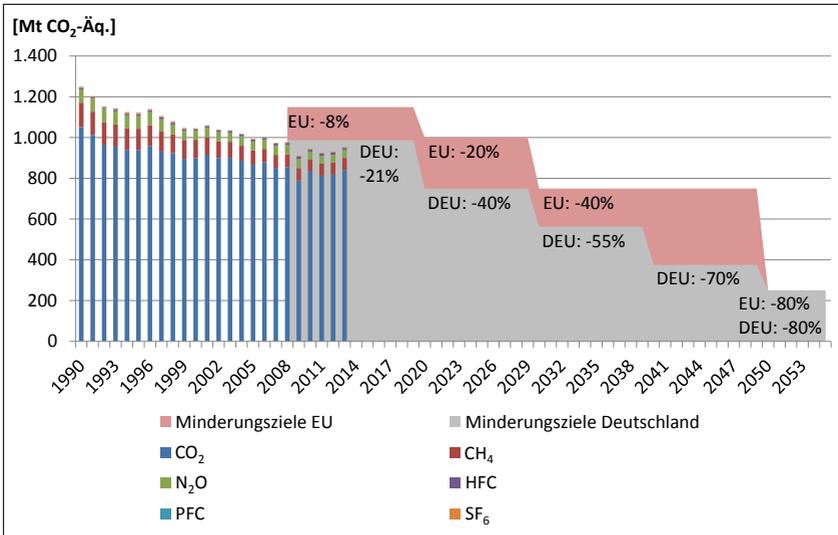


Abbildung 2.1.: In Deutschland emittierte direkt wirkende Treibhausgase (in Anlehnung an [278]) sowie europäische und deutsche Minderungsziele

Weiterhin fällt auf, dass die CO₂-Emissionen mit 88,2% in 2013 den größten Anteil der Treibhausgasemissionen bedingen, während die CH₄-Emissionen auf 6,2%, die N₂O-Emissionen auf 4,0% und die restlichen abgebildeten Treibhausgase auf zusammen 1,6% kommen. Die Emissionsmenge der einzelnen Treibhausgase wird dabei in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt, um die unterschiedlichen Treibhauspotenziale der betrachteten Gase vergleichen zu können. Dabei hängt das Treibhauspotenzial eines Gases sowohl von dessen Absorptionswirkung als auch von dessen Verweilzeit in der Atmosphäre ab, weshalb diese Größe auf einen vordefinierten Zeitraum bezogen wird. Tabelle 2.1 stellt die Treibhauspotenziale unterschiedlicher Gase gegenüber, wobei die Werte größtenteils aus der ecoinvent-Datenbank (vgl bspw. [9]) entnommen wurden und sich auf einen Zeitraum von 100 Jahren beziehen. Es zeigt sich, dass bspw. SF₆ eine 22.800 Mal höhere Absorptionswirkung über den gegebenen Zeitraum verglichen mit CO₂ hat, was sowohl auf die langen atmosphärischen Verweilzeiten dieses Gases als auch auf dessen hohe spezifische Absorption zurückzuführen ist [264]. Zwar

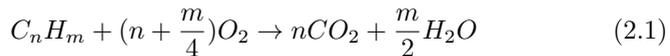
Tabelle 2.1.: Treibhauswirksamkeiten verschiedener Gase

Treibhausgas	Treibhauspotenzial [kg CO ₂ -Äq. / kg]
CO ₂	1 ¹
CH ₄	25 ¹
N ₂ O	298 ¹
HFC, PFC	1.000 - 10.000 ²
SF ₆	22.800 ¹

¹ nach ecoinvent [9]² nach [264]

weist CO₂ das geringste Treibhauspotenzial auf, jedoch übersteigen die emittierten Mengen die Emissionen der anderen Treibhausgase deutlich, was zu den in Abbildung 2.1 dargestellten Anteilen führt.

Die Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels in der nahen Zukunft hängt somit maßgeblich von den entstehenden CO₂-Emissionen ab, die vor allem bei Verbrennungsprozessen durch die Reaktion von Kohlenwasserstoffen mit Sauerstoff gemäß der stark vereinfachten Reaktionsgleichung 2.1 [159] entstehen.



Durch diese Verbrennungsprozesse wird, ggf. über zusätzliche Umwandlungsprozesse, die zuvor im Brennstoff chemisch gebundene Energie in der benötigten Form, als Wärme, Elektrizität oder kinetische Energie, bereitgestellt und bildet somit den Ausgangspunkt vieler Prozesse in Energiewirtschaft, Industrie, im Verkehr oder auch in Haushalten. Daneben gibt es zahlreiche weitere anthropogene Quellen für die Entstehung von treibhauswirksamen Gasen, wie z.B. die Düngung in der Landwirtschaft, welche durch den zusätzlichen Stickstoff-Eintrag in den Boden zu einer Erhöhung der N₂O-Emissionen führen kann [182]. Auch ein Großteil der CO₂-Emissionen der Eisen- und Stahlindustrie, welche in Abschnitt 2.3 genauer untersucht wird, entsteht nicht verbrennungsbedingt, sondern auf Grund des Einsatzes fossiler Brennstoffe als Reduktionsmittel. Abbildung 2.2 gibt die Aufteilung der in 2011 emittierten Treibhausgase differenziert nach Sektoren wieder.

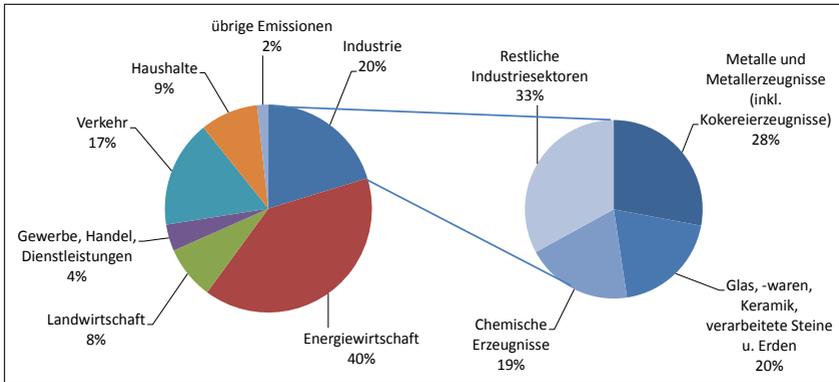


Abbildung 2.2.: Aufteilung der 2011 in Deutschland emittierten Treibhausgase auf die Sektoren (in Anlehnung an [293] und [73])

Die Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft repräsentieren mit 40% den größten Anteil der nationalen Emissionen, weshalb ein Großteil der Anstrengungen seitens der Politik im Bereich des Ausbaus der erneuerbaren Energien zur Elektrizitätserzeugung liegt, was z.B. auch im EEG [107] verankert ist. Einen weiteren im Bezug auf den Klimawandel wichtigen Sektor stellt die Industrie (20%) dar, die, in Anlehnung an die meisten geführten Statistiken, das verarbeitende Gewerbe sowie den Bergbau umfasst. Hierin ist der Industriesektor mit dem höchsten Treibhausgasausstoß die Metallerzeugung, die inklusive der Kokereierzeugnisse 28% der industriellen Treibhausgase im Jahre 2011 emittierte, wobei verhältnismäßig wenige Werke für den Hauptteil dieser Emissionen verantwortlich waren (vgl. Abschnitt 2.3).

Neben der Reduktion von Treibhausgasemissionen gibt es weitere politische Ziele, die ebenfalls einen positiven Einfluss auf den Rückgang der Emissionen haben. Eines davon ist die Steigerung der Energieeffizienz, die einen Beitrag zur Gewährleistung der zukünftigen Energieversorgungssicherheit leisten soll. Die EU beziffert dieses Ziel mit einer Einsparung des Primärenergieverbrauchs von 20% in 2020 gegenüber den Prognosen⁴, wobei derzeitige Schätzungen zeigen, dass ggf. nur die Hälfte dieses

⁴Dies entspricht einer Einsparung von 368 Mio. t Rohöläquivalenten [99].

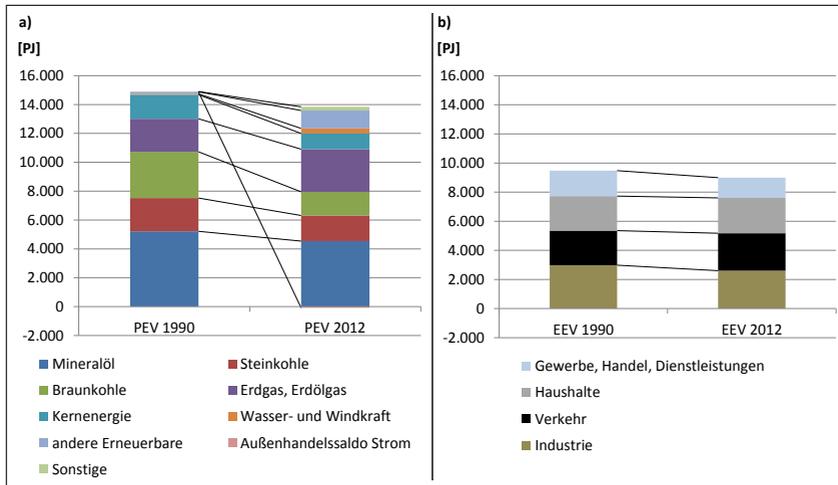


Abbildung 2.3.: a) Primärenergieverbrauch (PEV) nach Energieträgern und b) Endenergieverbrauch (EEV) nach Sektoren in den Jahren 1990 und 2012 (Datengrundlage: [34])

Ziels erreicht wird [99]. Energieeinsparpotenziale identifiziert die EU im Gebäudesektor, im Verkehrssektor sowie in der Industrie. Abbildung 2.3 gibt die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs sowie des Endenergieverbrauchs, der sich aus dem Primärenergieverbrauch abzüglich der Verluste und des Verbrauchs in den Umwandlungsbereichen ergibt, in Deutschland wieder.

Bezüglich des Primärenergieverbrauchs lässt sich eine Einsparung von 8% gegenüber 1990 feststellen, während beim Endenergieverbrauch hingegen nur eine Einsparung von 5% vorliegt, was für eine Zunahme der Effizienz bei der Umwandlung von Primär- in Endenergie spricht, wie sie bspw. im Energiesektor vorgenommen wird. Weiterhin wird deutlich, dass der Anteil der fossilen Energieträger Mineralöl, Stein-, Braunkohle sowie Erdgas und Erdölgas durch den Ausbau der erneuerbaren Energien von 87% auf 79% zurückgegangen ist, diese fossilen Energieträger aber nach wie vor den Hauptteil aller eingesetzten Energieträger stellen. Die Reduktion des Einsatzes fossiler Brennstoffe, bspw. durch Energieeffizienzmaßnahmen

oder einen Brennstoffwechsel, stellt einen der wichtigsten Ansatzpunkte zur Reduktion der Treibhausgasemissionen dar.

Auf der Seite des Endenergieverbrauchs wird deutlich, dass die Industrie, der Verkehr, die Haushalte sowie der Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ nahezu gleichermaßen den Verbrauch beeinflussen. Ein Abgleich der jeweiligen Anteile am Endenergieverbrauch mit den Anteilen der emittierten Treibhausgase in den vier Sektoren (Abbildung 2.2) zeigt deutliche Unterschiede in der Energieträgerzusammensetzung auf. So emittieren die Sektoren Haushalte und „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ deutlich weniger im Vergleich zu der eingesetzten Energiemenge, was zeigt, dass hier vermehrt erneuerbare Energien sowie Strom, Öl und Gas zur Energiebereitstellung genutzt werden. Während der Einsatz von erneuerbaren Energien und Strom in der Regel nicht mit direkten fossilen Treibhausgasemissionen einhergeht, sind die auf den Energiegehalt bezogenen Emissionsfaktoren von Öl und Gas deutlich geringer als die von Kohle (vgl. bspw. [27]), wobei letztere hauptsächlich in der Industrie eingesetzt wird. Vor allem beim Einsatz von Strom kann nicht vernachlässigt werden, dass eine große Menge an Treibhausgasemissionen in vorgelagerten Prozessstufen (Sektor Energiewirtschaft) emittiert wird. Es ist somit, um die gesteckten europäischen und nationalen Ziele der Emissionsreduktion sowie der Effizienzsteigerung zu erreichen, eine ganzheitliche, sektorübergreifende Sichtweise notwendig.

Neben der Energieeffizienz ist die Ressourceneffizienz ein weiterer wichtiger Pfeiler der nationalen Umweltpolitik. Das Programm ProgRess der Bundesregierung konzentriert sich bspw. auf die Steigerung der Ressourceneffizienz bei der Nutzung abiotischer Rohstoffe wie Erze oder Mineralien, die nicht primär der Energiegewinnung dienen, mit dem Ziel Ressourcen für zukünftige Generationen zu schonen [48]. Dabei soll Deutschlands Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 verdoppelt werden. Dies kann ebenfalls die Reduktion der Treibhausgasemissionen positiv beeinflussen, indem die Förderung der Rohstoffe gesenkt wird und so weniger Treibhausgase bei deren Bereitstellung emittiert werden.

Um die aufgezeigten klimapolitischen Ziele zu erreichen und zu einer umfassenden Dekarbonisierung Deutschlands zu kommen, sind Maßnahmen in jedem Sektor notwendig. So gilt bspw. die Erreichung des Zwei-Grad-Ziels und damit einhergehend der angestrebten Emissionsreduktion um

mindestens 80% im Jahre 2050 in Anbetracht der vergangenen Treibhausgasemissionsentwicklungen zwar als sehr ambitioniert, aber möglich [31]. Die Erreichung kann jedoch nur durch einen tiefgreifenden Wandel von Gesellschaft und Wirtschaft sichergestellt werden. Die Fragen, die sich stellen, sind, welcher Sektor welchen Beitrag leisten kann und wie durch klimapolitische Instrumente Einfluss auf die Ausnutzung gegebener Reduktionspotenziale genommen werden kann? Hierzu gilt es zum einen, diese Reduktionspotenziale zu quantifizieren und die Kosten für deren Ausnutzung abzuschätzen und zum anderen, die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen klimapolitischer Instrumente zu beziffern. Im folgenden Abschnitt wird hierzu ein Überblick über mögliche klimapolitische Instrumente gegeben.

2.2. Klimapolitische Instrumente

Nachdem der vorherige Abschnitt die klimapolitischen Ziele der EU und der Bundesregierung aufgezeigt hat, stellt dieser Abschnitt deren Institutionalisierung in Form klimapolitischer Instrumente in den Vordergrund. Hierzu werden zunächst die klimapolitischen Instrumente klassifiziert und deren Wirkungsweisen aufgezeigt (Abschnitt 2.2.1). Daran anschließend wird die Entwicklung der Klimapolitik auf nationaler und internationaler Ebene (Abschnitt 2.2.2) sowie der aktuell in Deutschland zum Einsatz kommende klimapolitische Instrumentenmix (Abschnitte 2.2.3 bis 2.2.6) dargestellt.

2.2.1. Wirkungsweisen klimapolitischer Instrumente

Anthropogene Treibhausgasemissionen entstehen durch unterschiedliche menschliche Aktivitäten, welche zum Teil bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt wurden. Diese Aktivitäten liegen in einer Vielzahl menschlicher Bedürfnisse, bspw. nach Nahrung, Wohnen oder Mobilität, begründet. Während einige Aktivitäten wie der Personentransport oder das Beheizen von Gebäuden in der Regel überwiegend mit direkten Emissionen während deren Ausführung (Verbrennungsprozesse) einhergehen, bedingen der Kauf von Produkten

oder die Nachfrage nach Strom indirekt Produktionsprozesse, die wiederum Emissionen verursachen. Um die durch menschliche Aktivitäten induzierten Emissionen zu reduzieren bedarf es regulatorischer Eingriffe in das gegebene Wirkungsgefüge. In gewissem Umfang müssen negative externe Effekte wie Treibhausgasemissionen geduldet werden, um ein Wirtschaften zur Befriedigung der menschlichen Bedürfnisse überhaupt zu ermöglichen [273]. „Andererseits muss die Entstehung zu großer negativer externer Effekte verhindert werden, oder es müssen (wenn das nicht möglich ist) die Verursacher zu einer angemessenen Kompensation der durch sie hervorgerufenen Belastungen gezwungen werden, also z.B. mit den Kosten belastet werden, die anderen (bzw. der Gesellschaft) durch die von ihnen verursachten negativen externen Effekte entstanden sind. Dies schafft individuelle Anreize, solche negativen externen Effekte zu vermeiden oder zu verringern“ [273].

Eine allgemeine Einteilung umweltpolitischer Instrumente zusammen mit einigen Beispielen kann bspw. [207] entnommen werden. Die im Folgenden gegebenen Ausführungen orientieren sich im Wesentlichen an dieser Darstellung. Prinzipiell können umweltpolitische Instrumente in drei Kategorien eingeteilt werden, wobei allen gemein ist, dass das Entscheidungsverhalten einzelner Wirtschaftssubjekte (Haushalte, Unternehmen) beeinflusst werden soll.

- **Ordnungsrechtliche Instrumente:** Diese Instrumentengruppe begrenzt die zulässigen Handlungsalternativen durch Ge- oder Verbote, weshalb auch von einer direkten Verhaltenssteuerung gesprochen wird. Bspw. können bestimmte Inputfaktoren verboten, Auflagen bezüglich der Emissionsmenge eingeführt oder bestimmte Technologien vorgeschrieben werden.
- **Ökonomische Instrumente:** Ökonomische Instrumente beeinflussen den Nutzen und die Kosten einzelner Handlungsalternativen, weshalb auch von einer indirekten Verhaltenssteuerung durch finanzielle Anreizmechanismen gesprochen wird. Hierzu zählen zum einen Abgaben und Subventionen, wobei als Bemessungsgrundlage bspw. die im Produktionsprozess eingesetzten Faktoren herangezogen werden können. Beispiele hierfür sind die Ökosteuern (vgl. Abschnitt 2.2.4) sowie die EEG-Umlage (vgl. Abschnitt 2.2.5). Zum anderen zählen handelbare Nutzungsrechte, die das Recht auf eine bestimmte

Umweltnutzung kontingentieren, zu den ökonomischen Instrumenten. Deren genaue Funktionsweise wird im Rahmen des Treibhausgas-Zertifikatehandels in Abschnitt 2.2.3 erläutert. Während Abgaben durch einen am Preis ansetzenden Steuerungsmechanismus charakterisiert sind, setzt letzterer bei den handelbaren Nutzungsrechten an der (Emissions-)Menge an.

- **Suasorische Instrumente:** Diese Instrumentengruppe beeinflusst die Informationen und Wertvorstellungen des Entscheidungsträgers und wird in der Regel ergänzend zu ordnungsrechtlichen und ökonomischen Instrumenten eingesetzt. Auf Grund des zunehmenden Umweltbewusstseins auf Verbraucherseite können bspw. Kennzeichnungspflichten das Verbraucherverhalten nachhaltig beeinflussen.

Während sich ordnungsrechtliche Instrumente wie Auflagen gegenüber Anreizinstrumenten durch eine größere Reaktionssicherheit auszeichnen [321], liegt der entscheidende Vorteil anreizorientierter Instrumente in ihrer Kosteneffizienz [2]. Dies bedeutet, dass bei ökonomischen Instrumenten die Internalisierung externer Effekte zu minimalen Kosten vollzogen werden kann, da die Wirtschaftssubjekte abhängig von ihren jeweiligen Grenzkosten der Emissionsvermeidung entweder zusätzliche Abgaben in Kauf nehmen beziehungsweise zusätzliche Nutzungsrechte erwerben oder aber Gegenmaßnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen einleiten.

Um eine Entscheidung über den Einsatz bestimmter Instrumente treffen zu können, müssen deren zukünftige ökologische und ökonomische Auswirkungen unter den gegebenen nationalen Rahmenbedingungen abgeschätzt werden. Wie für den Fall Deutschlands in den Abschnitten 2.2.3 bis 2.2.6 erläutert, wird in der Regel ein Instrumentenmix eingesetzt um die vordefinierten klimapolitischen Ziele zu erreichen. Somit ist auch die Analyse der Wechselwirkungen zwischen diesen Instrumenten von Interesse. Da vor allem die durch ökonomische Instrumente induzierten Auswirkungen schwierig zu quantifizieren sind, liegt auf diesen ein besonderer Fokus in den weiteren Ausführungen.

2.2.2. Entwicklung der Klimapolitik

Die nationale Klimapolitik Deutschlands findet ihren Ursprung in der internationalen Klimarahmenkonvention (UNFCCC⁵), welche im Jahre 1992 auf dem Umweltgipfel in Rio de Janeiro beschlossen wurde. „Die Klimarahmenkonvention hält die Industrieländer dazu an, eine ‚Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“ [256]. Sie ist seit 1994 völkerrechtlich bindend und wurde mittlerweile von 193 Staaten ratifiziert, enthält jedoch darüber hinaus keine verbindlichen Minderungsziele. Auf den folgenden, ab 1995 jährlich stattfindenden Klimakonferenzen (COP⁶ 1-20) versuchten die Länder diese Ziele zu spezifizieren. Der Werdegang der wichtigsten Verhandlungen ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

Eine wesentliche Errungenschaft dieser oft zähen Verhandlungen war im Dezember 1997 der Beschluss des Kyoto-Protokolls auf der COP 3. Darin verpflichteten sich 38 Industrie- und Transformationsländer, den Ausstoß der sechs wichtigsten anthropogenen Treibhausgase (vgl. Abschnitt 2.1 und Tabelle 2.1) in den Jahren 2008 bis 2012 im Mittel um 5,2% gegenüber 1990 zu senken, womit auch erstmals völkerrechtlich bindende Ziele zur Emissionsminderung festgelegt wurden [256]. Das Protokoll trat im Jahre 2005, nachdem genügend Staaten es ratifiziert hatten um den vorgeschriebenen Anteil von 55% an den gesamten CO₂-Emissionen von 1990 zu repräsentieren, mit der Ratifizierung durch Russland in Kraft [255]. Die EU-15 verpflichtete sich darin zu einer Reduktion von 8%, Deutschland zu einer Reduktion von 21%⁷ [256].

Ziel der Klimakonferenz in Kopenhagen 2009 (COP 15) war es, ein verbindliches Nachfolgeabkommen für das im Jahre 2012 auslaufende Kyoto-Protokoll zu beschließen, wobei diesmal neben den Industrieländern auch die Schwellenländer verbindliche Ziele hätten festlegen sollen [256]. Die Konferenz wird jedoch häufig als gescheitert angesehen, da keine Einigkeit

⁵United Nations Framework Convention on Climate Change

⁶Conference of the Parties

⁷Die vergleichsweise hohe Verpflichtung Deutschlands geht auf die Wiedervereinigung zurück und das damit verbundene Abschalten vieler ineffizienter Produktionswerke nach 1990.

Tabelle 2.2.: Überblick über die wichtigsten UN-Klimakonferenzen nach [176, 254, 255]

Klimakonferenz	Jahr	Ort	wesentliche Ergebnisse
Umweltgipfel	1992	Rio de Janeiro	Beschluss der Klimarahmenkonvention
COP 1	1995	Berlin	„Berliner Mandat“ als Basis für ein Protokoll zur Verringerung von Treibhausgasemissionen
COP 3	1997	Kyoto	Beschluss des Kyoto-Protokolls
COP 11	2005	Montreal	Einrichtung einer Arbeitsgruppe für die Erörterung der zweiten Verpflichtungsperiode (ab 2012) des Kyoto-Protokolls ¹
COP 13	2007	Bali	Aufsetzen eines Verhandlungsplans für Folgeabkommen auf COP 15 („Bali Road Map“)
COP 15	2009	Kopenhagen	Scheitern eines umfassenden globalen Abkommens, unverbindliche Erklärung des Zwei-Grad-Ziels im „Copenhagen Accord“
COP 16	2010	Cancún	Schaffung der Grundlagen für Kyoto-Nachfolgeabkommen, Anerkennung des Zwei-Grad-Ziels
COP 17	2011	Durban	Entscheidung über die Fortschreibung des Kyoto-Protokolls bis 2017 oder 2020, Beschluss für neues Klimaabkommen (inkl. Schwellenländer) bis spätestens 2015 für die Zeit nach 2020
COP 18	2012	Doha	Konkretisierung der Beschlüsse von COP 17, Unterzeichnung der Verlängerung des Kyoto-Protokolls
COP 19	2013	Warschau	Vorbereitung des Klimaschutz-Mandats für COP 21
COP 20	2014	Lima	Erarbeitung einer Verhandlungsgrundlage für COP 21
COP 21	2015	Paris	geplant: Internationales Klimaabkommen (verbindlich für alle Länder)

¹ nach [29]

über die Ausgestaltung eines Folgeabkommens erzielt werden konnte. Problematisch zeigten sich vor allem die verschiedenen Interessen der Industrie- und Schwellenländer [255].

Auf der Klimakonferenz in Durban 2011 (COP 17) wurde das Kyoto-Protokoll schließlich fortgeschrieben (zweite Phase), wobei sich die Industrieländer dazu verpflichteten, ab 2013 eine Reduktion der Treibhausgase von 25-40% bis 2017 oder 2020 anzustreben. Da auch dieses Mal keine Schwellenländer mit aufgenommen wurden und die Einteilung in Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer aus der ersten Phase übernommen wurde, womit bspw. China nicht als Industrieland gilt, sind die übriggebliebenen Nationen für nur noch etwa 15% der Emissionen verantwortlich. [255]

Weiterhin wurde auf der COP 17 festgehalten, dass bis spätestens 2015 (COP 21 in Paris) ein Klimaschutzabkommen, das sowohl Verpflichtungen von Industrie- als auch von Schwellenländern umfasst, für die Zeit nach 2020 beschlossen werden soll. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass die Unterschiede zwischen den ehemals als Schwellenland klassifizierten Nationen und den Industrieländern deutlich geringer geworden sind [255]. Inwiefern diese Verhandlungen in Paris erfolgreich sein und welche Mindestverpflichtungen die einzelnen Länder eingehen werden, bleibt derzeit fraglich.

Während das Kyoto-Protokoll sowie das anstehende internationale Klimaschutzabkommen konkrete nationale Emissionshöchstmengen vorgeben (sollen), wird der Weg zur Einhaltung dieser Höchstmengen nicht vorgeschrieben. Somit liegt es an den Ländern, über die Ausgestaltung der nationalen Klimapolitiken Anreizstrukturen zu schaffen, die das Einhalten der vorgegebenen Ziele gewährleisten. Als wichtigstes Instrument auf europäischer Ebene gilt der Emissionszertifikatehandel (EU ETS⁸), welcher in der Richtlinie 2003/87/EG [81] geregelt ist und durch das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) [285] in deutsches Recht umgesetzt wird.

⁸Emissions Trading System

2.2.3. Der Emissionszertifikatehandel

Die Grundidee dieses marktbasierten Instruments liegt im Prinzip des „Cap and Trade“. Das bedeutet, dass zunächst die zulässige, vorgegebene Emissionsmenge (Cap) in Form von Emissionsberechtigungen (EU Allowance) auf die einzelnen Emittenten aufgeteilt wird (Erstallokation) [123]. Daran anschließend handeln die Emittenten mit diesen Berechtigungen, wodurch sich ein Marktpreis für Emissionszertifikate einstellt. Liegen die Kosten einer Maßnahme zur Emissionsreduktion unter diesem Marktpreis, so ist es für den Emittenten ökonomisch sinnvoll, diese Maßnahme umzusetzen, die Emissionen zu reduzieren und die entsprechenden Emissionsrechte zu verkaufen, was in der Theorie zu einer effizienten Verteilung der Emissionsrechte mit minimalen Gesamtkosten führt. Als marktbasiertes Instrument grenzt sich der Emissionshandel von den klassischen ordnungspolitischen und -rechtlichen Mitteln wie Verboten und Zwangsmaßnahmen ab [123]. Seit der Einführung des Emissionshandels wurden bzw. werden drei Handelsperioden durchlaufen, die im Folgenden mit Bezug auf Deutschland kurz erläutert werden und zusammengefasst in Tabelle 2.3 dargestellt sind.

Die erste Handelsperiode von 2005 bis 2007 diente als Pilotphase für die Einführung des Systems, wobei lediglich die CO₂-Emissionen erfasst wurden. Neben Anlagen zur Erzeugung von Strom, Wärme und mechanischer Arbeit, fiel eine Auswahl CO₂-intensiver Industrieprozesse, darunter auch die Herstellung von Eisen und Stahl, unter die Handelspflicht, so dass eine kritische Masse an CO₂-Emissionen für den Handel erreicht wurde [126]. Für die erste und zweite Handelsperiode beinhalten die durch die EU-Richtlinie vorgeschriebenen Nationalen Allokationspläne (NAPs) [28] die geltenden Zuteilungsregeln (Erstallokation). Die wesentlichen Inhalte der NAPs sind wiederum im Zuteilungsgesetz (ZuG 2007) [336] verankert und werden in der Zuteilungsverordnung (ZuV 2007) [337] konkretisiert [126]. Für die meisten der Bestandsanlagen galt in der ersten Handelsperiode das Prinzip des Grandfathering. Dieses teilt auf der Basis der historischen Emissionen einer Anlage die Emissionsberechtigungen dieser Anlage kostenlos zu. Problematisch zeigte sich hierbei jedoch, dass eine weniger effiziente Anlage auch mehr Emissionsberechtigungen zugeteilt bekam [28]. Für Neuanlagen hingegen war die Zuteilung auf der Basis eines berechneten Benchmarks maßgeblich, wobei zur Berechnung des Benchmarks die

Tabelle 2.3.: Überblick über die Handelsperioden in Deutschland nach UBA und DEHSt [296]

	1. Handelsperiode	2. Handelsperiode	3. Handelsperiode
Dauer	2005-2007	2008-2012	2013-2020
Emis- sions- höchst- menge (Cap)	499 Mio. t CO ₂ pro Jahr	444 Mio. t CO ₂ pro Jahr	EU-weites Gesamtbudget: 2,04 Mrd. t CO ₂ in 2013, jährliche Reduktionsrate: 1,74%, durchschnittlicher Anteil deutscher Unternehmen: 416 Mio. t CO ₂ pro Jahr
Teilneh- mer	≈1.850 Energie- u. Industrieanlagen	≈1.650 Energie- u. Industrieanlagen	≈1.929 Energie- u. Industrieanlagen
Zutei- lungsre- geln	Zuteilung kostenloser Zertifikate auf Basis historischer Emissionen (Grandfathering)	Energie: kostenlose Zertifikate auf Basis von Benchmarks, Kürzung von 40 Mio. Zertifikaten pro Jahr für Versteigerung; Industrie: Grandfathering mit fixem Kürzungsfaktor von 1,25%	Grundzuteilungsregel: Auktionierung; Stromsektor: 100% Auktionierung; Industrie und Wärmeproduktion: kostenlose Zuteilung auf Basis von Benchmarks, Anteil der kostenlosen Zuteilung sinkt von 80% in 2013 auf 30% in 2020 und 0% in 2027

jeweils besten verfügbaren Techniken (BVT), welche im Abschnitt 2.2.6 noch ausführlicher erläutert werden, herangezogen wurden [28].

Auch in der zweiten Handelsperiode von 2008 bis 2012 mussten Berechtigungen lediglich für die CO₂-Emissionen vorgewiesen werden. Das Grandfathering blieb bezüglich der Industrieprozesse das maßgebliche Allokationsprinzip, wobei ein jährlicher Kürzungsfaktor von 1,25% eine Minderung der Emissionsfracht sicherstellen sollte [30], während im Energiesektor die Zuteilung nach Benchmarks zum Standard wurde⁹. Auf Grund der Orientierung an diesen Benchmarks aber auch durch die anteilige jährliche Kürzung erfolgte in der zweiten Handelsperiode eine deutlich geringere Zuteilung von Emissionsberechtigungen an den Energiesektor [58].

Die dritte, noch bis 2020 andauernde Handelsperiode steht im Zeichen der EU-weiten Harmonisierung der bisher auf nationaler Ebene festgelegten Zuteilungsregeln, um die Vorteile des Emissionshandels besser nutzen zu können und Verzerrungen zwischen den Nationen zu vermeiden [82]. Im Anhang der Richtlinie 2009/29/EG sind nun neben CO₂ auch die Treibhausgase N₂O sowie PFC aufgeführt, weshalb für diese Gase ebenfalls Zertifikate vorgewiesen werden müssen. Das maßgebliche Prinzip der Zuteilung von Emissionsberechtigungen in der dritten Handelsperiode stellt die Auktionierung dar. Während im Energiesektor gänzlich auf eine kostenlose Zuteilung von Zertifikaten verzichtet wird, erfolgt für industrielle Tätigkeiten die Zuteilung auf Grund anspruchsvoller Benchmarks, wobei die Zuteilungsmenge jährlich reduziert wird (vgl. Tabelle 2.3) [298]. Ausnahmen werden für Industriesektoren gewährt, die dem Risiko des *Carbon Leakage* ausgesetzt sind. Dies bedeutet, dass bei Sektoren, welche in einem verstärkten internationalen Wettbewerb stehen, die zusätzlichen Kosten für den Erwerb von Zertifikaten zu einem „Anstieg von Treibhausgasemissionen in Drittländern führen [könnten], deren Industrien nicht an vergleichbare CO₂-Auflagen gebunden sind (Verlagerung von CO₂-Emissionen)“ [82]. Somit wird im Falle des Risikos einer Verlagerung von Emissionen keine Reduzierung der durch Benchmarks kostenlos zugeteilten Berechtigungen vorgenommen. Eine Liste der gefährdeten Sektoren findet sich bspw. in den einheitlichen EU-Zuteilungsregeln [97], dort enthalten sind u.a. die Eisen- und Stahl- sowie die Aluminiumindustrie.

⁹Die Umstellung auf ein Benchmarksystem für die Energiewirtschaft erfolgte erst in der revidierten Fassung des NAP.

Die Benchmarks beruhen in der dritten Handelsperiode auf insgesamt vier Zuteilungsansätzen, welche jedoch nicht beliebig gewählt werden können, sondern deren Verwendung klaren Regeln unterliegt (Fall-back-Ansätze). Die Beschreibung der Zuteilungsansätze sowie der wichtigsten Auswahlregeln folgt im Wesentlichen [298]:

- **Produkt-Emissionswert** [t CO₂/t Produkt]: Die Zuteilung basiert auf der (zuteilungsrelevanten) Menge des hergestellten Produkts, insofern dieses im Anhang I der einheitlichen EU-Zuteilungsregeln [97] gelistet ist. Bspw. ergibt sich für Koks eine Zuteilungsmenge von 0,286 Zertifikaten¹⁰/t, für Eisenerzsinter 0,171 Zertifikaten/t, für Heißmetall 1,328 Zertifikaten/t und für Aluminium von 1,514 Zertifikaten/t. Die Produkt-Emissionswerte wurden dabei überwiegend als arithmetisches Mittel der zehn in Bezug auf den Treibhausgasausstoß effizientesten Anlagen ermittelt.
- **Wärme-Emissionswert** [t CO₂/TJ verbrauchter Wärme]: Die Zuteilung basiert auf der Menge der (zuteilungsfähigen) Wärme, insofern kein Produkt-Emissionswert vorliegt und die Wärme messbar ist. Als Benchmark wird ein Wert von 62,3 t CO₂/TJ angesetzt.
- **Brennstoff-Emissionswert** [t CO₂/TJ des benutzten Brennstoffs]: Die Zuteilung basiert auf dem Energiegehalt des verbrauchten Brennstoffs, insofern kein Produkt-Emissionswert und kein Wärme-Emissionswert vorliegen. Als Benchmark wird ein Wert von 56,1 t CO₂/TJ angesetzt.
- **Ansatz für Prozessemissionen** [t CO₂/t Prozessemissionen]: Die Zuteilung basiert auf den historischen Prozessemissionen, insofern die ersten drei Zuteilungsansätze nicht greifen. Emissionen, die als Prozessemissionen gelten, sind andere Treibhausgasemissionen als CO₂ (solange kein Produkt-Emissionswert hierfür vorgesehen ist), sowie die CO₂-Emissionen bestimmter Tätigkeiten, durch die CO₂ als unmittelbares Ergebnis des Herstellungsprozesses oder einer chemischen Reaktion entsteht (Bsp.: chemische oder elektrolytische Reduktion von Metallverbindungen). Als Wert wird 0,97 t CO₂/t angesetzt.

¹⁰Ein Zertifikat entspricht der Berechtigung zur Emission von einer Tonne CO₂.

Zur Ableitung der insgesamt zuzuteilenden Emissionsberechtigungen ist weiterhin die maßgebliche Aktivitätsrate zu berechnen und mit den Benchmarks zu multiplizieren. Die maßgebliche Aktivitätsrate ist dabei, je nach anzusetzendem Benchmark, der Median aller Jahresmengen, Jahresenergiemengen oder Jahreswerte im gewählten Bezugszeitraum¹¹ [338].

Neben den oben beschriebenen Emissionsrechten können gemäß des Kyoto-Protokolls weiterhin im Ausland erbrachte Minderungsleistungen in Form von CDM¹²-Emissionszertifikaten und JI¹³-Emissionszertifikaten zu einem bestimmten Prozentsatz auf die im Inland zu erreichenden Minderungsziele angerechnet werden. Nähere Informationen hierzu finden sich bspw. in [140, 275].

Die aufgezeigte aktuelle Ausgestaltung des Zertifikatehandels inklusive der Zuteilungsansätze beruht auf zahlreichen Regeln und Ausnahmen. Im Hinblick auf die gesetzten Emissionsreduktionsziele (Abschnitt 2.1) bleibt deshalb fraglich, inwieweit energieintensive Industrien wie die Metallindustrie, welche durch eine vergleichsweise umfangreiche Zuteilung kostenloser Zertifikate charakterisiert ist, durch dieses klimapolitische Instrument zu einer weiteren Senkung der Emissionen angereizt werden können. Auf der anderen Seite gilt es zu prüfen, wie groß die Gefahr einer zukünftigen Emissionsverlagerung (*Carbon Leakage*) bei geringeren Zuteilungsmengen wäre.

Neben dem Zertifikatehandel existieren zwei weitere wesentliche klimapolitische Instrumente in Deutschland, die Energie- und Stromsteuern, im Volksmund auch unter dem Begriff Ökosteur bekannt, sowie das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Beide Instrumente werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.2.4. Energie- und Stromsteuern

Die in der Ökosteur zusammengefassten Energie- und Stromsteuern sollen Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz sowie der Energieeinsparung

¹¹Der Bezugszeitraum erstreckt sich entweder vom 1. Januar 2005 bis zum 31. Dezember 2008 oder vom 1. Januar 2009 bis zum 31. Dezember 2010.

¹²Clean Development Mechanism

¹³Joint Implementation

setzen, indem der Preis für Energie angehoben wird [112]. Die wesentlichen Merkmale im Rahmen der ökologischen Steuerreform in Deutschland waren dabei die Erhöhung der Mineralölsteuer sowie das Einführen einer Verbrauchssteuer auf Strom. Damit einher ging eine Entlastung von anderen, bereits bestehenden Steuern wie den Lohnnebenkosten, wodurch Impulse für die Schaffung von Arbeitsplätzen gegeben werden sollten [196]. Mittlerweile wird die Ökosteur durch zwei Regelwerke abgedeckt, dem Energiesteuergesetz (EnergieStG) [113] und dem Stromsteuergesetz (StromStG) [279]. Beide Gesetze beinhalten neben den geltenden Steuersätzen zahlreiche Ausnahmen, wovon die wichtigsten im Folgenden beschrieben werden. Prinzipiell steht bei der Gewährung dieser Ausnahmen, ähnlich wie beim Zertifikatehandel, die internationale Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Unternehmen im Fokus, weshalb die hohe Energie- und Stromsteuerbelastung in Deutschland teilweise ausgeglichen wird (vgl. bspw. [80, 309]).

Eine wesentliche Entlastung kommt Unternehmen des produzierenden Gewerbes zu Gute, die nach §54 EnergieStG [113] und nach §9b StromStG [279] für bestimmte Energieträger (um 25%) geringere Steuersätze zu entrichten haben (vgl. Tabelle 2.4), wobei ein Selbstbehalt von 250 € nicht unterschritten werden kann. Dies wird im Allgemeinen auch als die erste Stufe der gewährten Entlastungen bezeichnet (vgl. bspw. [309]). Die zweite Stufe bildet der Spitzenausgleich, der sich ebenfalls auf Unternehmen des produzierenden Gewerbes bezieht, dessen Berechnungsmethode jedoch etwas komplexer ist und im Folgenden nur vereinfacht wiedergegeben wird. Da ein wesentliches Ziel der ökologischen Steuerreform die Senkung der Rentenversicherungsbeiträge war, was durch eine Anhebung der Ökosteur ausgeglichen wurde, werden diese Ersparnisse beim Spitzenausgleich von der maximal möglichen Entlastung (vgl. Tabelle 2.4) abgezogen. Hierzu wird gemäß §55 EnergieStG und §10 StromStG ein fiktiver Rentenversicherungsbeitrag von 20,3% mit dem aktuelleren niedrigeren Beitrag von 19,5%¹⁴ verglichen und die (theoretisch) eingesparten Beiträge berechnet [247]. Neben diesen Beiträgen werden auch die Sockelbeträge von 1000 € (§10 StromStG) und 750 € (§55 EnergieStG) von der maximalen Entlastungssumme abgezogen. Von der verbleibenden Differenz können maximal 90% erstattet werden. Seit 2013 darf der Spitzenausgleich nur noch

¹⁴Seit der Einführung der Regelung ist der allgemeine Rentenversicherungsbeitrag von 19,5 auf 19,9% gestiegen [247].

geltend gemacht werden, wenn das antragstellende Unternehmen ein zertifiziertes Energie- oder Umweltmanagementsystem nachweisen kann [157,309]. Die Normalsteuer- und Entlastungssätze können zusammengefasst Tabelle 2.4 entnommen werden.

Tabelle 2.4.: Energiesteuern und Entlastungen differenziert nach ausgewählten Energieträgern (vgl. z.B. [80]), alle Werte wurden zur Vergleichbarkeit auf GJ umgerechnet.

Energieträger	Normalsteuersätze nach §2 EnergieStG und §3 StromStG	Steuerentlastung für produzierendes Gewerbe (Stufe 1) nach §54 EnergieStG und §9b StromStG	Maximaler Entlastungssatz im Spitzenausgleich (Stufe 2) nach §55 EnergieStG und §10 StromStG
Strom	5,69 €/GJ	-1,42 €/GJ	-4,27 €/GJ
Benzin	22,17 €/GJ	-	-
Diesel	13,55 €/GJ	-	-
Flugturbinenkraftstoff ¹	19,03 €/GJ	-	-
Heizöl leicht	1,71 €/GJ	-0,43 €/GJ	-0,14 €/GJ
Heizöl schwer	0,63 €/GJ	-	-
Petrolkoks	0,33 €/GJ	-	-
Flüssiggas	1,31 €/GJ	-0,33 €/GJ	-0,43 €/GJ
Kohle	0,33 €/GJ	-	-
Erdgas	1,53 €/GJ	-0,38 €/GJ	-0,63 €/GJ

¹ Flugturbinenkraftstoff ist nicht gesondert in §2 EnergieStG aufgeführt, fällt aber nach der zolltariflichen und statistischen Nomenklatur [89] unter die mittelschweren Öle.

Die in der Tabelle 2.4 auf den Energiegehalt bezogenen Steuersätze differieren stark zwischen den Energieträgern. So ist der Normalsteuersatz von Benzin etwa 67 mal so hoch wie der von Kohle. Des Weiteren wird offensichtlich, dass der Spitzenausgleich das dominierende Instrument zur Reduktion der Ökosteuern ist. Dies geht auch aus dem 24. Subventionsbericht des Bundesministeriums der Finanzen [26] hervor, da hier die Ermäßigungen für das produzierende Gewerbe (Stufe 1) in 2013 mit 1,17 Mrd. € und die Ermäßigungen im Rahmen des Spitzenausgleichs (Stufe 2) mit 2,18 Mrd. € beziffert sind. Dabei gehen 90% dieser Entlastungen auf das Stromsteuergesetz zurück.

Darüber hinaus existieren nach §9a (StromStG) und §51 (EnergieStG) Steuerbefreiungen für bestimmte Prozesse und Verfahren, die als besonders energieintensiv gelten [157]. Hierzu zählt auch die Metallherzeugung und -bearbeitung. Bedingt durch diese Ausnahmen wurden in 2013 Steuerbefreiungen in Höhe von 1,34 Mrd. € registriert [26].

Zusammengefasst zeigt sich, dass auch das Instrument der Ökosteuern durch eine Vielzahl an Ausnahmen gekennzeichnet ist. Somit ist die zukünftige Lenkungswirkung dieses Instruments im Bezug auf die anvisierten klimapolitischen Ziele, ähnlich wie beim Zertifikatehandel, fraglich, u.a. auch deshalb, da der Energieträger Kohle, welcher durch einen vergleichsweise hohen CO₂-Emissionsfaktor charakterisiert ist (vgl. [27]), nur sehr gering besteuert wird.

2.2.5. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [107] bildet einen weiteren wichtigen Baustein der deutschen Klimapolitik. Ein wesentlicher Zweck dieses Gesetzes ist nach §1 die Förderung der „Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien“, wobei der Anteil der erneuerbaren Energien in 2050 mindestens 80% betragen soll. Hierzu wird entsprechenden Anlagen ein vorrangiger Anschluss (§8) sowie die vorrangige Abnahme, Übertragung und Verteilung des Stroms (§11) durch die Netzbetreiber gewährt. Darüber hinaus wird eine bestimmte Vergütung für die Abnahme des Stroms auf eine Dauer von 20 Jahren (§19,22) festgeschrieben, was die vergleichsweise hohen Investitionen in Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien kompensieren soll. Die Vergütungssätze hängen hierbei u.a. von der eingesetzten Technologie sowie von der Erreichung vordefinierter technologiespezifischer Ausbauziele ab. Die entstehenden Finanzierungslücken zwischen den Ausgaben für die gewährten Vergütungen und den Einnahmen durch den Verkauf des erzeugten Stroms werden dabei von den Stromkunden getragen. Die sogenannte EEG-Umlage wird einmal pro Jahr für das Folgejahr berechnet und beruht auf Prognosen der Übertragungsnetzbetreiber bezüglich des Baus von EEG-Anlagen, deren durchschnittlicher Vergütung sowie deren voraussichtlichen Produktionsstunden [22].

Seit der Einführung der EEG-Umlage existieren zahlreiche Ausnahmen, die z.B. stromintensive Unternehmen begünstigen um deren Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Mit der Novelle des EEG in 2012 stieg die Zahl der begünstigten Unternehmen von 603 in 2011 auf 1.691 in 2013 und 2.300 (Schätzung) in 2014 [22]. Daraus resultiert eine um 20% erhöhte EEG-Umlage, die als Ausgleich maßgeblich von anderen nicht-privilegierten Stromkunden getragen wird. Die Entwicklung der (reduzierten) EEG-Umlage für begünstigte Unternehmen über die einzelnen Novellen des Gesetzes hinweg ist in Abbildung 2.4 in Abhängigkeit des verbrauchten Stroms dargestellt. Die genauen Ausnahmeregelungen werden im Folgenden erklärt.

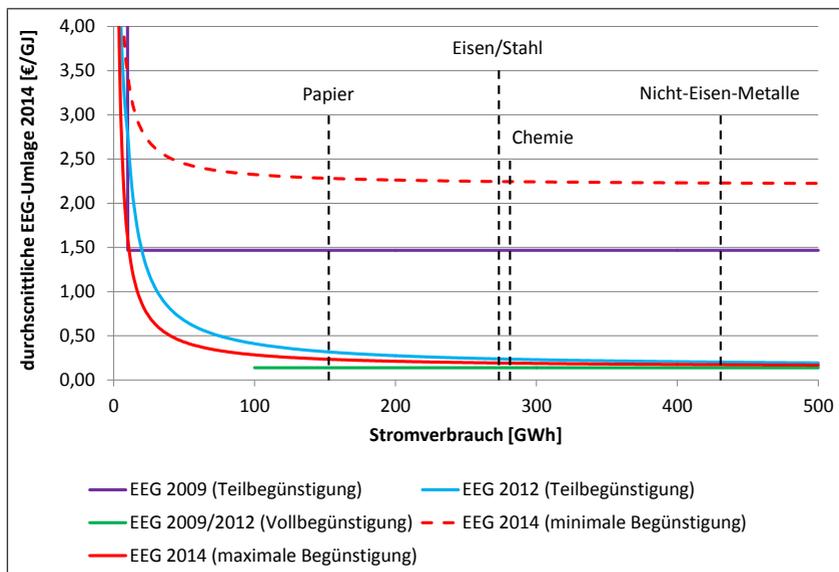


Abbildung 2.4.: Vergleich der durchschnittlich zu zahlenden EEG-Umlagen für begünstigte Unternehmen nach EEG 2009 [105], EEG 2012 [106] und EEG 2014 [107] (adaptiert von [247]). Als reguläre Umlage wurde ein Wert von 14,7 €/GJ (2014) herangezogen. Des Weiteren sind typische Stromverbrauchswerte ausgewählter Industrien dargestellt [247].

Nach dem EEG 2009 (§40,41) [105] lag die Möglichkeit einer Teilbegünstigung von Unternehmen ab einem Stromkostenanteil von 15% bezogen auf die Bruttowertschöpfung und ab einem Stromverbrauch von mindestens 10 GWh vor. Die EEG-Umlage wurde bei Einhaltung dieser Voraussetzungen um 90% reduziert. Vollbegünstigte Unternehmen, deren Stromkostenanteil mindestens 20% und deren Stromverbrauch mindestens 100 GWh betragen musste, zahlten eine reduzierte Umlage von 0,14 € pro GJ.

Mit der Novelle in 2012 (§41) [106] wurde die Regelung für vollbegünstigte Unternehmen beibehalten und die für teilbegünstigte ausgeweitet. Neben einer geringfügigen Reduzierung der Schwelle auf 14% Stromkostenanteil an der Bruttowertschöpfung mussten teilbegünstigte Unternehmen im Sinne eines Stufensystems für die erste GWh die volle EEG-Umlage bezahlen, ab der ersten nur noch 10% und ab der zehnten lediglich 1%. Für den Anteil des Stromverbrauchs, der über 100 GWh lag, betrug die EEG-Umlage analog zu den vollbegünstigten Unternehmen 0,14 € pro GJ.

Die jüngste Novelle des EEG in 2014 (§64) [107] sieht eine differenziertere Behandlung begünstigter Unternehmen vor. Der für eine Begünstigung maßgebliche Stromkostenanteil an der Bruttowertschöpfung liegt für Branchen nach Liste 1 (Bsp.: Metallherstellung) bei 16%¹⁵, für Branchen nach Liste 2 (Bsp.: Herstellung von Kleidung) hingegen bei 20%. Weiterhin wird die maximale zu zahlende EEG-Umlage für begünstigte Unternehmen ab der ersten GWh auf 15% und die minimale Umlage auf 0,14 €/GJ für besonders stromintensive sowie auf 0,28 €/GJ für alle anderen Industrien begrenzt. Innerhalb dieser Grenzen, die auch in Abbildung 2.4 dargestellt sind, entspricht die EEG-Umlage 0,5% der Bruttowertschöpfung des Unternehmens, insofern der Stromkostenanteil größer als 20% ist und 4%, insofern der Anteil kleiner als 20% ist.

Während sich die Reduktion der EEG-Umlage für besonders stromintensive Unternehmen (Vollbegünstigung) über die einzelnen Novellen des EEG hinweg nur geringfügig geändert hat, zeichnen sich bei den teilbegünstigten Unternehmen deutlichere Unterschiede ab. So lässt sich bezüglich der EEG-Novelle in 2012 feststellen, dass die durchschnittliche EEG-Umlage teilbegünstigter Unternehmen mit zunehmendem Stromverbrauch deutlich geringer als zuvor im EEG 2009 war. Die jüngste Novelle in 2014 hingegen

¹⁵ Ab 2016 liegt der im EEG 2014 für eine Begünstigung vorgeschriebene Stromkostenanteil an der Bruttowertschöpfung dieser Branchen bei 17%.

sieht wiederum eher eine Anhebung der EEG-Umlage vor, wobei diese deutlich differenzierter, abhängig von der Bruttowertschöpfung erfolgt. Das Umweltbundesamt hebt hervor, dass durch die moderate Anhebung der Eintrittsschwelle in die besonderen Ausnahmeregelungen der Kreis der begünstigten Unternehmen nicht weiter wächst [294]. Typische Stromverbrauchswerte einzelner stromintensiver Industrien, wie der Papier-, Eisen- und Stahl-, Chemie- und Nicht-Eisen-Metall-Industrie, welche ebenfalls in Abbildung 2.4 dargestellt sind und häufig die Ausnahmeregelungen für eine Vollbegünstigung erfüllen, zeigen, dass die minimal zu zahlende EEG-Umlage (maximale Begünstigung) für hohe Stromverbrauchswerte nahezu unverändert geblieben ist. Gemäß des EEG 2014 erfüllt von den dargestellten Industrien jedoch nur noch die Nicht-Eisen-Metall-Industrie die Kriterien für eine maximale Begünstigung (0,14 €/GJ), während die anderen dargestellten Industrien ihre EEG-Umlage höchstens auf 0,28 € pro GJ reduzieren können.

Insgesamt lässt sich auch für die EEG-Umlage, die neben ihrer Finanzierungswirkung ebenfalls Anreize zu einer Reduktion des Stromverbrauchs setzen kann, konstatieren, dass deren Lenkungswirkung auf Grund zahlreicher Ausnahmen analog zum Zertifikatehandel und der Ökosteuern umstritten ist. Eine Reduktion des Stromverbrauchs senkt dabei letztlich nicht die Treibhausgasemissionen der Stromverbraucher, sondern der Stromerzeuger, was verdeutlicht, dass zur Bewertung der durch klimapolitische Instrumente induzierten Wirkungen ein Wertschöpfungsketten-übergreifender Ansatz notwendig ist.

2.2.6. Weitere klimapolitische Instrumente

Während der Emissionshandel als zentrales klimapolitisches Instrument weiter ausgebaut wurde und weiterhin werden soll [2], wird er von einer Vielzahl weiterer Instrumente, darunter auch das Erneuerbare-Energien-Gesetz sowie die Ökosteuern, flankiert. Die in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung [35] umfassen bspw. insgesamt 16 wichtige Maßnahmen. Darunter fallen u.a. das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), welches den Bau von KWK-Neuanlagen und Wärmenetzen fördert, das Erneuerbare-Energien-Wärmegegesetz (EEWärmeG), welches Pflichten für die Nutzung

erneuerbarer Energien bei Neubauten festlegt, die Erleichterung der Biogaseinspeisung, Förderprogramme zur energetischen Sanierung von Gebäuden oder die Umstellung der Kraftfahrzeug-Steuer auf CO₂-Basis. Diese Maßnahmen sind überwiegend sektor-spezifisch ausgerichtet, da sie bspw. nur die Haushalte oder aber nur den Verkehr betreffen.

Weitere im Bezug auf die Klimapolitik wichtige Konzepte gingen aus der IVU-Richtlinie hervor. Nach der Richtlinie 2008/1/EG über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung [245] sind industrielle und landwirtschaftliche Anlagen ab einer bestimmten Größe genehmigungspflichtig, wobei bestimmte Grenzwerte und Auflagen einzuhalten sind [159]. Damit liegt der Fokus dieser Richtlinie zwar auf den Schadstoff- und nicht auf den Treibhausgasemissionen, jedoch sind zwei Konzepte der IVU-Richtlinie bei der Bewertung klimapolitischer Instrumente von besonderem Interesse: die Anwendung der Definition der „besten verfügbaren Techniken“ (BVT) und die Initiierung des Europäischen Schadstoffemissionsregisters (EPER), welche beide im Folgenden in Anlehnung an Breun et al. [41] beschrieben werden. Die IVU-Richtlinie wurde inzwischen von der Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen [246] abgelöst.

Zu den Pflichten der Anlagenbetreiber zählen gemäß der IVU-Richtlinie wie auch der Richtlinie über Industrieemissionen die Anwendung der besten verfügbaren Techniken. Zudem orientiert sich die Festlegung der Grenzwerte an den BVT. Die BVT bezeichnen dabei „den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der bestimmte Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte und sonstige Genehmigungsaufgaben zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern“ [246]. Dies schließt auch Techniken zur Reduktion des Energieverbrauchs und damit von Treibhausgasemissionen ein. Die BVT werden für alle betroffenen Industriesektoren in einem Informationsaustausch zwischen den EU-Mitgliedsstaaten, der Industrie sowie Umweltverbänden erarbeitet und in sogenannten BVT-Merkblättern festgehalten („Sevilla-Prozess“) [231].

Weiterhin initiierte die IVU-Richtlinie die Veröffentlichung eines Verzeichnisses, welches relevante Informationen über die wichtigsten Emissionen

Tabelle 2.5.: Gesamtentlastungen der energieintensiven Industrie in Deutschland 2011 [Mio. €] nach Rieseberg und Wörten [247]

Ökosteuer	4.730
KWK-Umlage	4
EEG-Umlage	2.080
Zertifikatszuteilung	1.408
Gesamtentlastung	8.223

und Emissionsquellen der EU enthält [36]. Dieses Europäische Schadstoffemissionsregister [94] verzeichnet u.a. Informationen über den CO₂-Ausstoß einzelner genehmigungspflichtiger Anlagen und stellt damit eine wichtige Datenbasis dar. Das EPER wurde im Rahmen der Aarhus-Konvention im Jahre 2006 durch das internationale PRTR¹⁶-Protokoll bzw. die zugehörige EU-Verordnung E-PRTR-VO [307] abgelöst, wobei ein zusammenhängendes, landesweites System in Form einer strukturierten, computergestützten und öffentlich zugänglichen Datenbank vorgesehen war [36]. Für jeden im EPER oder PRTR aufgeführten Schadstoff wurden Schwellenwerte definiert, bei deren Überschreitung eine Anzeigepflicht besteht. Insofern kann dieses Konzept auch als suasorisches Instrument bezeichnet werden, da Transparenz bezüglich der Emissionen einzelner Anlagen gegenüber der Öffentlichkeit gewährt wird. Das Gesetz zur Ausführung des Protokolls über Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (SchadRegProtAG) [252] regelt auf deutscher Ebene sowohl die Übermittlung der Informationen für das deutsche Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister PRTR als auch für das europäische E-PRTR [36].

Die vorangegangenen Ausführungen (Abschnitte 2.2.3 bis 2.2.6) zeigen die teilweise sehr umfassenden Rechtskonstrukte der einzelnen klimapolitischen Instrumente auf. Dabei sind vor allem die zahlreichen Ausnahmeregelungen für energieintensive Industrien in Deutschland hervorzuheben. Die durch diese Ausnahmeregelungen bedingten Gesamtentlastungen des Jahres 2011 sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich die Gesamtentlastungen der energieintensiven Industrien in Deutschland auf etwa 8 Mrd. € belaufen, wobei die bezüglich der Energie- und Stromsteuer gewährten Ausnahmen den größten Anteil

¹⁶Pollutant Release and Transfer Register

stellen, gefolgt von der reduzierten EEG-Umlage und der kostenlosen Zuteilung von Zertifikaten im Rahmen des Emissionshandels. Die KWK-Umlage bedingt im Vergleich nur eine sehr geringe Entlastung und wird daher in dieser Arbeit nicht eingehender betrachtet. Den gewährten Entlastungen steht ein Großteil der nationalen Treibhausgasemissionen gegenüber, da die energieintensiven Industrien den größten Teil der Industrieemissionen bedingen (vgl. z.B. Abschnitt 2.1). Es stellt sich also die Frage, inwiefern diese Entlastungen in Anbetracht ambitionierter Klimaschutzziele in Zukunft noch tragfähig sind. Um dies zu beantworten erscheint es naheliegend, die energieintensiven Industrien hinsichtlich ihrer technischen Möglichkeiten zur Emissionsminderung sowie hinsichtlich der wirtschaftlichen Tragfähigkeit möglicher Anpassungen der Klimapolitik zu untersuchen. Dies soll stellvertretend für die Metallerzeugung durchgeführt werden, da diese in Deutschland den größten Teil der industriellen Treibhausgase verursacht, darüber hinaus von allen in den Abschnitten 2.2.3 bis 2.2.5 analysierten Entlastungstatbeständen profitiert und zudem unter einem erhöhten internationalen Wettbewerbsdruck steht.

2.3. Metallerzeugung in Deutschland

Gemäß dem Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken [62] fallen unter die Kategorie „Metalle und Halbzeuge daraus“ neben Eisen und Stahl auch die Nicht-Eisen-Metalle (NE-Metalle) Aluminium, Kupfer, Blei und Zink sowie 26 weitere NE-Metalle. Abbildung 2.5 zeigt die in Deutschland von 2008 bis 2012 produzierten Metalle nach Menge und Wert auf.

Es wird deutlich, dass die Rohstahlproduktion mit 95% bzw. 58% in 2012 den mengen- und wertmäßig größten Anteil der deutschen Metallproduktion stellt. Die Produktionsmengen der NE-Metalle liegen zwar signifikant darunter, deren Gesamtwert befindet sich jedoch durch den höheren Preis, welcher auch durch die Edelmetalle Gold, Silber und Platin beeinflusst wird, nahezu auf dem Niveau von Rohstahl. Darüber hinaus lässt sich in 2009 ein deutlicher Rückgang der Metallproduktion bedingt durch die Wirtschaftskrise feststellen, was zeigt, dass der Absatz von Halbzeugen der (rohstoffnahen) Metallindustrie sehr stark von der Nachfrage nach den Endprodukten abhängt. Diese finden sich vor allem im Fahrzeug-, im

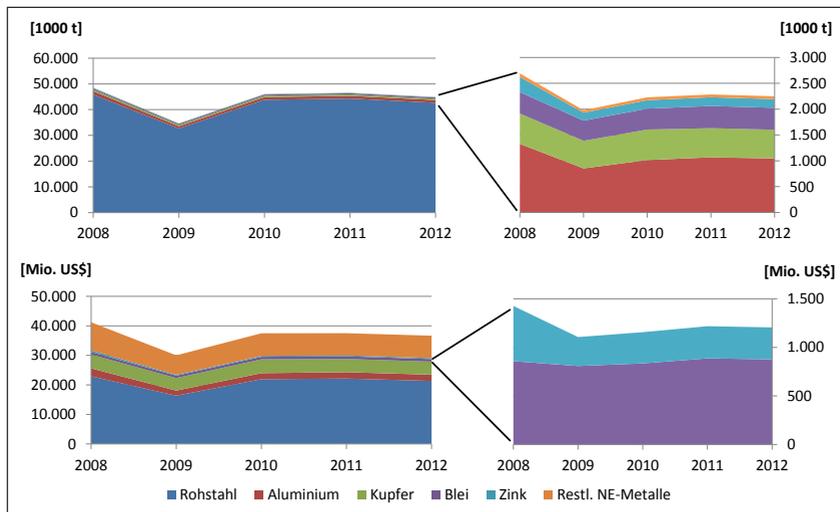


Abbildung 2.5.: Metallproduktion in Deutschland nach Menge und Wert, der Wert ergibt sich aus der Multiplikation der Mengen mit den Durchschnittspreisen aus 2012 (Datengrundlage: [152, 305]).

Maschinenbau sowie im Baugewerbe, deren Zyklen die Metallindustrie letztlich folgt [55]. Eine Anwendung der Methodik von Schintke [253], die die Wichtigkeit einzelner Sektoren einer Volkswirtschaft als Liefer- oder Bezugssektoren hinsichtlich deren Einfluss auf die Bruttoproduktion berechnet, auf die Input-Output-Tabelle¹⁷ von 2007 zeigt, dass ein Ausfall der Sektoren „NE-Metalle und Halbzeug daraus“ und „Roheisen, Stahl, Rohre und Halbzeug daraus“ die Bruttoproduktion aller anderen Sektoren am meisten beeinflussen würde, wodurch beide Sektoren als wichtigste Liefersektoren in Deutschland klassifiziert werden können.

Trotz der Bedeutung der deutschen Metallerzeugung und -bearbeitung auf europäischer Ebene (Umsatzanteil in 2012 etwa 30%), spielt diese auf internationaler Ebene nur eine untergeordnete Rolle (Umsatzanteil 3,3%) [55]. Dies resultiert vor allem aus der in den letzten Jahren stark zunehmenden Produktion in China, die 2002 noch ca. 12,5% des weltwei-

¹⁷Für eine Einführung in die Input-Output-Rechnung vgl. Kapitel 4.

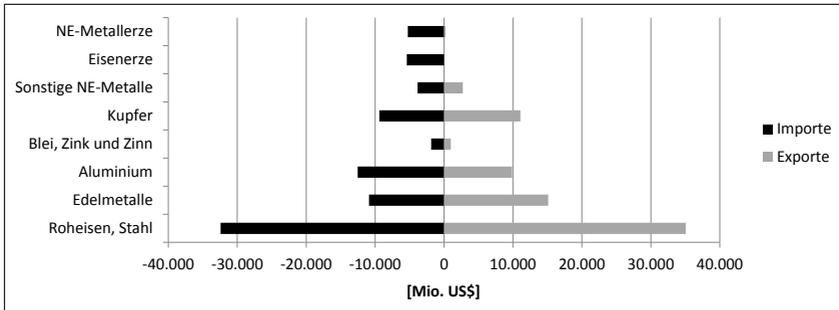


Abbildung 2.6.: Importe und Exporte von Erzen und Metallen inkl. Halbzeugen in Deutschland 2012 (Datengrundlage: [74]).

ten Umsatzes stellte und zehn Jahre später bei 45,5% lag. Aufgrund der inzwischen vorhandenen Überkapazitäten und der daraus resultierenden Wettbewerbsintensität spezialisieren sich viele deutsche Metallerzeuger und -verarbeiter und werden zu Anbietern von Spezialprodukten, was einer Verlängerung der Wertschöpfungskette gleichkommt [55]. Bezüglich der internationalen Wettbewerbsintensität muss jedoch zwischen der Eisen- und Stahlindustrie sowie der NE-Metallerzeugung differenziert werden. Während für erstere auf Grund hoher Transportkosten von Eisen und Stahl die Produktionsmenge maßgeblich vom Binnenmarkt abhängt, handelt es sich bei der NE-Metallindustrie eher um globale Absatzmärkte, da vor allem die äußerst hohe Stromintensität vieler Prozesse zur NE-Metall-Gewinnung ein wichtiger Standortfaktor ist [102]. Hochwertige und anwendungsspezifische Halbzeuge aus Stahl bilden dabei eine Ausnahme und werden ebenfalls verstärkt international gehandelt. Die Bedeutung des Außenhandels der Metallerzeugung und -verarbeitung veranschaulicht Abbildung 2.6.

Während Metalle und ihre Halbzeuge in ungefähr gleichem Umfang importiert und exportiert werden, werden die zu ihrer Herstellung notwendigen Erze fast ausschließlich aus anderen Ländern bezogen, da bspw. Eisenerz in Deutschland kaum mehr gefördert wird (444.000 t in 2012 [152]). Die Hauptlieferanten für Eisenerz sind dabei Brasilien (34% aller Metallerze), Schweden und Kanada, für NE-Metalle Peru, Australien, Südafrika, Argentinien und Chile [74]. Prinzipiell liegt bezüglich des Eisenerzes eine

oligopolistische Anbieterstruktur vor (die drei führenden Rohstoffkonzerne haben zusammen einen Marktanteil von etwa 70%) [55], was tendenziell zu höheren Rohstoffpreisen führt.

Die dargestellten nationalen und internationalen Entwicklungen zeigen die Rahmenbedingungen auf, denen sich die deutsche Metallindustrie gegenüber sieht. Zum einen fordern die gestiegene Wettbewerbsintensität sowie die Abhängigkeit von importierten Rohstoffen eine effiziente Produktion, zum anderen gilt es die gesteckten klimapolitischen Ziele (vgl. Abschnitt 2.1) zu erreichen. Inwiefern dabei klimapolitische Instrumente hilfreich oder kontraproduktiv sind, soll in dieser Arbeit erörtert werden. Dabei stehen die Eisen- und Stahlindustrie (Abschnitt 2.3.1), welche die höchsten Produktionsmengen und Treibhausgasemissionen der deutschen metallerzeugenden Industrien aufweist, sowie die Aluminiumindustrie (Abschnitt 2.3.2), welche durch den besonders hohen Stromverbrauch vor allem indirekte Emissionen bei der Stromerzeugung verursacht, im Fokus. Aus Abbildung 2.7 geht hervor, dass beide Industrien zusammen etwa 77% der CO₂-Emissionen der deutschen Metallerzeugung und -bearbeitung¹⁸ bedingen, wobei hierfür lediglich 46 Werke verantwortlich sind und 10 Werke bereits 69% der CO₂-Emissionen verursachen. Die überschaubare Anzahl relevanter Werke zeigt die Möglichkeit auf, die durch klimapolitische Instrumente induzierten Auswirkungen werkspezifisch quantifizieren zu können, was deutlich genauere Aussagen als eine rein sektorale Betrachtungsweise zulässt.

Bevor die (zukünftigen) Effekte klimapolitischer Instrumente quantifiziert werden können, ist es notwendig die gegebenen Produktionsstrukturen der betrachteten Industrien hinreichend genau zu modellieren, um Reduktionspotenziale und ökonomische Auswirkungen beziffern zu können. Dies erfolgt in Kapitel 5, zunächst wird jedoch ein Überblick über die zu berücksichtigenden Besonderheiten der Eisen- und Stahl- sowie der Aluminiumindustrie gegeben.

¹⁸In Abbildung 2.7 wurden die Sektoren Metalle, Metallerzeugnisse sowie Kokereierzeugnisse zusammengefasst. Letztere bilden ein wichtiges Vorprodukt der Roheisenherstellung.

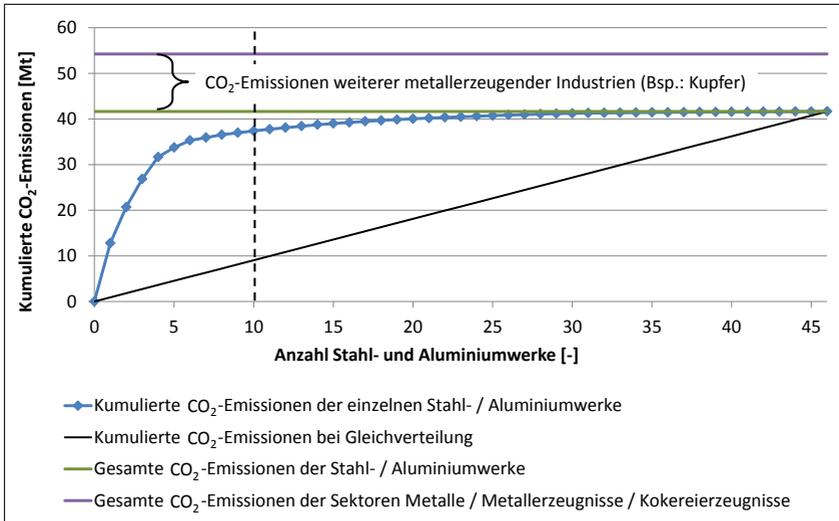


Abbildung 2.7.: Verteilung der CO₂-Emissionen auf die deutschen Stahl- und Aluminiumwerke (ohne Industriekraftwerke) mit Werten aus [73, 104] (Die aufgezeigten Werke sind dadurch gekennzeichnet, dass sie mindestens Rohstahl oder Rohaluminium herstellen und nicht nur weiterverarbeiten, somit sind in den CO₂-Emissionen der weiteren metallischerzeugenden Industrien auch Stahl oder Aluminium weiterverarbeitende Betriebe enthalten).

2.3.1. Die Eisen- und Stahlindustrie

In 2012 wurden deutschlandweit insgesamt 36,5 Mio. t warmgewalzte Stahlerzeugnisse hergestellt [332], die als Halbzeuge zur Weiterverarbeitung in nachgelagerten Wertschöpfungsstufen, z.B. im Fahrzeug-, Maschinenbau oder Baugewerbe, eingesetzt werden können. Unter diese fallen 12,8 Mio. t Langerzeugnisse sowie 23,7 Mio. t Flacherzeugnisse [332]. Die Langerzeugnisse umfassen z.B. Walzdraht oder Stabstahlprofile, während die Flacherzeugnisse u.a. Warmbreitband und Blech enthalten. Teilweise werden diese Halbzeuge in zusätzlichen Schritten weiterbearbeitet, um deren Eigenschaften zu verändern, z.B. durch Kaltwalzen oder Beschichten (vgl. folgenden Abschnitt). Des Weiteren wurden in 2012 insgesamt 3,1 Mio. t Rohre hergestellt. Neben den genannten Erzeugnissen existiert weiterhin

der Bereich der Gussteilproduktion, wobei hier eine sehr große Bandbreite an möglichen Formen und Abmessungen der Endprodukte existiert.

Im Wesentlichen werden bei der Eisen- und Stahlproduktion zwei Verfahrensrouten unterschieden, die sich gegenseitig ergänzen: die Hochofen- bzw. Primärroute (Oxygenstahl) und die Elektrostahlroute, bei welcher vor allem Schrott recycelt wird [49]. In Deutschland produzierten in 2010 acht Oxygenstahlwerke 30,6 Mio. t Oxygenstahl (69,8%) und 20 Elektrostahlwerke 13,2 Mio. t Elektrostahl (30,2%) [125]. Beide Herstellungsverfahren werden im Folgenden genauer beschrieben. Darüber hinaus existieren zwei weitere international praktizierte Verfahren, die Direktreduktion sowie die Schmelzreduktion [124]. Während in Deutschland derzeit lediglich ein Werk direkt reduziertes Eisen als Inputstoff nutzt, existieren in Europa keine Werke, die das relativ neue Verfahren der Schmelzreduktion kommerziell nutzen [100]. Auf die beiden letztgenannten Verfahren wird daher im Folgenden kein Bezug genommen.

2.3.1.1. Eisen- und Stahlproduktion über die Hochofenroute

Die Herstellung von Walzstahl in einem integrierten Hüttenwerk (Primärroute) ist im Wesentlichen durch fünf Prozessschritte (1)-(5) gekennzeichnet, die durch jeweils einen bestimmten Anlagentyp repräsentiert werden. Die Identifizierung und Erläuterung dieser folgt dabei [20, 95, 100, 243] und [241]. Der Hochofen (1) bildet die zentrale Anlage der Primäreisenerzeugung. Dort wird aus oxidischen Eisenträgern unter Zufuhr des Reduktionsmittels Koks Roheisen erzeugt. In der Regel handelt es sich bei dem Eisenträger um Erze, die zunächst in einer Sinteranlage (2) durch das Stückigmachen der Feinanteile vorbereitet werden. Koks, als zweiter wichtiger Inputstoff des Hochofens, wird in der Kokerei (3) aus Kohle durch Wärmezufuhr unter Sauerstoffausschluss erzeugt. Weiterhin findet Koks auch als Brennstoff in der Sinteranlage Einsatz. Durch das Oxidieren des im Roheisen enthaltenen Kohlenstoffs (Frischen) und weiterer unerwünschter Begleitstoffe im Konverter (4) entsteht schließlich Rohstahl, der in den nachfolgenden sekundärmetallurgischen Schritten veredelt und anschließend zu Halbzeugen vergossen wird. Letztere werden im Walzwerk (5) zu den gewünschten Endprodukten weiterverarbeitet, wobei nicht nur

formgebende Verfahren Anwendung finden, sondern ebenfalls die Eigenschaften durch bspw. Beschichten oder Beizen beeinflusst werden. Eine weitere wichtige Anlage stellt das Kraftwerk dar, in welchem die Energie der überschüssigen Prozessgase zur Stromerzeugung verwendet wird.

Diese Prozess- bzw. Kuppelgase entstehen als Nebenprodukte in der Kokerei, dem Hochofen und dem Konverter und weisen sehr unterschiedliche stoffliche Zusammensetzungen und Energiegehalte auf. Dadurch werden in der Regel Gemische dieser Gase in den beschriebenen Prozessschritten zur Energiebereitstellung verwendet, deren Zusammensetzung jedoch abhängig vom Anlantyp, in dem sie eingesetzt werden, variieren kann. Zusammengefasst zeigt Abbildung 2.8 die aggregierten Stoff- und Energieflüsse auf, die zwischen den Anlagen eines integrierten Hüttenwerks zu berücksichtigen sind.

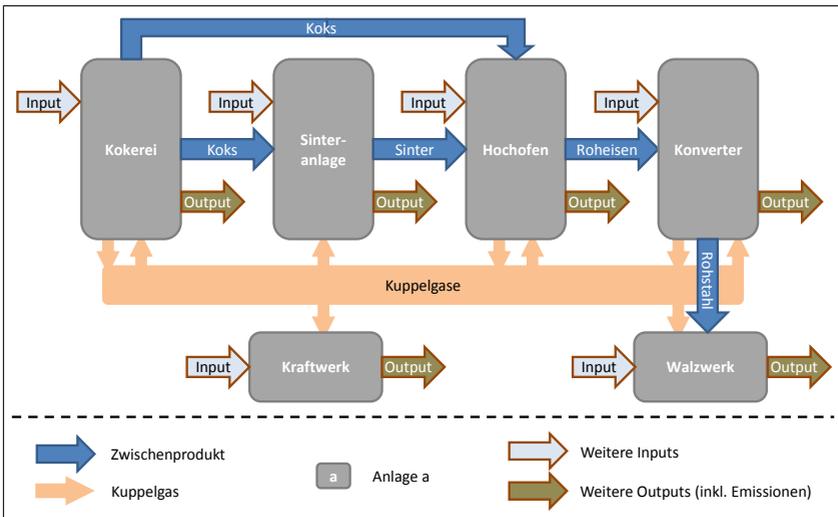


Abbildung 2.8.: Stoff- und Energieflüsse zwischen den Anlagen eines integrierten Hüttenwerks

Die obigen Ausführungen verdeutlichen, dass die einzelnen Anlagenteile hinsichtlich ihres Energiemanagements stark voneinander abhängen. Der spezifische Energieverbrauch eines integrierten Hüttenwerks liegt dabei

bei etwa 15-18 GJ pro Tonne Rohstahl [100, 124], was die Bedeutung der Identifizierung von Effizienzpotenzialen hervorhebt. Zur Optimierung der Energieeffizienz ist es zielführend, dass jedes Brenngas in der am besten geeigneten Anlage eingesetzt wird (vgl. BVT-Merkblatt [100]). Des Weiteren gilt es die Abwärme der einzelnen Prozesse möglichst effizient zu nutzen. Da jedes Hüttenwerk durch unterschiedliche Prozesse, Kapazitäten, Produktionsmengen und Energieflüsse charakterisiert ist, kann die Berechnung möglicher Einsparpotenziale hinsichtlich Energie und Treibhausgasen im Endeffekt nur werksspezifisch erfolgen, was deshalb auch in dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz zur Bewertung klimapolitischer Instrumente verfolgt wird.

2.3.1.2. Stahlproduktion über die Elektrostahlroute

Zur Herstellung von Walzstahl in einem Elektrostahlwerk sind deutlich weniger Verfahrensschritte als bei der Hochofenroute notwendig. Die Erläuterung des Verfahrens folgt [159, 258] und [100]. Den wichtigsten Rohstoff stellt eisenhaltiger Schrott dar, der im Stahlwerk selbst anfallen kann oder aber am Ende des Produktlebenszyklus zurückgeführt und recycelt wird. Direkt reduziertes Eisen stellt ebenfalls einen möglichen Einsatzstoff dar. In einigen Fällen wird der Schrott zunächst vorgewärmt, bevor er in den Elektrolichtbogenofen aufgegeben wird. Darauf folgend werden Graphitelektroden in den Schrott abgesenkt und ein Lichtbogen gezündet, welcher die notwendige Wärme zum Schmelzen des Schrottes liefert. Es wird somit also hauptsächlich elektrische Energie benötigt. Darüber hinaus werden häufig unterstützend Sauerstoff-Brennstoff-Brenner (Oxy-Fuel-Brenner) eingesetzt. Auch hier folgen sekundärmetallurgische Schritte, wie bspw. das Legieren, um die Eigenschaften des Stahls zu beeinflussen. Das Verfahren endet, ähnlich wie bei der Primärroute, mit dem Gießen und dem Walzen des Endprodukts. Insgesamt ist der Prozess durch zwei wesentliche Anlagentypen charakterisiert, den Elektrolichtbogenofen (1) und das Walzwerk (2).

Die Qualität des Endprodukts hängt bei diesem Verfahren stark von der Qualität des eingesetzten Schrottes ab, der in der Regel bereits Legierungselemente enthält und dessen Verfügbarkeit letztlich den Einsatz dieses Verfahrens determiniert. Da keine Reduktion von oxidischen Eisenträgern

notwendig ist, geht das Recycling von Stahl in einem Elektrolichtbogenofen mit einem deutlich geringeren spezifischen Energieverbrauch im Vergleich zur Hochofenroute einher. Typische Werte liegen im Bereich von 1,8-2,4 GJ pro Tonne Rohstahl [100, 258]. Auch hier gilt es, Effizienzpotenziale zu identifizieren, da vor allem indirekte Emissionen durch die Bereitstellung des Stroms entstehen.

2.3.1.3. Treibhausgasemissionen der Eisen- und Stahlproduktion

Die obigen Erläuterungen zeigen, dass die Herstellung von Eisen- und Stahl mittels der aufgeführten Prozesse mit einem sehr hohen Energieverbrauch einhergeht, was letztlich die hohen Treibhausgasemissionen dieses Sektors bedingt. Die drei Hauptfaktoren der Entstehung von CO₂-Emissionen sind (vgl. BVT-Merkblatt der Eisen- und Stahlerzeugung [100])

- die Bereitstellung der für die chemischen Reaktionen und physikalischen Bearbeitungen notwendigen Temperatur,
- die Bereitstellung eines Reduktionsmittels (in der Regel CO) zur Reduktion des Eisenoxids sowie
- die Bereitstellung von Elektrizität und Dampf, welche für eine Vielzahl an Prozessen benötigt werden.

Diese Emissionen fallen dabei in den verschiedenen oben erläuterten Prozessschritten an. Abbildung 2.9 zeigt die Treibhauspotenziale der Herstellung von Walzstahl für die Hochofen- und Elektrostahlroute im Vergleich. Die angegebenen Werte beruhen auf Daten der ecoinvent-Datenbank und beziehen sämtliche Vorketten im Sinne einer Ökobilanz¹⁹ mit ein. Sie sind als Durchschnittswerte der europäischen Produktion zu verstehen.

Bezüglich der Hochofenroute geht die Produktion des Roheisens im Hochofen mit den höchsten CO₂-Emissionen einher und stellt damit einen großen Teil des Treibhauspotenzials (37%). Dies ist primär durch die Verwendung von Koks als Reduktionsmittel bedingt. Weiterhin sind die CO₂-Emissionen der Sinteranlage (13%), die hauptsächlich aus dem Einsatz

¹⁹Für eine kurze Einführung in die Ökobilanz bzw. in die Lebenszyklusanalyse (Life-Cycle-Assessment, LCA) sei der Leser auf Kapitel 3 verwiesen.

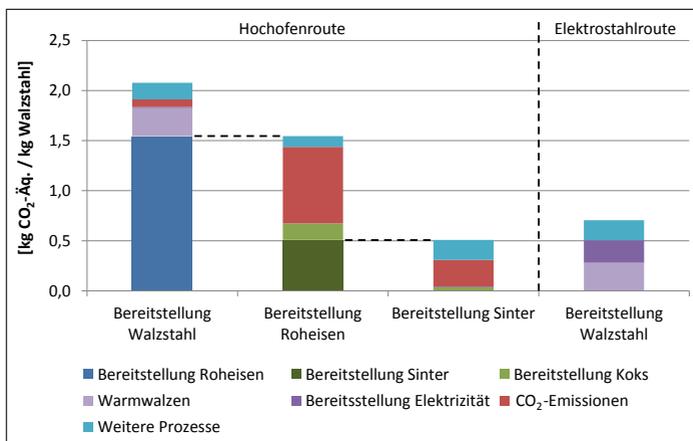


Abbildung 2.9.: Treibhauspotenzial der Walzstahlproduktion inklusive aller Vorketten in einem Bezugszeitraum von 100 Jahren (Datengrundlage: [52]).

von Koks als Brennstoff resultieren, sowie der Prozessschritt des Warmwalzens (13%), bei dem Erdgas als Brennstoff im Vordergrund steht, relevant. Die Bereitstellung des Kokes für den Hochföfen- und den Sinterprozess repräsentiert weitere 10% des Treibhauspotenzials, wobei im Wesentlichen die Bereitstellung der Kohle für die Verkokung dieses Treibhauspotenzial beeinflusst. Die beim Frischen im Konverter entstehenden CO₂-Emissionen bedingen weitere 4%. Alle restlichen Prozesse, unter die die Bereitstellung sämtlicher, hier nicht genauer spezifizierter Vorprodukte sowie auch Transportprozesse fallen, verursachen insgesamt 24% des Treibhauspotenzials der Walzstahlherstellung. Das gesamte Treibhauspotenzial beläuft sich auf insgesamt 2,1 t CO₂-Äquivalente pro t Walzstahl und liegt damit um etwa das Dreifache höher als das Treibhauspotenzial bei Verwendung der Elektrostahlroute (0,7 t CO₂-Äq./t Walzstahl).

Bezüglich der Elektrostahlroute entfallen 40% des Treibhauspotenzials auf das Warmwalzen, 32% auf die Bereitstellung der Elektrizität zum Schmelzen des Schrottes und 28% auf alle weiteren Prozesse. Die Treibhausgasemissionen und -potenziale einzelner Werke können von diesen Werten abweichen, da die in der Ökobilanz verwendeten Werte lediglich

den europäischen Durchschnitt angeben und somit unabhängig von der spezifischen Anlagenkonfiguration sind. Wie oben bereits erläutert, hat bspw. das standortspezifische Energiemanagement einen großen Einfluss auf die entstehenden Emissionen eines integrierten Hüttenwerks.

Der CO₂-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie [125] sowie das statistische Jahrbuch der Stahlindustrie [332] weisen die Entwicklung der Energieeffizienz und der CO₂-Emissionen der deutschen Stahlindustrie der letzten Jahre aus. Während die spezifischen primärenergiebedingten CO₂-Emissionen in 1990 unter Berücksichtigung des (primärenergetisch bewerteten) Stromverbrauchs noch 1,89 t CO₂ pro t Stahlfertigerzeugnis²⁰ betragen, lagen diese in 2012 bei 1,50 t CO₂/t Stahlfertigerzeugnis (-21%). Der Primärenergieverbrauch zeigt eine ähnliche Entwicklung und sank von 24,38 GJ/t Stahlfertigerzeugnis im Jahr 1990 auf 19,72 GJ/t Stahlfertigerzeugnis im Jahr 2012 (-19%). Beide Verläufe weisen jedoch einen degressiv fallenden Trend auf, was vermuten lässt, dass zukünftige Energie- und Emissionseinsparungen schwieriger zu realisieren sind.

Eine Studie des Fraunhofer ISI [258] mit einem Zeithorizont bis 2035 beziffert das zukünftige Energieeinsparpotenzial der gesamten Stahlindustrie auf 5 bis 15%²¹. Jedoch kritisieren das Stahlinstitut VDEh²² und die Wirtschaftsvereinigung Stahl, dass Teile dieses Potenzials aus einer angenommenen Verschiebung der Produktionsmengen hin zur Elektrostahlroute resultieren und daher nicht als Effizienzverbesserung im engeren Sinne einzuordnen sind [268]. Weiterhin bezeichnen sie die aus der Studie hervorgehenden Einsparoptionen als „quantitativ deutlich übergewichtet“. Dieser Umstand zeigt die Notwendigkeit auf, die zukünftigen Einsparpotenziale detailliert zu analysieren, was auch als wichtiges Ziel dieser Arbeit gilt.

2.3.1.4. Wirtschaftlichkeit der deutschen Eisen- und Stahlindustrie

Neben den technischen Treibhausgasreduzierungs- und Emissionsminderungspotenzialen der betrachteten Industrien sind auch die wirtschaftlich realisierbaren Emissionseinspa-

²⁰Stahlfertigerzeugnis: Warmgewalzte Lang- und Flachprodukte, nahtlose Stahlrohre und Schmiedefertigerzeugnisse [332].

²¹Die Modellrechnungen liefern bspw. ein wirtschaftliches Einsparpotenzial bis 2035 von 19% für Strom und von 10% für Brennstoffe [258].

²²Verein Deutscher Eisenhüttenleute

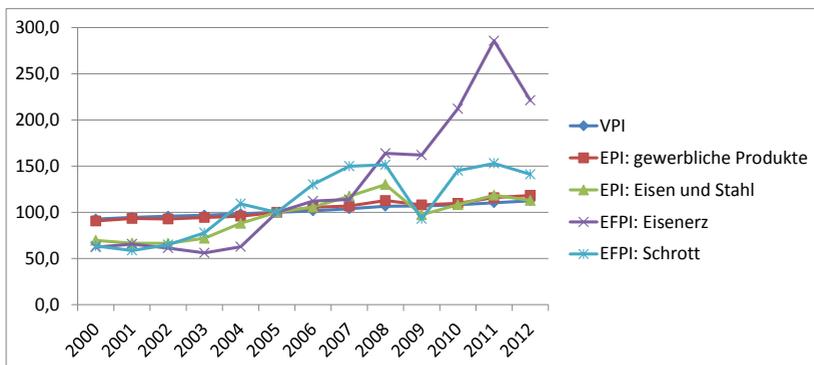


Abbildung 2.10.: Entwicklung des Verbraucherpreisindex (VPI) sowie ausgewählter Erzeugerpreisindizes (EPI) und Einfuhrpreisindizes (EFPI) (Datengrundlage: [332], 2005=100).

rungen für eine Bewertung klimapolitischer Instrumente heranzuziehen. Hierzu wird an dieser Stelle ein kurzer Überblick über die wirtschaftliche Entwicklung der Eisen- und Stahlindustrie gegeben. Aus Abbildung 2.10 wird bspw. ersichtlich, dass der Erzeugerpreisindex von Eisen und Stahl in den letzten Jahren deutlich schneller als der Verbraucherpreisindex und der Erzeugerpreisindex gewerblicher Produkte angestiegen ist und zudem volatiler war. Begründet liegt dies unter anderem in einem signifikanten Anstieg der Preise importierter Rohstoffe, was an dem Anstieg der Einfuhrpreisindizes für Eisenerz und Schrott zu erkennen ist. Die relative Verteuerung von Eisen- und Stahlprodukten gegenüber dem Erzeugerpreisindex gewerblicher Produkte zeigt die Wichtigkeit der Realisierung zukünftiger Kosteneinsparungen im Vergleich zu vielen anderen Industrien.

Die in einem Sektor erzielbaren Gewinne stellen ein Maß für den Wettbewerbsdruck dar. Ein Vergleich des Nettobetriebsüberschusses der Metallerzeugung und -bearbeitung mit dem verarbeitenden Gewerbe weist deutliche Diskrepanzen auf. Nach Inflationsbereinigung unter Verwendung des Verbraucherpreisindex und Normierung des Nettobetriebsüberschusses auf 2005 zeigt sich beim verarbeitenden Gewerbe eine Zunahme um ca. 29% in 2012 gegenüber 2005 und bei der Metallerzeugung und -bearbeitung

ein Rückgang um ca. 34% (vgl. z.B. [77]), was vermuten lässt, dass der Konkurrenzdruck hier keine höheren Gewinne zulässt (das Produktionsniveau der Metallerzeugung ist in den letzten Jahren relativ stabil geblieben, vgl. Abschnitt 2.3). Die zukünftige Entwicklung der Gewinne ist somit bei einer Bewertung klimapolitischer Instrumente zu berücksichtigen, da unprofitable Werke langfristig die Produktion einstellen würden.

2.3.2. Die Aluminiumindustrie

Im Jahre 2013 wurden deutschlandweit 2,49 Mio. t Halbzeuge aus Aluminium, unter die Walzprodukte, Strangpressprodukte, Drähte und Schmiedeteile fallen [166], sowie 0,89 Mio. t Aluminiumformguss hergestellt [333]. Ein Vergleich mit den 1,09 Mio. t produzierten Rohaluminiums (s. auch Abschnitt 2.3) verdeutlicht den hohen Importanteil von Rohaluminium zur Weiterverarbeitung. Die Hauptverwendungsgebiete von Aluminium finden sich mit einem Anteil von 47% im Verkehr (Fahrzeuge), mit 14% im Bauwesen und mit 10% in der Verpackungsindustrie [333].

Auch für die Aluminiumindustrie lassen sich analog zur Eisen- und Stahlindustrie im Wesentlichen zwei Verfahren unterscheiden, eine Primär- und eine Sekundärroute. In 2013 wurden 0,49 Mio. t Aluminium aus Erz (Anteil 45%) sowie 0,60 Mio. t recyceltes Aluminium (Gusslegierungen, Anteil 55%) produziert [333], was den hohen Recyclinganteil der deutschen Aluminiumindustrie verdeutlicht. Problematisch zeigt sich hierbei jedoch die statistische Erfassung des im Produktionszyklus wieder eingeschmolzenen Neuschrotts aus der Primärproduktion (Knetlegierungen), der teilweise nicht erfasst, teilweise aber auch der Primär- oder aber der Sekundärproduktion zugeordnet wird. Schätzungen der OEA²³ zu Folge werden deutschlandweit ca. 1 Mio. t Knetlegierungen (Stand 2004) aus sekundären Vorstoffen hergestellt [166]. Insgesamt wird die Produktion derzeit von vier Primäraluminiumhütten sowie 14 Refinern (Stand 2007) zur Herstellung von Gusslegierungen getragen [219]. Darüber hinaus existieren 21 Remelter (Stand 1998) zu Herstellung von Knetlegierungen [166].

²³OEA: Organisation of the European Aluminium Recycling Industry

2.3.2.1. Produktion von Primäraluminium

Die Herstellung von Primäraluminium ist im Wesentlichen durch fünf Prozessschritte (1)-(5) gekennzeichnet, welche [79, 101, 187, 235] und [166] folgend an dieser Stelle kurz erläutert werden. Zunächst wird aus dem Rohstoff Bauxit das auch als Tonerde bezeichnete Aluminiumoxid extrahiert, wozu überwiegend das Bayer-Verfahren (1) mit anschließender Kalzination zum Einsatz kommt. In diesem Verfahren wird das Bauxit mit Hilfe von Natronlauge aufgeschlossen und das entstehende Aluminiumhydroxid in der nachgeschalteten Kalzination zu Aluminiumoxid umgewandelt. Für die sich anschließende Schmelzflusselektrolyse (2) werden weiterhin Anoden benötigt, welche überwiegend in einem separaten vorgelagerten Prozessschritt (3) aus Pech, Petrolkoks und Anodenresten gemischt und vorgebrannt werden. In der eigentlichen Schmelzflusselektrolyse wird das Aluminiumoxid nach dem Prinzip von Hall-Héroult in geschmolzenem Kryolith gelöst, welches als Elektrolyt dient. Durch das Anlegen einer Gleichspannung zwischen (vorgebrannter) Anode und Kathode spaltet sich die Tonerde in Aluminium und Sauerstoff (Reduktion), wobei sich ersteres an der Kathode abscheidet, sich am Boden der Elektrolysezelle sammelt und als flüssiges Aluminium abgesaugt werden kann. Durch die Reaktion der Kohlenstoffanoden mit Sauerstoff, was mit der Bildung von CO_2 einhergeht, werden diese verbraucht und müssen ersetzt werden. Ähnlich wie bei der Stahlproduktion können im Anschluss Legierungselemente dem flüssigen Aluminium zugesetzt werden, bevor dieses vergossen wird (4). Bei der Primärproduktion werden vornehmlich plastisch verformbare Knetlegierungen hergestellt, die durch Walzen, Strangpressen, Ziehen oder Schmieden (5) zu Halbzeugen weiterverarbeitet werden.

Charakteristisch für die Produktion von Hüttenaluminium ist der sehr hohe Strombedarf der Elektrolyse. In Abhängigkeit von der eingesetzten Technik liegt dieser zwischen 12,9 und 18,3 MWh/t Rohaluminium [235], bei Verwendung von vorgebrannten Anoden in der am weitesten verbreiteten PFPB²⁴-Elektrolyse zwischen 12,9 und 13,5 MWh/t Rohaluminium [79]. Der gesamte Primärenergieeinsatz beläuft sich sogar auf 211,8 GJ/t Aluminium [166] und liegt damit um ein Vielfaches höher als der von Stahl. Die Tatsache, dass auf Grund des sehr hohen Stromverbrauchs der Elektrolyse

²⁴PFPB: Point Feeder PreBaked

ein Großteil der Treibhausgasemissionen indirekt im Elektrizitätssektor verursacht wird, zeigt die Notwendigkeit eines Sektor-übergreifenden Ansatzes zur Bewertung klimapolitischer Instrumente auf.

2.3.2.2. Produktion von Sekundäraluminium

Die Herstellung von Sekundäraluminium wird in weniger Prozessschritten als die primäre Verhüttung von Aluminium durchgeführt. Die Erläuterung dieser Schritte folgt wiederum [79, 101, 187, 235] und [166]. Prinzipiell erfolgt das Recycling von Aluminium entweder unter der Verwendung von Neuschrott aus der Primärproduktion oder unter der Verwendung von Altschrott nach Gebrauch der Aluminiumprodukte durch den Konsumenten. Dabei wird zwischen Remeltern (Umschmelzwerken), in denen Knetlegierungen aus sortenreinem Schrott hergestellt werden, und Refinern, in denen Gusslegierungen aus Schrott verschiedenster Zusammensetzungen produziert werden, unterschieden. In Remeltern kommt darüber hinaus oftmals auch ein nicht unerheblicher Anteil primärer Vorstoffe zum Einsatz. Während sich Knetlegierungen durch ihre plastische Verformbarkeit und gute Festigkeitswerte auszeichnen, steht bei Gusslegierungen deren Vergießbarkeit im Vordergrund.

Zur Aufbereitung des Schrotts, dem ersten Verfahrensschritt, existieren zahlreiche Aufbereitungsverfahren wie bspw. Schredder, Schwimm-Sink-Anlagen oder Wirbelstromscheider, wobei letztlich die Konzentrierung des zu gewinnenden Aluminiums das Ziel dieser Verfahren darstellt.²⁵ In einem zweiten Schritt wird der Aluminiumschrott geschmolzen, wobei verschiedene Schmelzaggregate wie Drehtrommelöfen, Induktionsöfen oder Herdöfen Anwendung finden. Teilweise wird der Schrott zusammen mit Salz eingeschmolzen, welches Verunreinigungen aufnimmt und vor der oxidierenden Atmosphäre schützt. Bei der Produktion von Gusslegierungen in Refinern ist zusätzlich ein Raffinerieprozess nachgeschaltet. Nach dem Vergießen können Knetlegierungen wie im Falle der Primärproduktion weiterhin gewalzt oder gezogen werden.²⁶

²⁵Die Aufbereitung des Schrotts wird in der Regel nicht durch den Aluminiumhersteller durchgeführt [91] und daher in Kapitel 5 nicht detaillierter modelliert.

²⁶Modellseitig wird zwischen zwei Prozessschritten differenziert, dem Schmelzen in Refinern oder Remeltern (1) und der Weiterverarbeitung (2) (vgl. Kapitel 5).

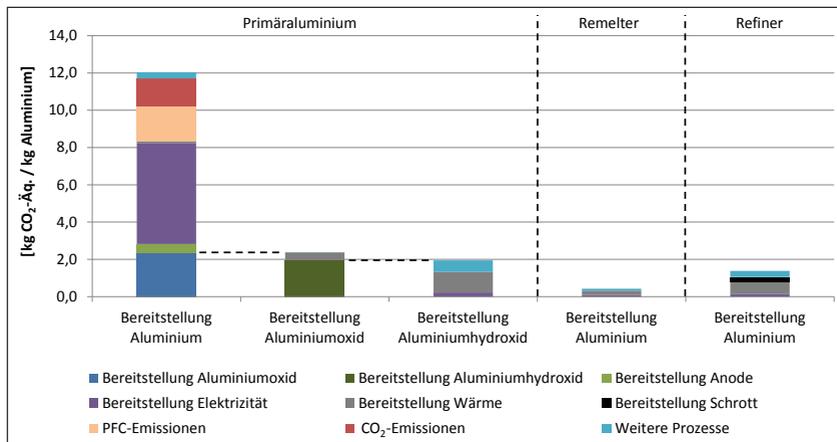


Abbildung 2.11.: Treibhauspotenzial der Aluminiumproduktion inklusive aller Vorketten in einem Bezugszeitraum von 100 Jahren (Datengrundlage: [52]).

Die Art der Aufbereitung ergibt sich aus der Qualität der sekundären Rohstoffe, weshalb sich große Bandbreiten des Energiebedarfs ergeben [79]. Dies verdeutlicht wiederum die Notwendigkeit eines werksspezifischen Ansatzes zur Abschätzung vorhandener Effizienzpotenziale. In [166] wird der durchschnittliche Primärenergieeinsatz auf 17,9 GJ/t Aluminium beziffert und repräsentiert damit lediglich 8% des Energieeinsatzes der Primäraluminiumerzeugung.

2.3.2.3. Treibhausgasemissionen der Aluminiumproduktion

Auch die Treibhausgasemissionen der Aluminiumproduktion entstehen in vielen unterschiedlichen Prozessen. Bei der Abschätzung des Treibhauspotenzials mittels der ecoinvent-Datenbank unter Einbezug aller Vorketten macht sich der deutlich höhere Primärenergieverbrauch im Vergleich zu der Stahlproduktion bemerkbar. Die Ergebnisse sind zusammengefasst in Abbildung 2.11 dargestellt.

Bei der Primärroute stellt die Bereitstellung der Elektrizität mit 47% den größten Anteil des Treibhauspotenzials, wobei der Elektrizitätsverbrauch nahezu vollständig der Elektrolyse zugerechnet werden kann. Weiterhin sind mit einem Anteil von 15% die aus dem Anodeneffekt²⁷ resultierenden PFC-Emissionen, die bezogen auf deren Masse ein vergleichsweise hohes Treibhauspotenzial besitzen (vgl. Abschnitt 2.1), relevant. Die Vermeidung des Anodeneffekts, welcher auch mit einer Verringerung der Stromausbeute einhergeht [235], bietet großes Potenzial zur Minderung von Treibhausgasemissionen. Einen ebenfalls nicht unerheblichen Teil des Treibhauspotenzials der Schmelzflusselektrolyse bedingen mit 12% die CO₂-Emissionen, welche durch die Reaktion des vom Aluminium abgespalteten Sauerstoffs mit den Kohlenstoffanoden entstehen [166]. Die Bereitstellung der Anode trägt mit weiteren 4% zum Treibhauspotenzial bei, während 13% durch die Bereitstellung von Wärme, die u.a. für die Kalzination des Aluminiumhydroxids notwendig ist, verursacht werden. Alle restlichen Prozesse tragen zusammen genommen mit etwa 8% zum Treibhauspotenzial bei, während sich dieses auf insgesamt 12,0 t CO₂-Äq./t Aluminium beläuft und damit etwa sechsmal so hoch ist wie das der Stahlerzeugung nach der Hochofenroute.

Bezüglich der Sekundärroute der Aluminiumherstellung müssen Refiner und Remelter auf Grund der unterschiedlichen Ausgangsqualitäten des Schrottes getrennt betrachtet werden, wobei hier vereinfachend angenommen wurde, dass der ecoinvent-Datensatz für Sekundäraluminium aus Altschrott den Refinern und der Datensatz für Sekundäraluminium aus Neuschrott den Remeltern direkt zuordenbar ist. Unter den gegebenen Annahmen fallen bei Refinern bspw. 19% des Treibhauspotenzials für die Aufbereitung des Schrottes an, während diese bei Remeltern kaum relevant ist. In Abhängigkeit des eingesetzten Ofens wird ein Großteil des Treibhauspotenzials bei der Bereitstellung der Elektrizität oder bei der Bereitstellung der Wärme durch Brennstoffe verursacht. Im europäischen Mittel ergeben sich 22% für die Bereitstellung der Elektrizität bei Remeltern und 11% bei Refinern sowie 53% bzw. 46% für die Bereitstellung der Wärme. Die restlichen Prozesse bedingen zusammen 25% bzw. 24% des Treibhauspotenzials. Insgesamt beläuft sich dieses auf 0,4 t CO₂-Äq./t

²⁷Beim durch eine zu geringe Aluminiumoxid-Konzentration hervorgerufenen Anodeneffekt wird anstelle des Aluminiumoxids der Elektrolyt in Metall- und Fluoridionen zersetzt, wobei letztere durch die Reaktion mit dem Kohlenstoff der Anode PFCs bilden [101].

Aluminium für Remelter und auf 1,4 t CO₂-Äq./t Aluminium für Refiner und liegt damit deutlich unter dem der Primäraluminiumproduktion.

Die Studie des Fraunhofer ISI [258] mit einem Zeithorizont bis 2035 analysiert neben der Eisen- und Stahlindustrie auch das zukünftige (wirtschaftliche) Energieeinsparpotenzial der NE-Metall-Industrie. Dieses wird mit 8% für Strom (vgl. Stahl- und Eisen: 19%) und 30% für die eingesetzten Brennstoffe (vgl. Stahl- und Eisen: 10%) angegeben. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist somit die Untersuchung, inwiefern und unter welchen klimapolitischen Bedingungen die identifizierten Potenziale erreicht werden können.

2.3.2.4. Wirtschaftlichkeit der deutschen Aluminiumindustrie

Die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Industrien ist ein wesentlicher Faktor bei der Bewertung des Einflusses klimapolitischer Instrumente. Die Entwicklung des Nettobetriebsüberschusses als Maß für den Wettbewerbsdruck wurde bereits für die gesamte Metallerzeugung und -bearbeitung in Abschnitt 2.3.1 analysiert und konstatiert, dass die erzielbaren Gewinne gegenüber dem gesamten verarbeitenden Gewerbe deutlich rückläufig sind.

Mit einem Energiekostenanteil von fast 40% hängt die Wirtschaftlichkeit der Aluminiumindustrie sehr stark von den Energiepreisen ab. Vor allem der Strompreis, welcher für deutsche Aluminiumhütten um durchschnittlich mehr als 50% über dem internationalen Niveau liegt, steht hierbei im Fokus [166]. Etwa 70% des in Deutschland zur Weiterverarbeitung eingesetzten Rohaluminiums wird importiert (vgl. [305, 333]), was die schwierige wirtschaftliche Lage der Aluminiumindustrie in Deutschland verdeutlicht. Die vorübergehende Schließung der Hütte in Hamburg und die endgültige Schließung des Werks in Stade, welche beide im Jahre 2006 stattfanden [150], werfen darüber hinaus Fragen auf, inwiefern weitere Hütten in Zukunft am Standort Deutschland gefährdet sind.

2.4. Ableitung von Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente

Die vorangegangenen Abschnitte geben die Rahmenbedingungen der deutschen Klimapolitik mit Fokus auf den energieintensiven Industrien wieder. Aus diesen Rahmenbedingungen ergeben sich zahlreiche Anforderungen an eine Bewertung zukünftig einzusetzender klimapolitischer Instrumente. Im Wesentlichen können diese Anforderungen in zwei Betrachtungsebenen eingeteilt werden, eine volkswirtschaftliche Ebene sowie eine technisch-betriebswirtschaftliche Ebene.

Auf volkswirtschaftlicher Ebene lassen sich die wichtigsten Anforderungen in die folgenden Punkte gliedern:

- Es ist ein Ansatz zu entwickeln, der die Erreichung der ambitionierten Treibhausgasminderungsziele der deutschen Volkswirtschaft überprüfen kann. Hierzu soll der Ansatz Auswirkungen zukünftiger Effizienzmaßnahmen einzelner Sektoren auf die Treibhausgasemissionen beziffern können.
- Darüber hinaus ist eine detaillierte Modellierung der klimapolitischen Instrumente notwendig, um den komplexen Rechtskonstrukten und zahlreichen Ausnahmeregelungen Rechnung tragen zu können und die Effekte einer möglichen zukünftigen Anpassung dieser Instrumente abschätzen zu können. Da in der Klimapolitik in der Regel ein Instrumentenmix eingesetzt wird, sind auch die Wechselwirkungen der einzelnen Instrumente zu berücksichtigen.
- Viele Effizienzmaßnahmen wirken sich durch indirekte ökologische und ökonomische Effekte auf vor- oder nachgelagerte Produktionsstufen aus. Somit ist eine sektorübergreifende Sichtweise bei der Bewertung klimapolitischer Instrumente vonnöten.
- Die Endverbraucher stellen durch die Nachfrage nach Produkten einen wesentlichen Treiber der Produktionsprozesse und damit der Emission von Treibhausgasen dar. Deshalb gilt es, zukünftige Konsummuster abzuschätzen, um die Randbedingungen der Zielerreichung korrekt einzuschätzen.

Als wichtigste Anforderungen auf technisch-betriebswirtschaftlicher Ebene lassen sich hingegen die folgenden Punkte identifizieren:

- Um die technischen Treibhausgasreduktionspotenziale der betrachteten Industrien quantifizieren zu können, ist eine detaillierte, technisch fundierte Abbildung der einzelnen Prozessschritte notwendig. Besondere Anforderungen bestehen dabei an die Modellierung des Produktionsverbunds einzelner Anlagen, die über Kuppelgase oder Abwärmenutzung miteinander verschaltet sind und damit den Energieverbrauch maßgeblich beeinflussen.
- Klimapolitische Instrumente beeinflussen in erster Linie die Entscheidungen der Produzenten, weshalb es gilt die Reaktionen der betrachteten Industrien auf die Instrumente abzuschätzen. Damit einher geht die Analyse der Kostenstrukturen, um die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Industrien beziffern zu können und damit das Risiko von *Carbon Leakage* abschätzen zu können.
- Da sich die Prozesse der einzelnen Werke teilweise stark unterscheiden und zudem nur eine begrenzte Anzahl an Werken für einen Großteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist, ist es zweckmäßig die obigen Analysen werks- bzw. anlagenspezifisch vorzunehmen.

Die identifizierten wesentlichen Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente werden in einem Simulationsmodell umgesetzt, welches in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben und im folgenden Kapitel 3 in bislang vorliegende Ansätze eingeordnet wird. Mit diesem Modell wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der sowohl ökologische als auch ökonomische Auswirkungen verschiedener klimapolitischer Instrumente simuliert und letztlich auch im Sinne eines Entscheidungsunterstützungssystems bei der Wahl einer geeigneten nationalen Klimapolitik unterstützen kann.

3. Ansätze zur Bewertung klimapolitischer Instrumente

Ziel dieses Kapitels ist es einen Überblick über Modelle und Modellsysteme zur Bewertung klimapolitischer Instrumente zu geben und das zu entwickelnde Modell von diesen Arbeiten abzugrenzen. Abschnitt 3.1 betrachtet hierzu existierende Integrated Assessment bzw. E3-Modelle, welche ihrerseits häufig aus verschiedenen Teilmodellen aufgebaut sind, während Abschnitt 3.2 den Fokus speziell auf Input-Output-Modelle legt, Abschnitt 3.3 einen kurzen Überblick über agenten- bzw. akteursbasierte Modelle gibt und Abschnitt 3.4 Möglichkeiten der Modellierung stoffstrombasierter Produktionsprozesse, wie sie u.a. in der Metallherzeugung auftreten, aufzeigt. Dabei werden die Unterschiede zum otello-Modell, auf dessen Grundidee der in dieser Arbeit zu entwickelnde Ansatz basiert, herausgestellt. Abschnitt 3.5 schließt das Kapitel mit einem Überblick über diesen zu entwickelnden Modellierungsansatz ab.

3.1. Integrated Assessment Modelle

Eine häufig eingesetzte Modellklasse zur Analyse klima- bzw. umweltpolitischer Fragestellungen sind sogenannte Integrated Assessment Modelle (IAM), für welche sich in der Literatur zahlreiche Definitionen, die unterschiedliche Aspekte dieser Modelle hervorheben, finden lassen. Einige dieser Definitionen werden im folgenden Abschnitt aufgezeigt.

3.1.1. Der Begriff Integrated Assessment Modell

Nach Vuuren et al. [312] sind IAMs ein weit verbreitetes Werkzeug um Strategien zur Abwendung des Klimawandels zu bewerten und zielen prinzipiell darauf ab, die komplexen Wechselwirkungen zwischen ökologischen, sozialen und ökonomischen Faktoren, die den Klimawandel und die Effektivität von Klimapolitiken determinieren, zu beschreiben um relevante Erkenntnisse für die Politik zu erlangen. Jäger [165] hebt vor allem die Verbindung von Wissenschaft und Politik in IAMs, besonders für globale Umweltthemen hervor. Dies betonen auch Kelly und Kolstad [170] und definieren ein IAM als ein Modell, welches (natur-)wissenschaftliche und sozio-ökonomische Aspekte des Klimawandels primär für den Zweck der Bewertung politischer Optionen zur Bewältigung des Klimawandels integriert.

Böhringer et al. [37] hingegen verwenden den Begriff deutlich weiter gefasst und stellen heraus, dass IAMs komplementäre Erkenntnisse verschiedener (Wissenschafts-)Disziplinen kombinieren um Einsichten in die Politikgestaltung zu erlangen. Auch Rotmans und Dowlatabadi [250], zitiert nach Weber [317], verstehen Integrated Assessment als interdisziplinären Prozess, Erkenntnisse verschiedener Fachrichtungen derart zu kombinieren, zu interpretieren und kommunizieren, dass die Bewertung eines bestimmten Themas mittels einer integrierten Sichtweise ermöglicht wird. Dabei stellen sie zwei diesen Prozess charakterisierende Ziele heraus: zum einen sollte ein Mehrwert im Vergleich zu einer isolierten Betrachtung von nur einer Fachrichtung erreicht werden, zum anderen sollte den Entscheidungsträgern nützliche Informationen bereitgestellt werden, um unter einheitlichen Rahmenbedingungen Mehrzielentscheidungen treffen zu können. Ähnliche Definitionen lassen sich bspw. in Weyant et al. [320] finden.

Während die bisherigen eher weit gefassten Definitionen von IAMs vor allem die Politikrelevanz und die Integration verschiedener Fachdisziplinen in den Vordergrund stellen, gibt es darüber hinaus zahlreiche spezifischere Sichtweisen auf diesen Begriff. So repräsentieren IAMs nach Moss et al. [212] die Hauptmerkmale des menschlichen Systems wie Demographie, Energienutzung, Technologie, Wirtschaft, Land- und Forstwirtschaft sowie Landnutzung. Des weiteren beinhalten IAMs nach dieser Definition vereinfachte Abbildungen des Klimasystems, des Ökosystems und in

manchen Fällen auch die Auswirkungen auf das Klima. Die Kalibrierung dieser vereinfachten Abbildungen erfolgt dabei an komplexeren Klima- und Wirkungsmodellen. Bjerve et al. [24] stellen heraus, dass IAMs Emissionsmodelle, atmosphärische Transportmodelle sowie Wirkungsindikatoren beinhalten und die darin involvierten Kosten bewerten. Stehfest et al. [272] nennen als gemeinsames Merkmal die Beschreibung einer Kombination aus menschlichem System und Erdsystem um ein besseres Verständnis globaler Umweltprobleme zu erlangen, während D'Elia et al. [59] die Kombination verschiedener Wissenschaftsfelder aus den Bereichen Atmosphärenchemie, Meteorologie, Wirtschaft, Emissionsminderungstechnologien, Politik und Einflüsse auf die menschliche Gesundheit hervorheben. Letztlich nehmen Hordijk und Kroeze [149] in einem Review zu IAMs im Bereich der Versauerung nur Modelle auf, die drei von fünf der folgenden Komponenten beinhalten: Emissionsquellen, atmosphärischer (Schadstoff-)Transport, Umweltauswirkungen, Optionen zur Emissionsminderung sowie monetäre Bewertung der Ergebnisse.

Im engeren Sinne integrieren IAMs somit (1.) sozio-ökonomische Teilsysteme und (2.) Umwelt- bzw. Klima-Teilsysteme. Bezüglich letzteren zeigt sich, dass der Klimawandel wesentlich komplexer in der Modellierung ist als die Luftverschmutzung [143] und auch der Zeithorizont auf Grund der langen Verweilzeiten vieler Treibhausgase in der Atmosphäre sowie auf Grund der großen Wärmekapazität der Ozeane [136] dort deutlich weiter gefasst werden muss um auch verspätete Auswirkungen einschließen zu können.

Häufig findet sich in der Literatur anstatt des Begriffs IAM auch die Bezeichnung E3-Modelle, was die Integration der Bereiche Energie (*Energy*), Umwelt (*Environment*) und Wirtschaft (*Economy*) dieser Modelle hervorhebt (vgl. bspw. [138]).

In Anbetracht der Komplexität eines vollständig gekoppelten Systems, das alle bisher genannten Aspekte integriert, unterliegen IAMs zahlreichen vereinfachenden Annahmen [318]. Es existiert somit ein Trade-off zwischen der Detailebene und dem Umfang der Integration unterschiedlicher Aspekte [282]. Deshalb werden in den einzelnen Modellen in der Regel verschiedene Aspekte des Gesamtsystems mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad abgebildet, um unterschiedliche Fragen beantworten zu können. Eine zufriedenstellende Einsicht in das Gesamtsystem kann deshalb nur über

die Entwicklung und Analyse verschiedener Modelle erlangt werden [318], die letztlich komplementäre Ergebnisse liefern. Darüber hinaus werden bei politischen Entscheidungen teilweise verschiedene IAMs mit dem gleichen Fokus parallel eingesetzt, um bspw. Unsicherheiten abzufedern.

Der Fokus der Analyse existierender IAMs in den Abschnitten 3.1.2 und 3.1.3 richtet sich im Speziellen auf das sozio-ökonomische Teilsystem. Das Erdsystem, welches bspw. durch die Simulation der Emissionsausbreitung oder ein Klimamodell repräsentiert werden kann, wird dabei in der Analyse weitestgehend außen vor gelassen. Dies liegt darin begründet, dass die klimapolitischen Ziele Deutschlands bereits seitens des Staates festgelegt wurden (vgl. Abschnitt 2.1) und die Fragestellung der vorliegenden Arbeit eher die Erreichbarkeit dieser Ziele und nicht deren Festlegung adressiert. Somit wird der Begriff Integrated Assessment eher weit verstanden als die Integration verschiedener Wissenschaftsdisziplinen¹, um politische Fragestellungen zu beantworten, was auch solche Modelle mit einschließt, die lediglich das sozio-ökonomische Teilsystem betrachten, insofern sowohl wirtschaftliche und / oder technische als auch politische Aspekte integriert betrachtet und im Sinne einer Entscheidungsunterstützung verwendet werden.

3.1.2. Überblick über existierende Integrated Assessment Modelle

Überblicke über existierende IAMs bieten bspw. Stanton et al. [269] mit Fokus auf klimaökonomischen Modellen, Salter et al. [251] mit Fokus auf dem relativ neuen Feld der partizipativen IAMs², Hordijk und Kroeze [149] mit Fokus auf der Versauerung, Dowlatabadi [85] oder Kelly und Kolstad [170] mit Fokus auf dem Klimawandel, Haynes et al. [138] oder Kemfert [171] mit Fokus auf E3-Modellen sowie Patt et al. [225] mit Fokus auf der Anpassung an den Klimawandel.

¹Im Falle des hier zu entwickelnden Modells werden eine volkswirtschaftliche und eine betriebswirtschaftlich-technische Sichtweise mit den jeweiligen zugehörigen Ansätzen integriert.

²Partizipative IAMs zielen auf den direkten Einbezug der Entscheidungsträger in den Bewertungsprozess ab.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit genauer betrachteten Modelle, welche im Abschnitt 3.1.3 detaillierter beschrieben werden. Der Überblick erhebt zwar keinen Anspruch auf Vollständigkeit, enthält aber die zentralen Modelle und Modelltypen. Die Kriterien der vorgenommenen Einordnung orientieren sich dabei an den im Abschnitt 2.4 identifizierten Anforderungen, welche folgende Modelleigenschaften voraussetzen:

- (I) Die explizite Modellierung der Reaktionen des Systems auf verschiedene klimapolitische Instrumente, wobei die unterschiedlichen Ausprägungen letzterer detailliert zu modellieren sind;
- (II) Die detaillierte Modellierung makroökonomischer Rückkopplungen im Sinne einer (Industrie-)sektorübergreifenden Sichtweise bzw. einer endogenisierten wirtschaftlichen Entwicklung;
- (III) Eine detaillierte, technisch fundierte Abbildung der für die Emissionsentstehung relevanten (industriellen) Prozesse, welche möglichst auf Werks- bzw. Anlagenebene erfolgen sollte sowie eine detaillierte Modellierung möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen.

Neben diesen Kriterien werden die IAMs auch hinsichtlich des Gebietes, auf das sie angewendet werden, der Sektoren³, die als anthropogene Emissionsquellen berücksichtigt werden, hinsichtlich der betrachteten Klimagase und Schadstoffe sowie der Charakteristika der Modelle (Top-down oder Bottom-up, simulierend oder optimierend) klassifiziert.

Die Einordnung der betrachteten Modelle basiert auf den ebenfalls in Tabelle 3.1 angegebenen Quellen und den darin enthaltenen Informationen. Ggf. können diese Modelle jedoch weitere Sektoren, Schadstoffe, etc. als hier dargestellt abdecken, insofern sie nach der begutachteten Veröffentlichung weiterentwickelt wurden oder deren (hier betrachtete) Eigenschaften in den Quellen nicht oder zu ungenau beschrieben wurden.

³Einige der Modelle betrachten den Energiesektor separat neben anderen Sektoren, andere wiederum weisen nur energiebedingte Emissionen aus, während eine dritte Gruppe letztere den verbrauchenden Sektoren (Bsp.: Industrie, Wohngebäude) zuweist, was die Übersicht über die modellierten Sektoren erschwert. In der hier vorgenommenen Analyse wurden die Sektoren getrennt ausgewiesen, insofern sie auch in der jeweiligen Quelle getrennt behandelt wurden.

Tabelle 3.1.: Einordnung ausgewählter zentraler Integrated Assessment Modelle mit Fokus auf dem sozio-ökonomischen Teilsystem

Modell	Gebiet	Sektoren (anthropogene Emissions- quellen)	Klimagase und Schadstoffe	Top-down, Bottom-up	Simulation, Optimierung	Reaktion auf Klimapolitik (I)	Makroökon. Rückkoppl. (II)	Modellierung Prozesse (III)	Ansatz
TAR- GETS [143]	global	Energie, Landwirtschaft	CO ₂ , SO ₂ , NO _x	T	S	-	(√) ¹	-	System Dynamics
IMAGE [143, 210, 272, 311]	global	Energie, Industrie, Wohngebäude, Verkehr, Dienstleistungen, Landwirtschaft und -nutzung	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆ , SO ₂ , NO _x , NH ₃ , CO, NMVOC, PM	T&B	S	√	(√) ²	(√) ³	diverse, überwiegend auf Simulation basierende Teilmodelle
RICE, DICE [4, 50, 51, 215, 217, 218]	global	Industrie (inkl. Energie), Landnutzung	CO ₂ , <i>weitere Treibhausgase exogen vorgegeben</i>	T	O	(√) ⁴	√	-	Angewandtes allgemeines Gleichgewichts- modell (AAG)
MERGE [38, 50, 192–194, 244]	global	Energie	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆	T&B	O	(√) ⁴	√	(√) ⁵	AAG
FUND [1, 13, 14, 288, 289]	global	Energie, Landnutzung	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SO ₂	T	O	(√) ⁴	√	-	AAG, Monte- Carlo-Simulation

Tabelle 3.1.: Einordnung ausgewählter zentraler Integrated Assessment Modelle mit Fokus auf dem sozio-ökonomischen Teilsystem

Modell	Gebiet	Sektoren (anthropogene Emissions- quellen)	Klimagas und Schadstoffe	Top-down, Bottom-up	Simulation, Optimierung	Reaktion auf Klimapolitik (I)	Makroökon. Rückkoppl. (II)	Modellierung Prozesse (III)	Ansatz
PAGE [7, 145–148]	global	<i>Keine Berücksichtigung von Energie- oder Industrie-Aktivitätsraten</i>	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆	T	S/O	(√) ⁴	√	-	AAG, Monte-Carlo-Simulation, genetischer Algorithmus
MES-SAGE-MACRO [202, 203, 237, 248, 282]	global	Energie, Wohngebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆ , SO _x , NO _x	T&B	O	(√) ⁴	√	√	AAG, Energiesystemmodell
MA-DIAMS [135, 137, 317, 318]	global	Energie	CO ₂	T	S	(√) ⁴	√	-	Multi-Agenten-System
RAINS, GAINS [10, 11, 173, 314]	Europa	Energie, Industrie, Verkehr, Wohngebäude, Landwirtschaft	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆ , SO ₂ , NO _x , PM, NH ₃ , VOC	B	O	-	-	(√) ⁶	lineare Optimierung

Tabelle 3.1.: Einordnung ausgewählter zentraler Integrated Assessment Modelle mit Fokus auf dem sozio-ökonomischen Teilsystem

Modell	Gebiet	Sektoren (anthropogene Emissionsquellen)	Klimagase und Schadstoffe	Top-down, Bottom-up	Simulation, Optimierung	Reaktion auf Klimapolitik (I)	Makroökon. Rückkoppl. (II)	Modellierung Prozesse (III)	Ansatz
MERLIN [24, 239, 240]	Europa	alle (relevanten) Wirtschaftssektoren	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SO ₂ , NO _x , NH ₃ , VOC, CO, PM, Schwermetalle	B	(O) ⁷	-	(√) ⁸	(√) ⁶	Datenbank-basiertes Modell, evolutionärer Algorithmus
CASM [127, 265]	Europa	Energie	SO ₂ , NO _x	B	O	-	-	√	lineare Optimierung
ASAM [15, 221, 315, 316]	Europa	<i>keine Auftrennung der Emissionen nach Sektoren</i>	NH ₃ , SO ₂ , NO _x , PM	B	(O) ⁹	-	-	(√) ¹⁰	„Best Economic Environmental Pathway“ (BEEP)
UKIAM [220–222]	Großbritannien	Elektrizität, Industrie, Verkehr, Wohngebäude, Landwirtschaft	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , NH ₃ , SO ₂ , NO _x , PM	B	S	-	-	(√) ¹¹	Simulationsmodell
MINNI [59, 232, 308, 335]	Italien	Energie, Industrie, Verkehr, Wohngebäude, Landwirtschaft	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , PM, O ₃ , VOC	B	O	(√) ¹²	-	(√) ⁶	lineare Optimierung

Tabelle 3.1.: Einordnung ausgewählter zentraler Integrated Assessment Modelle mit Fokus auf dem sozio-ökonomischen Teilsystem

Modell	Gebiet	Sektoren (anthropogene Emissions- quellen)	Klimagas und Schadstoffe	Top-down, Bottom-up	Simulation, Optimierung	Reaktion auf Klimapolitik (I)	Makroökon. Rückkoppl. (II)	Modellierung Prozesse (III)	Ansatz
PANTA RHEI [181, 188– 190, 205, 206]	Deutsch- land	Energie, Verkehr, Wohngebäude	CO ₂	T&B	S	✓	✓	(✓) ¹³	ökonomisches Input-Output- Modell
MIS/ IKARUS- MAR- KAL [195, 197, 229, 310]	Deutsch- land	Energie, Industrie, Verkehr, Haushalte, Kleinverbraucher	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆ , CO, NO _x , SO ₂ , FCKW, NMKW ¹⁴	T&B	S	(✓) ¹⁵	✓	✓	Input-Output- Modell, Energiesystem- modell
otello [41, 54, 159, 274]	Deutsch- land	Elektrizität, Stahl, Zement, Verkehr, Wohngebäude	CO ₂ , NO _x , SO ₂ , PM ₁₀	T&B	S	✓	✓	✓	Input-Output- Modell, sektor-spezifische Teilmodelle

¹ Bruttoweltprodukt in Szenarios vorgegeben² Wirtschaftliche Entwicklung vorgegeben³ Einige Schlüsseltechnologien (Stahl, Zement) explizit modelliert, andere lediglich implizit⁴ Lediglich Berücksichtigung einer⁵ Kohlenstoff- / CO₂-Steuer⁵ Unterscheidung der wichtigsten Prozesse zur Energiebereitstellung⁶ Aggregation von Prozessen mit ähnlichen technischen und ökonomischen Eigenschaften⁷ Heuristik⁸ Abschätzung der Entwicklung einiger makroökonomischer Größen durch ein partielles Gleichgewichtsmodell⁹ Schrittweise Verbesserung¹⁰ Keine Unterscheidung von Sektoren bzw. Prozessen¹¹ Einige wesentliche Prozesse bzw. Werke werden separat als Punktquellen betrachtet, andere aggregiert¹² Verstärkter Fokus auf Modellierung nicht-technischer Maßnahmen¹³ Ökonomische Abschätzung des technologischen Wandels in energieintensiven Industrien¹⁴ NMKW: Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff¹⁵ Berücksichtigung von Energiesteuern auf makroökonomischer Ebene

Fünf der 17 analysierten Modelle können Tabelle 3.1 zufolge als Top-down-Modelle klassifiziert werden, sechs als Bottom-up und weitere sechs als hybride Modelle. Top-down-Modelle sind dabei ökonomisch fundiert und betrachten vergleichsweise aggregiert gesamtwirtschaftliche und sektorale Wechselwirkungen sowie Auswirkungen von Maßnahmen (vgl. bspw. [171, 174, 189]). Sie schließen vom Allgemeinen auf das Detail [174], d.h. es wird eine stark vereinfachte Abbildung der technischen Prozesse in Kauf genommen [159]. Bottom-up-Modelle hingegen unterliegen einer technologischen Fundierung und betrachten bspw. Kosten und Potenziale spezifischer Technologien eines Sektors (vgl. bspw. [174, 189]). Sie schließen von Detailfragen auf Allgemeines [174], vernachlässigen dabei jedoch Effekte wie bspw. Marktversagen oder Rebound-Effekte⁴ [23, 190], was zu einer Überschätzung der Emissionsreduktionen führen kann [159]. Hybride Modelle, die Top-down- und Bottom-up-Ansätze integrieren, versuchen dabei die jeweils aufgezeigten Schwächen zu umgehen. Dies zeigt sich auch in den drei zuvor definierten Kriterien (I)-(III), welche gleichzeitig fast ausschließlich durch hybride Modellsysteme abgedeckt werden können (vgl. Tabelle 3.1).

Sieben der betrachteten Modelle basieren auf rein simulierenden Ansätzen, während insgesamt zehn Modelle auf optimierenden Ansätzen beruhen oder diese optional auswählen können. Die Einteilung in *Policy evaluation models* und *policy optimization models* wird häufig, bspw. auch von Weyant et al. [320] sowie Nordhaus und Sztorc [215] vorgenommen. In Modellen des ersten Typs werden unterschiedliche politische Strategien einzeln bewertet und in Form von Szenarioanalysen miteinander verglichen, während Modelle des zweiten Typs das Ziel einer optimalen Ausgestaltung politischer Handlungsmöglichkeiten verfolgen [159]. Letzteres setzt dabei die Definition eines Zielkriteriums voraus [159], was, wie im folgenden Abschnitt 3.1.3 deutlich wird, bspw. durch eine Kostenminimierung, die Maximierung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses oder der Wohlfahrt umgesetzt werden kann. Dem Vorteil des Auffindens einer optimalen Lösung steht jedoch im Allgemeinen die geringere Detailtiefe optimierender Ansätze im Vergleich zu simulierenden gegenüber (vgl. [159]).

⁴Der Rebound-Effekt beschreibt das Phänomen, dass Konsumenten auf Effizienzsteigerungen mit einem Mehrkonsum des betroffenen Produktes reagieren (vgl. bspw. [23]).

Viele der betrachteten Modelle bzw. deren wichtigste Teilmodelle können letztlich grob in eine der drei folgenden Kategorien eingeordnet werden:

- Bottom-up-Modelle zur Berechnung der kostengünstigsten Technologiekombination zur Erreichung bestimmter Emissionsziele bzw. zur Berechnung der Technologiekombination mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis (Bsp.: GAINS bzw. RAINS, MERLIN, CASM, ASAM, UKIAM, MINNI);
- Angewandte allgemeine Gleichgewichtsmodelle, welche aus einem Gleichungssystem bestehen, das die Nachfrage nach Gütern durch die Konsumenten sowie das Angebot an Gütern durch die Produzenten zum Ausgleich bringt (Marktgleichgewicht)⁵ [84] (Bsp.: RICE bzw. DICE, MERGE, FUND, PAGE, MESSAGE-MACRO);
- Input-Output-Modelle, welche die sektoralen Verflechtungen der Volkswirtschaft abbilden und im Abschnitt 3.2 eingehender behandelt werden (Bsp.: PANTA RHEI, MIS/IKARUS, otello).

3.1.3. Beschreibung ausgewählter zentraler Integrated Assessment Modelle

Das Modell **TARGETS**⁶ [143] nimmt eine globale Perspektive ein, weshalb die einzelnen Wechselwirkungen im Vergleich zu europäischen oder nationalen IAMs relativ aggregiert dargestellt werden. Die Grundüberlegungen des Modells gehen auf Meadows et al. [201] zurück. Es besteht aus insgesamt fünf Teilmodellen, die die Bevölkerung und deren Gesundheit, den Wasserkreislauf und -verbrauch, die Landnutzung und die damit verbundene Bereitstellung von Nahrung, den Energieverbrauch sowie die biochemischen Kreisläufe (Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor) repräsentieren und sich wechselseitig in einem systemdynamischen Ansatz⁷ beeinflussen. Dabei stellen das in Szenarios vorgegebene Bruttoweltprodukt sowie die endogen berechnete Bevölkerungsentwicklung wesentliche

⁵Das Konzept des Marktgleichgewichts beinhaltet gewinnmaximierende Firmen sowie nutzenmaximierende Haushalte [84].

⁶TARGETS: Tool to Assess the Regional and Global Environmental and health TargetS

⁷Zur Funktionsweise von System Dynamics siehe bspw. [57,116]

Treiber für die Nachfrage nach Energie, Wasser und Nahrung dar. Die mit dem Modell TARGETS analysierten Szenarios zeigen eine sehr große Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen auf, die von hohen Mortalitätsraten auf Grund von Dürreperioden bis hin zu einem erhöhten Wohlstand durch eine auf High-Tech basierende effiziente Nutzung vorhandener Ressourcen reichen. Dies zeigt, dass das Modell zwar dazu in der Lage ist, unter bestimmten Annahmen grundlegende globale Zusammenhänge aufzuzeigen, jedoch keine konkreten Empfehlungen bezüglich einer adäquaten zukünftigen Klimapolitik geben kann.

Ein deutlich bekannteres IAM mit globaler Perspektive stellt das Modell **IMAGE**⁸ dar [143] und wird basierend auf [272] und [210] vorgestellt. Im Gegensatz zu dem vergleichsweise stark aggregierten Ansatz des TARGETS-Modells werden in IMAGE die sozio-ökonomischen Entwicklungen basierend auf insgesamt 26 Weltregionen berücksichtigt, wobei das gesamte Modellsystem durch zahlreiche vernetzte Teilmodelle repräsentiert wird, die grob in die Bereiche „exogene Treiber der Entwicklungen“ (Bsp.: Bevölkerung, Wirtschaft, technologischer Fortschritt), „menschliches System“ (Bsp.: Landwirtschaft und -nutzung, Energienachfrage und -versorgung), „Erdsystem“ (Bsp.: Kohlenstoffkreislauf, Atmosphäre, Ozeane) sowie „Wirkungsabschätzung“ (Bsp.: Auswirkungen auf Klima, Biodiversität) eingeteilt werden können. Das menschliche System und das Erdsystem stehen dabei über die durch menschliche Aktivitäten erzeugten Emissionen und die geänderten Umweltauswirkungen in einer wechselseitigen Beziehung zueinander. Der Fokus des Modells liegt auf den detailliert modellierten biophysikalischen Prozessen und der Verwendung einer Vielzahl unterschiedlicher Umweltindikatoren. Zwar wird darüber hinaus auch ein Energiesystemmodell zur Abschätzung der Energienachfrage und -versorgung, basierend auf der Aktivitätsrate verschiedener Sektoren, verwendet, jedoch werden die wirtschaftlichen Entwicklungen und politischen Instrumente auf einer deutlich geringeren Detailstufe einbezogen, weshalb bspw. die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung einzelner Sektoren nicht endogen abgebildet werden kann. Das Modell wurde bereits in zahlreichen globalen Studien, u.a. durch den IPCC⁹, eingesetzt.

⁸IMAGE: Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect

⁹IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES) [213]

Das Modell **DICE**¹⁰ [4,215,217,218] verfolgt einen gänzlich anderen Ansatz und basiert auf der neoklassischen Wachstumstheorie. In diesem Ansatz werden auf globaler Ebene Konsumpräferenzen durch eine Wohlfahrtsfunktion beschrieben, wobei ein abnehmender Grenznutzen unterstellt wird. Ein wesentliches Merkmal stellt die Berücksichtigung der zeitlichen Aspekte dar, da der Konsum von heute den Konsum von morgen beeinflusst, was sowohl für die Investitionen in bspw. Technologien als auch für das „natürliche Kapital“ des Klimasystems in Form von Treibhausgaskonzentrationen zutrifft. So stellen bspw. Emissionsminderungen Investitionen dar, die die Verfügbarkeit des natürlichen Kapitals und damit die Möglichkeiten zukünftigen Konsums erhöhen. Weiterhin werden eine Schadensfunktion zur Abschätzung des durch den Klimawandel induzierten wirtschaftlichen Schadens und eine Kostenfunktion zur Reduktion von CO₂-Emissionen aufgestellt, wobei die Parametrierung ersterer mit sehr großen Unsicherheiten behaftet ist. Die Zielfunktion sieht die Maximierung der Wohlfahrt über die Zeit unter Verwendung einer Diskontrate vor. Der Konsum verursacht wiederum Produktionsvorgänge, welche durch eine von Kapital, Arbeit und Energie (Kohlenstoff-basiert oder nicht Kohlenstoff-basiert) abhängige Produktionsfunktion beschrieben werden und letztlich die CO₂-Emissionen bedingen. Der geophysische Teil des DICE-Modells berücksichtigt hingegen den durch die CO₂-Emissionen beeinflussten Kohlenstoffkreislauf, die Akkumulation von Treibhausgasen und die damit einhergehenden Temperaturänderungen. Als Entscheidungsvariablen können u.a. sowohl die Rate der Emissionsminderung als auch die Höhe der Kohlenstoffsteuer fungieren. Das Modell **RICE**¹¹ [50, 51] stellt eine detailliertere Form des DICE-Modells dar und unterteilt die Welt in insgesamt zwölf Regionen. Die Modellläufe decken Zeiträume von teilweise mehr als 100 Jahren ab und erlauben bspw. durch einen Vergleich mit den marginalen Emissionsreduktionskosten Abschätzungen der notwendigen Höhe einer Kohlenstoffsteuer zur Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels (vgl. Abschnitt 2.1), wobei viele der modellierten Zusammenhänge mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Der Ansatz des Modells **MERGE**¹² [38, 50, 192–194, 244] ist sehr ähnlich zu dem des RICE-Modells und basiert ebenfalls auf einem angewandten

¹⁰DICE: Dynamic Integrated model of Climate and the Economy

¹¹RICE: Regional Integrated model of Climate and the Economy

¹²MERGE: Model for Evaluating the Regional and Global Effects of greenhouse gas reduction policies

allgemeinen Gleichgewichtsmodell. Weiterhin genügen auch die Nutzen- und Produktionsfunktionen beider Modelle ähnlichen Annahmen. MERGE teilt die Welt in insgesamt neun Regionen auf, wobei jede Region ihren (diskontierten) Nutzen unter Beachtung einer Budgetrestriktion maximiert. Im Gegensatz zum RICE-Modell, welches den gesamten Output vereinfachend zu lediglich einem Gut aggregiert, wird der Energie-Sektor in MERGE separat modelliert, was eine Unterscheidung zwischen den wesentlichen Prozessen zur Energiebereitstellung und somit auch eine bottom-up-Abschätzung der energiebedingten Emissionen ermöglicht. Auch MERGE sieht zum einen die Maximierung des Nutzens über den Betrachtungshorizont ohne weitere Restriktionen und zum anderen die Bestimmung eines Emissionspfades unter der Einhaltung bestimmter Klimaziele vor, weshalb auch hier ein Klimamodell die durch Treibhausgasemissionen bedingten Temperaturänderungen abschätzt. Neben den durch den Klimawandel induzierten gut quantifizierbaren Marktschäden (Bsp. Ernteausfall) werden vor allem auch schlecht zu quantifizierende Schäden, wie die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, bewertet, was jedoch wiederum mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Auch das Modell **FUND**¹³ [1, 13, 14, 288, 289] sieht eine Maximierung der Wohlfahrt vor, wobei 16 Regionen abgebildet sind und die Modellierung der wirtschaftlichen Zusammenhänge weniger komplex ausfällt als bei DICE oder MERGE. Im Gegensatz zu letzteren beiden werden in FUND jedoch die wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels auf einer vergleichsweise sehr niedrigen Aggregationsstufe betrachtet und zwischen Auswirkungen auf die Landwirtschaft, auf notwendige Heizvorgänge, auf die Artenvielfalt und auf elf weitere Kategorien unterschieden. Parameter zum Bevölkerungswachstum, zum wirtschaftlichen Wachstum oder zu den Energieeffizienzverbesserungen werden exogen vorgegeben, während die atmosphärische Konzentration der Treibhausgase (Klimamodell), die globale Durchschnittstemperatur oder die Auswirkungen von Emissionsreduktionen und Klimaschäden auf die Wirtschaft endogen berechnet werden. Neuere auf das FUND-Modell gestützte Analysen arbeiten mit Monte-Carlo-Simulationen¹⁴ zur Berücksichtigung der unsicheren Parame-

¹³FUND: Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution

¹⁴Eine Monte-Carlo-Simulation sieht die sehr häufige Durchführung einzelner Zufallsexperimente, im Falle von FUND etwa 10.000, vor um das Verhalten der Ergebnisvariablen abzuschätzen (Gesetz der großen Zahlen).

ter, für welche entsprechende Verteilungsfunktionen angenommen werden. So können mittels FUND bspw. Politiken, charakterisiert durch die jeweilige Höhe der Kohlenstoffsteuer, identifiziert werden, die die maximale Abweichung von der im besten Fall zu erreichenden Wohlfahrt minimieren (Minimax-Regel).

Das Modell **PAGE**¹⁵ [7, 145–148], welches zumindest in seinen Grundzügen mit den vorherigen Modellen (RICE/DICE, MERGE, FUND) vergleichbar ist und insgesamt acht Regionen betrachtet, berücksichtigt ähnlich zu den jüngsten mit FUND durchgeführten Analysen explizit die Unsicherheiten der einzelnen verwendeten Input-Parameter, was jedoch mit einer Vereinfachung der Abbildung wirtschaftlicher Zusammenhänge im Vergleich zu vielen anderen IAMs einhergeht. Auch PAGE setzt hierzu eine Monte-Carlo-Simulation ein, wobei die Simulationsergebnisse, die bspw. Temperaturen, Auswirkungen oder Kosten umfassen, in der Regel als Bereich und nicht als (geschätzter) Punktwert angegeben werden. Die Kosten der Emissionsminderung werden dabei stark vereinfacht berechnet, wobei lediglich zwischen günstigen und teuren Maßnahmen unterschieden wird und letztere ab einer bestimmten realisierten Emissionsminderung verwendet werden müssen (vgl. hierzu bspw. die folgenden Ausführungen zu den europäischen IAMs und dem Kostenkurvenansatz). PAGE wird u.a., wie bspw. auch FUND, zur Berechnung der sozialen Kosten von Kohlenstoff („social costs of carbon“)¹⁶ herangezogen. Neuere Versionen des Modells basieren auf einem genetischen Algorithmus zur Auffindung eines Emissionspfades, welcher die wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels zusätzlich der Emissionsvermeidungskosten minimiert.

MESSAGE-MACRO¹⁷ [202, 203, 237, 248, 282] stellt ein gutes Beispiel der Komplementarität vieler entwickelter IAMs bzw. von deren Teilsystemen dar, da die Outputs des Modells in Form der berechneten Schadstoffemissionen an das im Folgenden vorgestellte RAINS-Modell sowie an das in dieser Arbeit nicht näher behandelte Klimamodell MAGICC¹⁸ [325] wei-

¹⁵PAGE: Policy Analysis for the Greenhouse Effect

¹⁶„Social costs of carbon“ bezeichnen die wirtschaftlichen Schäden, die mit einem marginalen Anstieg der Treibhausgasemissionen einhergehen, bzw. die durch einen marginalen Rückgang der Emissionen vermiedenen Schäden und lassen Rückschlüsse auf die notwendige Höhe einer Kohlenstoffsteuer zu.

¹⁷MESSAGE: The Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impact

¹⁸Das Klimamodell MAGICC wird auch in einigen weiteren IAMs verwendet [312].

tergegeben werden können. MESSAGE-MACRO selbst besteht aus einem makroökonomischen Modell, welches aus dem oben beschriebenen Modell MERGE abgeleitet wurde, und dem Energiesystemmodell¹⁹ MESSAGE. Letzteres berechnet basierend auf der gegebenen Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen die hinsichtlich der Gesamtsystemkosten optimale Struktur der Energiebereitstellung inklusive des internationalen Handels zwischen elf Weltregionen, der benötigten Investitionen sowie der Schadstoffemissionen. Die beiden Teilmodelle sind dabei nicht vollständig integriert, sondern werden iterativ und sich gegenseitig beeinflussend gelöst, bis ein bestimmtes Konvergenzkriterium erreicht wird. Hierzu werden zunächst beiden Teilmodellen durch einen Szenario-Generator die zukünftige Endenergienachfrage sowie die Bruttoinlandsprodukte vorgegeben, wobei beide Parameter wiederum in den einzelnen Modellläufen angepasst werden. Die mittels MESSAGE berechneten Gesamtsystemkosten werden in für das makroökonomische Teilmodell passende Kostenfunktionen konvertiert, welches seinerseits den Endenergiebedarf für die Optimierung in MESSAGE vorgibt. Von einer Rückkopplung der induzierten Umwelt- und Klimaauswirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung wie in den vorigen Modellen wird abgesehen, der Detaillierungsgrad der energiebedingten Emissionsentstehung ist jedoch deutlich höher.

Das sozio-ökonomische Teilmodell des Modellsystems **MADIAMS**²⁰ [317, 318] weist einige Parallelen zu den oben beschriebenen klassischen angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodellen auf, unterscheidet sich jedoch von diesen bspw. durch den Multi-Agenten-Ansatz²¹. In diesem Ansatz wird zwischen Lohnempfängern, Konsumenten, Wirtschaftssubjekten und Staat unterschieden, die allesamt als Agenten modelliert werden, durch unterschiedliche Präferenzen gekennzeichnet sind und demzufolge unterschiedliche Entscheidungen fällen. So verfolgt der Staat bspw.

¹⁹Bezüglich der Funktionsweise eines Energiesystemmodells vgl. auch das weiter unten beschriebene Modell IKARUS

²⁰MADIAMS: Multi-Actor Dynamic Integrated Assessment Model System

²¹Im Gegensatz zu den stark aggregierten Ansätzen vieler volkswirtschaftlicher Modelle, wird in einem Multi-Agenten-Ansatz eine bessere mikroökonomische Fundierung durch die Betrachtung der Interaktionen einzelner Objekte bzw. Subjekte (Agenten), welche somit die Treiber der Entwicklungen darstellen, realisiert; Vgl. hierzu z.B. Abschnitt 3.3 oder [21]. In MADIAMS werden die Agenten als Akteure bezeichnet, zur Verdeutlichung der Tatsache, dass keine Objekte sondern lediglich Personen modelliert werden.

das Ziel der Maximierung der Wohlfahrt, indem er zur Minderung der Klimaschäden Kohlenstoffsteuern erhebt und deren Verwendung festlegt. Die Wirtschaftssubjekte hingegen entscheiden über Investitionen in physisches Kapital, Humankapital oder Effizienzmaßnahmen bezüglich des Energie- bzw. Kohlenstoffeinsatzes, welche zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen führen können. Investitionen in Humankapital und damit der Arbeitsproduktivität gelten dabei als Treiber des endogen modellierten technischen Fortschritts. Die Konsumenten wiederum ändern ihre Konsumpräferenzen abhängig vom zu erwartenden Klimawandel, wobei zwischen zwei Produkten - klimafreundlichen und klimaschädlichen - unterschieden wird. Ein mit dem sozio-ökonomischen Teilmodell gekoppeltes Klimamodell berechnet basierend auf den entstehenden CO₂-Emissionen die resultierenden Temperaturänderungen, die wiederum in Kosten zur Vermeidung der entstehenden Schäden umgerechnet werden. Letztlich erlaubt das Modellsystem die Analyse dieser und weiterer zahlreicher Rückkopplungen und Entwicklungen im klima- und sozioökonomischen Gesamtsystem, von quantitativen Projektionen wird jedoch Abstand genommen. Neuere Versionen des Modells nutzen einen systemdynamischen Ansatz (vgl. bspw. TARGETS) um, motiviert durch die Finanzkrise, auch instabile wirtschaftliche Entwicklungen berücksichtigen zu können (nähere Informationen hierzu finden sich in [135, 137]).

Auf europäischer Ebene wird als eines der wichtigsten IAMs das **GAINS**²²-Modell [10, 11, 173, 314], welches aus dem Vorläufer **RAINS**²³ hervorgegangen ist, angesehen. Mit der Erweiterung des RAINS-Modells, welches zunächst lediglich Schadstoffe betrachtete, um die sechs im Kyoto-Protokoll festgehaltenen Klimagase hin zum GAINS-Modell wurde als Ziel die Identifikation von Synergieeffekten bei der Minderung der betrachteten Schadstoff- und Treibhausgasemissionen verfolgt. Hierzu wird mittels eines linearen Optimierungsansatzes die kostenminimale²⁴ Allokation von Emissionsminderungsmaßnahmen in den einzelnen betrachteten Ländern, Sektoren und Aktivitäten zur Erreichung eines vordefinierten Minderungsziels bestimmt. Eine Aktivität repräsentiert dabei bspw. den Kohleverbrauch

²²GAINS: Greenhouse gas - Air pollution Interactions and Synergies

²³RAINS: Regional Air Pollution Information and Simulation

²⁴Die Kosten beziehen sich, wie in den folgend beschriebenen IAMs auch, ausschließlich auf die Emissionsvermeidungskosten aus der Implementierung der Maßnahmen und schließen investitionsabhängige, fixe und variable Betriebskosten mit ein [159].

von Kraftwerken, wobei die Anwendungsrate, die den Umfang des Einsatzes bestimmter Emissionsminderungsmaßnahmen innerhalb der einzelnen Aktivitäten darstellt, als Entscheidungsvariable herangezogen wird. Die Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung (Transport) der Emissionen erfolgt anhand von Quellen-Rezeptor-Beziehungen, die über ein vorhandenes Ausbreitungsmodell abgeschätzt und weitestgehend linearisiert werden. Das RAINS- bzw. das GAINS-Modell wurden bereits in zahlreichen internationalen Verhandlungen als Entscheidungsunterstützung zur Festlegung von Minderungszielen eingesetzt [159]. Darüber hinaus wurden aber auch die im Folgenden beschriebenen Modelle MERLIN, CASM und ASAM bei der Ableitung europäischer Emissionsminderungsstrategien berücksichtigt [169].

Das Modell **MERLIN**²⁵ [24, 239, 240] weist viele Parallelen zum GAINS-Modell auf. Es wurde ebenfalls auf Grund der beim RAINS-Modell festgestellten Defizite entwickelt und berücksichtigt analog zu GAINS explizit Wechselwirkungen bezüglich der verschiedenen Schadstoff- und Klimagasemissionen bei der Implementierung unterschiedlicher Emissionsminderungsmaßnahmen. Hierzu kommt ein Datenbank-basiertes Modell mit Informationen über Aktivitäten (vgl. GAINS-Modell), mögliche Minderungsmaßnahmen sowie deren gegenseitige Beeinflussung zum Einsatz, welches heuristisch mittels eines evolutionären Algorithmus nicht nur die kostengünstigste Allokation von Minderungsmaßnahmen berechnet, sondern darüber hinaus auch alternativ das Kosten-Nutzen-Verhältnis als Optimierungskriterium heranzieht. Dabei werden die Kosten für die Implementierung einer Maßnahme dem monetären Nutzen der vermiedenen Umweltauswirkungen gegenübergestellt. Die Modellierung der Emissionsausbreitung erfolgt ebenfalls ähnlich zum GAINS-Modell. Eine Erweiterung stellt die Abschätzung induzierter makroökonomischer Effekte dar, wobei sich diese auf die Entwicklung der Beschäftigung, des Wirtschaftswachstums und der Einkommensverteilung beschränken.

Die im Folgenden erläuterten europäischen IAMs ASAM und CASM sind dem RAINS-Modell ebenfalls sehr ähnlich [168]. Das **CASM**²⁶-Modell [127, 265] basiert bspw. auch auf einem linearen Optimierungsansatz, wobei

²⁵MERLIN: Multi-Pollutant Multi-Effect Modeling of European Air Pollution Control Strategies - an Integrated Approach

²⁶CASM: Co-ordinated Abatement Strategy Model

hier der durch das GAINS-Modell bereits überholte Kostenkurvenansatz aus RAINS verwendet wird. Dieser Ansatz weist jedem Schadstoff und jeder Aktivität abhängig vom angestrebten Minderungsumfang Kosten zu, wozu die einzelnen einsetzbaren Minderungsmaßnahmen gemäß deren zunehmenden marginalen Emissionsvermeidungskosten sortiert werden. Diese Vorgehensweise lässt zwar Synergieeffekte bei der Minderung mehrerer Schadstoffe unberücksichtigt, was aber angesichts der Tatsache, dass das CASM-Modell lediglich auf die Verminderung der Versauerung abzielt, von eher untergeordneter Relevanz ist. Die Stärken des Modells liegen in der Integration unterschiedlicher Zielfunktionen, so dass bspw. auch eine Minimierung der Überschreitung vordefinierter Belastungsgrenzen ermöglicht wird. Die Genauigkeit der Modellierung der Emissionsentstehung ist höher als bei vergleichbaren Modellen, da einzelne Kraftwerke betrachtet werden und keine Clusterung der Prozesse erfolgt. Die auf linearen Funktionen basierende Ausbreitungsmodellierung ist wie im Falle von GAINS und MERLIN ebenfalls ein zentraler Bestandteil des Modells.

Auch das letzte in dieser Arbeit vorgestellte europäische IAM **ASAM**²⁷ [15, 315, 316] weist große Parallelen zu den vorigen Modellen auf. Zur Abschätzung der Emissionsvermeidungskosten wird wiederum der Kostenkurvenansatz aus RAINS herangezogen, wobei in ASAM nicht zwischen unterschiedlichen Prozessen bzw. Emissionsquellen differenziert wird, die Kostenkurven somit lediglich auf Durchschnittswerten beruhen und auf aggregierte Gebiete, die eine Vielzahl unterschiedlicher Emissionsquellen enthalten können, angewendet werden. Ein Vorteil des Modells besteht in dem verwendeten Lösungsalgorithmus („Best Economic Environmental Pathway“, BEEP), der eine schrittweise Verbesserung der Ausgangslösung vorsieht und die Lösungsfindung damit nachvollziehbar gestaltet. Dieser Algorithmus sieht in jeder Iteration die Implementierung der jeweils bezüglich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses nächstbesten Maßnahme vor, wobei der Nutzen wiederum durch die Höhe der Überschreitungen vorgegebener Grenzbelastungen, also der Differenz zwischen simulierter Schadstoffdeposition und der in dem jeweiligen Gebiet als gerade nicht mehr schädlich geltenden Deposition, definiert ist. Auch ASAM nutzt Quellen-Rezeptor-Matrizen zur Modellierung der Emissionsausbreitung.

²⁷ASAM: Abatement Strategies Assessment Model

Das Modell **UKIAM**²⁸ war eines der ersten nationalen IAMs und wurde entwickelt, um in das bereits vorgestellte europäische ASAM-Modell eingebettet zu werden und die auf Großbritannien bezogenen induzierten Umweltauswirkungen in höherer Auflösung abschätzen zu können. Genauere Beschreibungen des Modells können bspw. Oxley et al. [220–222] entnommen werden. Auch wenn UKIAM einen eigenständigen Ansatz verfolgt, lassen sich dennoch viele Parallelen zu RAINS bzw. GAINS feststellen. Zunächst basierte das Modell auf dem Kostenkurvenansatz von RAINS. Im Gegensatz zu letzterem wurde in UKIAM jedoch eine Kosten-Nutzen-Optimierung durchgeführt, wobei der Nutzen analog zu ASAM durch die Höhe der Überschreitung von Grenzbelastungen quantifiziert wurde. In der aktuellen Version des inzwischen simulationsbasierten Modells wird die Kosten-Nutzen-Bewertung nachträglich durchgeführt, wobei nun die Kosten den Minderungsmaßnahmen, die auch mehrere Schadstoffe gleichzeitig adressieren können, und nicht den einzelnen Schadstoffen zugeordnet werden (vgl. GAINS). Die Ausbreitungsmodellierung erfolgt wiederum über Quellen-Rezeptor-Beziehungen. Der Vorteil der genaueren regionalen Auflösung gegenüber den europäischen Modellen liegt unter anderem darin, dass teilweise einzelne Punktquellen wie bspw. große Kraftwerke separat betrachtet werden können.

Das im Rahmen des Projekts **MINNI**²⁹ [59, 232, 308, 335] entwickelte IAM basiert auf dem RAINS-Modell, welches unter Berücksichtigung nationaler Besonderheiten genauer aufgelöst wird (RAINS-Italy). Während der Ansatz zur Modellierung der Emissionsentstehung äquivalent zu RAINS ist (Kostenkurvenansatz), wird die Modellierung des Schadstofftransports über ein anderes Ausbreitungsmodell, ebenfalls mittels Quellen-Rezeptor-Matrizen, abgebildet. Weitere Schwerpunkte von RAINS-Italy stellen der explizite Einbezug des Seeverkehrs sowie der Fokus auf nicht-technischen Maßnahmen zur Emissionsminderung dar. Diese nicht-technischen Maßnahmen berücksichtigen das menschliche Verhalten und lassen sich vor allem in den Bereichen Wohngebäude und Verkehr finden (Bsp.: Car-Sharing, zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen).

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Ansätzen liegt der Fokus des Modells **PANTA RHEI** [181, 188–190, 205, 206] alleinig auf dem sozio-

²⁸UKIAM: UK Integrated Assessment Model

²⁹MINNI: National Integrated Modeling system for International Negotiation on atmospheric pollution

ökonomischen Teilsystem, d.h. die Einbeziehung ökologischer Auswirkungen beschränkt sich auf die Berechnung der entstehenden Emissionen und es schließt sich kein Klima- oder Schadstoffausbreitungsmodell an. Den zentralen ökonomischen Kern von PANTA RHEI bildet ein Input-Output-Modell³⁰, dessen Parameter ökonometrisch, d.h. basierend auf identifizierten Abhängigkeiten, geschätzt durch Regressionsanalysen vorhandener Daten, bestimmt werden und das einen hohen Endogenisierungsgrad aufweist. Weiterhin besteht das Modell aus einem Verkehrsmodul, einem Modul „Bauen und Wohnen“, sowie einem Energiemodul, die jeweils die Endenergienachfrage dieser Sektoren detaillierter berechnen, in das Input-Output-Modell zurückgeben und gleichzeitig durch dieses bspw. über geänderte Preise beeinflusst werden. Die Vorteile eines Input-Output-Modells liegen dabei in der Berücksichtigung der wirtschaftlichen Verflechtungen zwischen den Sektoren, die sich wechselseitig über ihre jeweiligen Vorleistungen beeinflussen und aggregiert ein konsistentes Bild der Volkswirtschaft liefern. Im Energiemodul werden zwar keine einzelnen Prozesse oder Emissionsminderungsmaßnahmen explizit modelliert, die notwendigen Parameter werden jedoch differenziert nach 30 Energieträgern ökonometrisch unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts über die Zeit geschätzt. Im Gegensatz dazu wird bezüglich der energieintensiven Industrien wie der Eisen- und Stahlindustrie zwischen den maßgeblichen Produktionsverfahren (Primär- und Sekundärroute) unterschieden und der technologische Wandel detaillierter, ebenfalls auf Basis eines ökonometrischen Ansatzes, abgeschätzt, wiederum ohne explizit einzelne Emissionsminderungsmaßnahmen zu modellieren. Letztlich erlaubt die Struktur des Gesamtmodells eine detaillierte Abschätzung der makroökonomischen Effekte verschiedener klimapolitischer Instrumente, insbesondere von Steuern oder Subventionen.

Das Modell **MIS/IKARUS-MARKAL**³¹ [195, 197, 229, 310] ist durch die Kopplung eines makroökonomischen Input-Output-Modells (MIS) mit einem Energiesystemmodell (IKARUS) mittels eines Soft-Links gekennzeichnet. Ähnlich zu PANTA RHEI dient das Input-Output-Modell der Beschreibung der wirtschaftlichen Entwicklung einzelner Sektoren, wobei die energieerzeugenden und -verbrauchenden Sektoren vergleichsweise

³⁰Zur Funktionsweise eines Input-Output-Modells siehe Kapitel 4

³¹MIS: Macroeconomic Information System, IKARUS: Instruments for Greenhouse Gas Reduction Strategies, MARKAL: Market Allocation

detailliert abgebildet werden. Der Endogenisierungsgrad dieses Modells hingegen ist geringer als der von PANTA RHEI, so dass bspw. zukünftige Exporte und die Höhe des privaten Konsums exogen in Szenarien vorgegeben werden. Änderungen in der Produktionsstruktur werden über Produktionsfunktionen modelliert, die die Substitution von Energie durch Kapital oder von Energieträgern durch andere Energieträger abhängig von den gegebenen Energiepreisentwicklungen und Energiesteuern erlauben. Dem Input-Output-Modell gegenüber steht das Energiesystemmodell, welches unter den gegebenen Rahmenbedingungen den Technologiemitmix derart optimiert, dass ein Minimum der Gesamtsystemkosten erreicht wird. Dieses Energiesystemmodell basiert auf einem Linearen-Programmierungs-Ansatz und integriert „die Gewinnung oder [den] Import von Primärenergie, die Umwandlung in Sekundärenergie (z.B. Stromerzeugung) und deren Verteilung sowie schließlich die Nutzung beim Endverbraucher für die Nachfrage nach Energiedienstleistungen (z.B. Transport von Gütern und Personen, Industrieproduktion)“ [195]. Das Energiesystemmodell berechnet neben dem Elektrizitätsmix auch Faktoren zur Repräsentation des technischen Fortschritts, wobei beide Parameter in das Input-Output-Modell weitergegeben werden. Umgekehrt liefert das Input-Output-Modell Informationen über die Nachfrage, welche das Energiesystem beeinflusst. Daneben spezifizieren drei weitere Simulationsmodelle die drei wichtigsten Sektoren Industrie, Verkehr und Raumwärme hinsichtlich der Emissionen, Kosten und weiterer Größen. Neben dem Einbezug des existierenden Kraftwerksparks in die Optimierung zeigt vor allem die umfassende Datenbank zu den Einzeltechniken (z.B. Gaskraftwerk, Wärmepumpe) die technische Fundierung des Modells auf.

Wie die beiden vorherig beschriebenen Modelle nutzt auch **otello**³² [41, 54, 159, 274] ein Input-Output-Modell zur Simulation der makroökonomischen Zusammenhänge. Dieses dynamische Input-Output-Modell berechnet den Konsum privater Haushalte sowie die Investitionen der Produktionsbereiche endogen und bestimmt die zur Befriedigung der Endnachfrage notwendigen Produktionsmengen der einzelnen Sektoren. Diese wiederum werden mittels eines aktorsbasierten Ansatzes sehr detailliert abgebildet, wobei sich die Analysen auf ausgewählte, hinsichtlich ihrer Emissionen bedeutende Industriesektoren (Stahl und Zement) sowie den Energiesektor

³²otello: Entwicklung eines optimierenden Bewertungs- und Allokationsmodells für ein nationales Emissionsmanagement

beziehen. Der akteursbasierte Ansatz ist durch die Modellierung einzelner Werke als Akteure gekennzeichnet, welche abhängig von der gegebenen Marktsituation sowie den umweltpolitischen Rahmenbedingungen Investitionsentscheidungen bezüglich des Anlagenbestands fällen, was letztlich einer endogenen Modellierung der Technologiediffusion gleichkommt. Die Abbildung der Produktionsprozesse und der Emissionsminderungstechnologien erfolgt dabei sehr detailliert auf der Ebene der Inputkoeffizienten einzelner Anlagen (mehrstufige Referenzprozessfolgen, vgl. Abschnitt 3.4). Die in den Sektormodellen simulierten Änderungen werden wiederum aggregiert an das Input-Output-Modell zurückgegeben. Darüber hinaus werden die Entwicklung des Wohngebäudebestands inklusive etwaiger energetischer Modernisierungen sowie die Entwicklung des Verkehrs in separaten Teilmodellen abgebildet. In allen Teilmodellen liegt ein besonderer Fokus auf der Modellierung umweltpolitischer Instrumente, deren verschiedene mögliche Ausprägungen und Wechselwirkungen in Szenarien untersucht werden.

Abbildung 3.1 zeigt nochmals zusammenfassend in einer qualitativen Darstellung die Einordnung der betrachteten Modelle hinsichtlich zwei der drei identifizierten Kriterien: makroökonomische Rückkopplungen (II) und technisch fundierte Modellierung der Prozesse (III). Es zeigt sich, dass die Bottom-up-Modelle naturgemäß eine technisch fundierte Modellierung der Emissionsentstehung erlauben, während Top-down-Modelle vor allem die makroökonomischen Rückkopplungen in den Vordergrund stellen. Hybride Ansätze, welche die Bottom-up- und Top-down-Ansätze integrieren, machen sich hierbei beide Vorteile zunutze. Daneben erlauben die meisten der analysierten hybriden Modellsysteme die Modellierung von Reaktionen auf klimapolitische Instrumente (I), was Tabelle 3.1 verdeutlicht. Da gemäß Abbildung 3.1 das otello-Modell aufgrund seiner detaillierten Modellierung der Emissionsentstehung auf Anlagenebene und des gleichzeitigen Einbezugs makroökonomischer Rückkopplungen auf sektoraler Ebene dazu in der Lage scheint, die im Abschnitt 2.4 definierten Anforderungen zumindest annähernd zu erfüllen, nutzt das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Modell die Grundidee des otello-Modells, welche die Kopplung eines

- **Input-Output-Modells** (vgl. Abschnitt 3.2) mit einem
- **aktorsbasierten Ansatz** (vgl. Abschnitt 3.3) unter Verwendung von **mehrstufigen Referenzprozessfolgen** (vgl. Abschnitt 3.4)

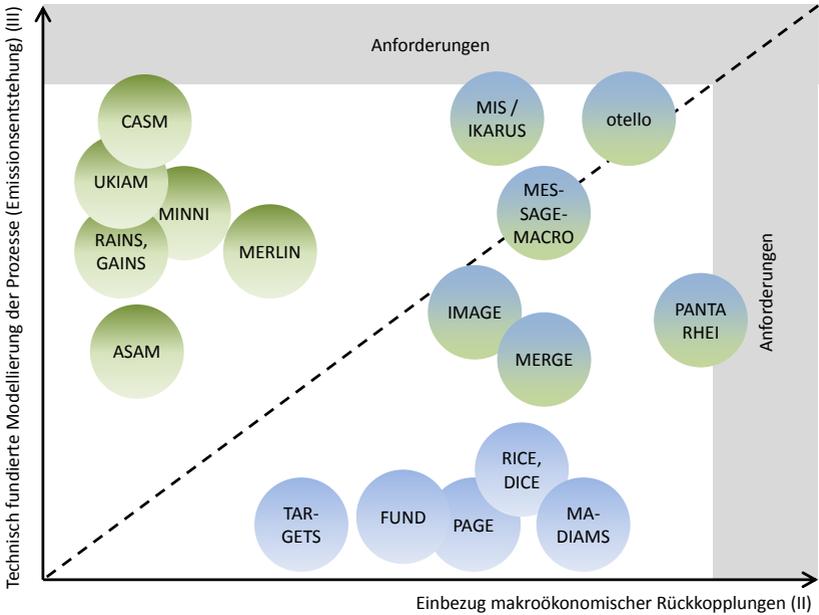


Abbildung 3.1.: Qualitative Einordnung ausgewählter Integrated Assessment Modelle mit Fokus auf dem sozio-ökonomischen Teilsystem (grün: Bottom-up-Modelle, blau: Top-down-Modelle, blau-grün: hybride Modelle)

vorsieht. Allerdings sind tiefgreifende Änderungen zur vollständigen Erfüllung der definierten Anforderungen notwendig, da otello zum einen keine Emissionen auf Ebene des Input-Output-Teilmodells berechnet, was die Analysen auf die im aktorsbasierten Teilmodell berechneten Emissionen beschränkt, und zum anderen die modellierten Emissionsminderungsmaßnahmen maßgeblich auf die Minderung von Schadstoffen abzielen, wobei die Minderung von Treibhausgasen durch Effizienzsteigerungen nur rudimentär abgebildet ist. Diese und weitere notwendige Anpassungen fordern eine umfassende Überarbeitung des otello-Ansatzes zur Beantwortung der in Kapitel 2 aufgezeigten Fragestellung, weshalb die damit einhergehenden umfangreichen Abweichungen vom originären otello-Modell in den folgenden Abschnitten 3.2, 3.3 und 3.4, welche darüber hinaus die bisherigen

Defizite vergleichbarer (Teil-)Modelle darlegen, sowie in Abschnitt 3.5 herausgestellt werden.

3.2. Makroökonomische Input-Output-Modelle

Der vorige Abschnitt zeigt die prinzipielle Eignung eines Input-Output-Ansatzes zur Analyse klimapolitischer Fragestellungen. Bevor nun die Defizite bestehender Arbeiten und damit die notwendigen Neuerungen des zu entwickelnden Input-Output-Teilmodells in Abschnitt 3.2.2 dargelegt werden, zeigt Abschnitt 3.2.1 einen kurzen Vergleich zu weiteren weit verbreiteten Ansätzen, mit denen sich vergleichbare Fragestellungen adressieren lassen.

3.2.1. Abgrenzung von Input-Output-Modellen zu anderen vergleichbaren Ansätzen

Die Grundidee, die sektoralen monetären Verflechtungen einer Volkswirtschaft durch eine Input-Output-Tabelle (IO-Tabelle) zu beschreiben, geht ursprünglich auf Leontief [184] und die späten 30er Jahre zurück. Diese strukturelle Darstellung ermöglicht damals wie heute die Analyse verschiedenster wirtschaftlicher Auswirkungen, bspw. von Nachfrage- oder Preisimpulsen in einzelnen oder mehreren Sektoren auf alle anderen Sektoren, die durch Lieferverflechtungen mit ersteren in Verbindung stehen, wobei sämtliche Lieferverflechtungen simultan berücksichtigt und somit nicht nur direkte, sondern auch indirekte Effekte abgeschätzt werden können [159].

Eine wesentliche Alternative zur IO-Modellierung bei der Abbildung makroökonomischer Zusammenhänge stellen die angewandten allgemeinen Gleichgewichtsmodelle (AAG) dar [205] (vgl. hierzu auch die vorigen Abschnitte 3.1.2 und 3.1.3). Diese zeichnen sich zwar durch ihre bessere mikroökonomische Fundierung im Vergleich zu IO-Modellen aus, jedoch gestaltet sich deren Parametrisierung durch das häufige Fehlen relevanter Daten äußerst schwierig [319]. Weiterhin stellt die disaggregierte Sektorenstruktur der IO-Modelle einen Vorteil gegenüber den AAGs dar [159], welche auch durch die in dieser Arbeit identifizierten Anforderungen vonnöten

ist (vgl. Kriterium (II) sowie die Modelle MIS/IKARUS, PANTA RHEI und otello in Abbildung 3.1).

Neben dem über die Jahre gewachsenen Interesse an IO-Analysen zur Ableitung wirtschaftlicher Auswirkungen gewann auch, wiederum durch Leontief [183] vorangetrieben, die Integration ökologischer Aspekte an Bedeutung. Allgemein werden in um Umweltaspekte erweiterten IO-Modellen, auch EEIO-Modelle (*Environmentally Extended Input-Output models*) genannt, sektorale Daten, welche die zu analysierenden Umweltbelastungen repräsentieren, mit den finanziellen Transaktionen zwischen den jeweiligen Sektoren verknüpft [209]. Zahlreiche Anwendungsbeispiele hierfür lassen sich bspw. in Suh [281] finden. Charakteristisch zeigt sich auch hier die Berücksichtigung indirekter Effekte, wodurch ökologische Fußabdrücke einzelner Produkte bzw. Sektoren unter Einbezug der gesamten Wertschöpfungskette berechnet werden können.

Der letzte Aspekt verdeutlicht die Ähnlichkeit von IO-Modellen zur Ökobilanzierung (Life-Cycle Assessment, LCA). LCA³³ ist ein Werkzeug um ökologische Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu analysieren und zu bewerten [167], wobei hierbei in der Regel der (klassische) Bottom-up-Ansatz³⁴ unter Verwendung von Prozessanalysen verstanden wird (vgl. [322]). Obwohl das Konzept verhältnismäßig einfach scheint, birgt es in der Realität jedoch einige Schwierigkeiten, da sämtliche Vorprodukte, welche wiederum aus Vorprodukten bestehen, sowie die Interdependenzen der gegebenen Produktionsstrukturen berücksichtigt werden müssen [167]. Dies limitiert den Umfang einer LCA auf die wichtigsten Vorprodukte bzw. die wichtigsten Inputs. Im Gegensatz dazu ermöglicht der IO-Ansatz die Berücksichtigung aller direkten und indirekten Wechselwirkungen in der Produktionsstruktur (vgl. [179]). Neben reinen LCA- und IO-Ansätzen existieren auch sogenannte hybride LCAs, welche die Detailebene und Genauigkeit des Bottom-up-Ansatzes einer LCA für die wichtigsten Prozesse nutzen und die weniger bedeutenden (restlichen) Produktionsschritte über einen die Produktionsstrukturen vollständig berücksichtigenden IO-Ansatz abdecken [322]. Eine ähnliche

³³Ein Überblick über die Entwicklung von LCA und verwandter Methoden kann bspw. Guinée et al. [129] entnommen werden.

³⁴Die in Kapitel 2 bereits erwähnte ecoinvent-Datenbank [9] bspw. liefert Daten zu den ökologischen Auswirkungen einzelner hinsichtlich ihrer Emissionen wichtiger Prozesse.

Vorgehensweise wird auch in dem hier zu entwickelnden Modell verfolgt, da die Metallerzeugung als energie- und rohstoffintensive Industrie detailliert zu betrachten ist (vgl. Abschnitt 3.4), die restlichen von dieser Industrie abhängigen Prozessschritte jedoch nicht vernachlässigt werden können (vgl. auch Kriterium (II), welches die Notwendigkeit einer (Industrie-)sektorübergreifenden Sichtweise verdeutlicht).

3.2.2. Defizite existierender Input-Output-Modelle

Im Rahmen der IO-Analyse existieren zahlreiche Forschungsarbeiten, die den *Carbon Footprint*, also die Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, verschiedener Länder und Sektoren berechnen. Hierbei gewinnen neuerdings vor allem multiregionale IO-Modelle (MRIO-Modelle), die auch den internationalen Handel und damit die „importierten“ Treibhausgasemissionen berücksichtigen, an Bedeutung. Ein Überblick hierzu lässt sich bspw. in Minx et al. [209] oder Wiedmann [323] finden. In der Regel wird der Ansatz des *consumption-based Accounting* favorisiert, welcher die Treibhausgasemissionen entlang des Lebenszyklus (*embodied greenhouse gas emissions*) in Relation zur Endnachfrage wiedergibt [328], im Gegensatz zum Ansatz des *production-based Accounting*, welcher die direkt emittierten Treibhausgase den emittierenden Industriesektoren zuordnet³⁵.

Der *Carbon Footprint* wurde zusammen mit den jeweils „importierten“ Treibhausgasemissionen bereits für zahlreiche Länder berechnet, so z.B. für Großbritannien [324], Italien [211], Brasilien [191], Japan [214], China [286] oder für verschiedene Weltregionen [326]. Mit neu entwickelten einheitlichen multiregionalen Datenbasen wie bspw. den globalen IO-Tabellen WIOD³⁶ [287] oder EXIOBASE [292] werden diese Analysen deutlich vereinfacht. Bei Verwendung einer nationalen IO-Tabelle, falls bspw. die sektorale Einteilung der multiregionalen (globalen) IO-Tabelle zu ungenau ist oder von der Sektorstruktur der nationalen IO-Tabelle nicht abgewichen werden soll, stellt eine Möglichkeit der Grobabschätzung „importierter“ Emissionen die Annahme dar, dass die Importe mit derselben Produktionstechnologie wie die inländischen Erzeugnisse hergestellt werden (*domestic technology*

³⁵Ein Vergleich der beiden Ansätze lässt sich bspw. in Peters und Hertwich [227] finden.

³⁶WIOD: World Input-Output Database

assumption). Andrew et al. [12] stellen heraus, dass diese Annahme im Vergleich zum MRIO-Ansatz zwar mit signifikanten Fehlern behaftet ist, jedoch deutlich bessere Ergebnisse liefert als die Vernachlässigung der Importe.

Mit den bisher aufgezeigten Ansätzen können direkt oder indirekt emittierte Treibhausgase sowie die Extraktion fossiler Ressourcen im Sinne eines ökologischen Fußabdrucks der Nachfrage nach bestimmten Gütern zugeordnet werden. Hierbei wird jedoch normalerweise der tatsächliche finale Verwendungszweck des Kohlenstoffs außer Acht gelassen, insofern fossile Brennstoffe nicht zur Energieumwandlung verbrannt werden, was mit dem Ausstoß von CO_2 einhergeht, sondern zur Produktion von Gütern, bspw. von kunststoffhaltigen Produkten, verwendet werden. Letztere stellen eine bedeutende Kohlenstoffsенke dar und könnten ggf. auch als sekundäre Rohstoffe für zukünftige Perioden dienen. Zudem kann durch eine explizite Berücksichtigung des in Produkten chemisch gebundenen Kohlenstoffs eine Trennung von Effizienzsteigerungen hinsichtlich der Energieeffizienz, welche sowohl die CO_2 -Emissionen als auch den fossilen Rohstoffverbrauch senkt, und der Materialeffizienz, welche primär den fossilen Rohstoffverbrauch senkt, erfolgen. Dies ist vor allem deshalb notwendig, da auch hinsichtlich der klimapolitischen Instrumente eine Trennung von Energie- und Materialeinsatz sinnvoll sein kann. Letzterer wird bspw. kaum durch das Instrument des Emissionszertifikatehandels adressiert, da der Emissionsrückgang bei einer Verringerung des Materialeinsatzes in der Regel in vorgelagerten Produktionsstufen erfolgt und nicht zu direkten Einsparungen beim (End-)Produzenten führt. Somit stellt es ein Ziel des zu entwickelnden Input-Output-Teilmodells dar, den Aspekt der Trennung von Energie- und Materialeffizienz mit einzubeziehen.

Neben dem aufgezeigten Defizit der Vernachlässigung des chemisch im Produkt gebundenen Kohlenstoffs ist ein weiteres zu nennen, das den einbezogenen Zeithorizont betrifft, da in vielen IO-Modellen hauptsächlich ex-post Analysen durchgeführt und mögliche zukünftige Entwicklungen außer Acht gelassen werden, was den Einsatz solcher Modelle zur Bewertung zukünftiger Klimapolitiken stark einschränkt. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit neben statischen IO-Modellen auch dynamische entwickelt, wobei der Begriff Dynamik im Bezug auf den IO-Ansatz unterschiedlich verstanden werden kann.

Nach Duchin und Szyld [87] erweitert ein, auf die Grundidee Leontiefs zurückzuführendes, dynamisches IO-Modell die Grundeigenschaften der statischen Version durch eine Kapitalbedarfs-Matrix und die Möglichkeit der Akkumulation von Kapitalgütern durch eine multisektorale Akzelerations-Formulierung. Auch nach Pauliuk [226] bezieht sich die Dynamik in IO-Analysen in der Regel auf die Dynamik von Kapital- und Materialbeständen. Allerdings erweist sich eine empirisch fundierte Verwendung dieses theoretischen Ansatzes aufgrund unplausibler Ergebnisse oftmals als sehr schwierig (vgl. hierzu Duchin und Szyld [87]). Deshalb werden bisweilen vereinfachte hypothetische Daten, wie bspw. im Model von Hoekstra und Janssen [144], das aus zwei Ländern und zwei Sektoren aufgebaut ist, herangezogen. Neuere Arbeiten verwenden Kohorten-Modelle [226], um diese Dynamiken abzubilden, was jedoch mit einem umfangreichen zusätzlichen Datenbedarf einhergeht.

Da jedoch die Annahme konstanter Koeffizienten wie im statischen Falle aufgrund des wirtschaftlichen Wandels nicht akzeptabel erscheint [319], ist, trotz der inhärenten Schwierigkeiten, eine bestimmte Form von Dynamik notwendig, wobei Dynamik in der vorliegenden Arbeit im Vergleich zur obigen Definition allgemeiner als die Änderung von Parametern über die Zeit verstanden wird. Diese Form von Dynamik ist vor allem in ökonometrischen IO-Modellen (vgl. bspw. PANTA RHEI) vorzufinden. In ökonometrischen IO-Modellen werden die Parameter basierend auf identifizierten Abhängigkeiten durch Regressionsanalysen vorhandener Daten geschätzt, was durch die große Anzahl an zu schätzenden Koeffizienten mit einem hohen Aufwand verbunden ist und lediglich einfache Regressionsanalysen zulässt (vgl. bspw. [206]). Dieser Problematik kann z.B. dadurch Abhilfe geschaffen werden, dass der Endogenisierungsgrad eines dynamischen IO-Modells durch die Vorgabe exogener Variablen reduziert wird (vgl. bspw. [319]). Dies wird auch im otello-Modell umgesetzt, das bspw. den privaten Konsum endogen auf Basis gegebener vergangener Konsumdaten berechnet, während die Exporte als weiterer wichtiger Teil der Endnachfrage exogen vorgegeben werden (vgl. [159]).

Die endogene Modellierung des privaten Konsums in IO-Modellen hin zum Typ³⁷ II ist relativ häufig vorzufinden [319]. Ein Ansatz, der sowohl in

³⁷Der Endogenisierungsgrad eines IO-Modells kann in vier Typen I-IV eingeteilt werden, wobei die endogenisierten Größen sich auf das Einkommen und die Ausgaben der

otello als auch in dem hier zu entwickelnden IO-Teilmodell verfolgt wird, ist die Verwendung eines linearen Ausgabensystems (*linear expenditure system*, LES), welches auf Pollak und Wales [233] sowie Stone [277] zurückzuführen ist und in Kapitel 4 genauer erläutert wird.³⁸

Zusammenfassend zeigt sich, dass das IO-Modell in otello zwar dazu in der Lage ist, dynamische Entwicklungen zu berücksichtigen, jedoch keinen EEIO-Ansatz verfolgt und die Berechnung der gesamten ökologischen Auswirkungen im Sinne eines ökologischen Fußabdrucks somit nicht ermöglicht. Dies stellt auch eine der wichtigsten Erweiterungen dar, die mit dem in dieser Arbeit zu entwickelnden Modell verfolgt werden. Dabei soll neben der (klassischen) Berechnung des *Carbon Footprint* auch der chemisch in Produkten gebundene Kohlenstoff berücksichtigt werden, um Aussagen über die gesamte Kohlenstoffintensität Deutschlands sowie einzelner Sektoren und die Auswirkungen verschiedener Klimapolitiken darauf machen zu können. Hierzu wird die explizite Formulierung physischer Kohlenstoffflüsse in einer separaten, aber zur monetären IO-Tabelle äquivalenten IO-Tabelle angestrebt, um die Konsistenz zwischen wirtschaftlicher und ökologischer Entwicklung zu gewährleisten. Dies lässt darüber hinaus eine ausgereiftere Berechnung der von der Energieeffizienz abhängigen CO₂-Emissionsfaktoren im Vergleich zum klassischen (statischen) Linkage-Ansatz (vgl. [159]) zu, bei dem die CO₂-Emissionen als Funktion der Produktionswerte einzelner Produktionsbereiche modelliert werden.

3.3. Agenten- und akteursbasierte Modellierung

Neben dem Input-Output-Teilmodell erscheint auch das im Rahmen von otello genutzte akteursbasierte Teilmodell vielversprechend hinsichtlich einer Nutzung zur Bewertung klimapolitischer Fragestellungen (vgl. Abschnitt 3.1.3), weshalb dieser Abschnitt einen kurzen Überblick über akteurs- bzw. agentenbasierte Modellierungsansätze gibt.

Haushalte (Typ II) sowie zusätzlich den Arbeitsmarkt beziehen (Typ III bzw. IV) [319].

³⁸Neben dem privaten Konsum werden in otello und dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz die Investitionen in Kapazitätsanpassungen ebenfalls, wenn auch in geringerem Detailgrad, endogen modelliert, wobei auf das Aufstellen einer Kapitalbedarfs-Matrix (vgl. oben) verzichtet wird.

In agentenbasierten Modellen werden die Beziehungen und Beschreibungen globaler Variablen eines klassischen top-down Ansatzes durch eine explizite Darstellung der mikroskopischen Merkmale eines Systems ersetzt, typischerweise in Form mikroskopischer Instanzen, sogenannter Agenten [128]. Nach Wooldridge [329] existieren zahlreiche unterschiedliche Definitionen eines Agenten. Er hebt jedoch hervor, dass es einen Konsens über eine zentrale Eigenschaft von Agenten, nämlich deren Autonomie, gibt und definiert einen Agenten als eine Instanz³⁹, welche sich in einer (irgendwie gearteten) Umwelt befindet und dazu fähig ist in dieser Umwelt autonom zu agieren um ihre vorgegebenen Ziele zu erreichen. Nach Bousquet und Le Page [39] stellen andere Definitionen die Heterogenität von Agenten oder etwa deren Interaktionen in den Vordergrund⁴⁰. Aufgrund der zahlreichen möglichen Definitionen existieren darüber hinaus viele, den Agenten zugeschriebene Eigenschaften. Nach Franklin und Graesser [117] muss ein autonomer Agent, neben dessen Autonomie, mindestens auch die Eigenschaften reaktiv, zielorientiert (proaktiv) und kontinuierlich besitzen. Weitere Eigenschaften können bspw. kommunikativ, lernend, mobil oder flexibel sein. Neben dem Begriff der agentenbasierten Modellierung lassen sich auch weitere ähnliche Begriffe wie Multiagenten-Simulation finden, die allesamt einzelne Modellaspekte besonders hervorheben (vgl. hierzu [132]).

Mit agentenbasierten Modellen können letztlich die Verhaltensweisen komplexer Systeme beschrieben werden, wobei sich zahlreiche unterschiedliche Anwendungsgebiete finden lassen, nicht zuletzt im Bereich der für diese Arbeit relevanten sozio-ökonomischen und ökologischen Modellierung (vgl. z.B. das Modell MADIAM oder Beckenbach und Briegel [21] oder Balbi und Giupponi [18]). Auch otello macht sich einen an agentenbasierte Modelle angelehnten Ansatz zu Nutze, nimmt jedoch von dem Agenten-Begriff Abstand und ersetzt ihn durch den Akteurs-Begriff. Dies hängt u.a. damit zusammen, dass vor allem Entscheidungen von Personen⁴¹ modelliert werden, welche als Stakeholder einzelner Unternehmen bzw. einzelner Werke verstanden werden können. Vereinfachend werden die Werke selbst als

³⁹Die Definition verwendet anstelle von *Instanz* den Begriff *Computersystem* [329], welcher jedoch hier als zu eng gefasst erachtet wird.

⁴⁰Franklin und Graesser [117] geben einen Überblick über einige mögliche Definitionen des Begriffs Agent.

⁴¹vgl. hierzu auch die Ausführungen zum Modellsystem MADIAMS in Abschnitt 3.1.3

Akteure bezeichnet, da der akteursbasierte Ansatz in otello primär dazu dient, die Technologiediffusion, repräsentiert durch die Investitionsentscheidungen in den Anlagenbestand, zu modellieren. Dadurch unterscheiden sich die Akteure hauptsächlich in ihrer Ausstattung (dem Anlagenbestand) und nicht hinsichtlich ihrer Funktion oder ihrem Verhalten [159] und sind deshalb vergleichsweise homogen. Zudem steht nicht die Modellierung von Interaktionen im Fokus, sondern die Aggregation des Verhaltens vieler Akteure unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen sowie der Einfluss dieser aggregierten Entscheidungen auf das Gesamtsystem. Da auch in dieser Arbeit die Investitionsentscheidungen von Stakeholdern einzelner Werke im Vordergrund stehen, wird der Akteurs-Begriff beibehalten.

Da mit dem akteursbasierten otello-Teilmodell die Technologiediffusion⁴² (und damit auch die erreichbaren Emissionsreduktionspotenziale) auf der Ebene einzelner Werke und Anlagen sehr gut abgebildet werden kann und das Teilmodell somit den in Abschnitt 2.4 definierten Anforderungen sehr nahe kommt, wird in dieser Arbeit ein ähnlicher Ansatz verfolgt. Dies bezieht sich allerdings nicht auf die Modellierung der Produktionsprozesse (vgl. folgender Abschnitt 3.4), welche in der vorliegenden Arbeit zwar ähnlich zu otello durch mehrstufige Referenzprozessfolgen repräsentiert werden sollen, jedoch deutliche Erweiterungen zur Abbildung von Energieeffizienzmaßnahmen erfordern.

3.4. Modelle zur Abbildung stoffstrombasierter Produktionsprozesse

Die Abbildung der Produktionsprozesse in otello auf der Ebene einzelner Anlagen und Inputkoeffizienten geht über die Detailtiefe nahezu aller IAMs hinaus und wurde bereits in Abschnitt 3.1.3 auch für die im Rahmen dieser Arbeit angestrebte Bewertung klimapolitischer Instrumente als prinzipiell geeignet identifiziert. In diesem Abschnitt werden neben dem aus otello bekannten Ansatz mehrstufiger Referenzprozessfolgen auch

⁴²Für weitere Ansätze zur Modellierung technischen Fortschritts sei auf Ilse [159] verwiesen.

weitere Möglichkeiten der Modellierung stoffstrombasierter Produktionsprozesse sowie die aus der zu bearbeitenden Fragestellung resultierenden notwendigen Anpassungen bestehender Ansätze aufgezeigt.

Einen guten Überblick über die stoffstromorientierte Planung und Bewertung vernetzter Produktionssysteme liefert Schultmann [261], weshalb sich die hier vorgenommene Einordnung maßgeblich daran orientiert. Der Überblick stellt vor allem Methoden zur Abbildung von Produktionssystemen der Prozessindustrie⁴³ dar, deren Produktionsprozesse sich „durch eine besondere strukturelle Komplexität hinsichtlich der auftretenden Input-Output-Relationen sowie hinsichtlich der Produktionsabläufe auszeichnen“ [261]. Hierzu zählt auch die Metallindustrie, deren wichtigste Prozessschritte bereits in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 für die Eisen- und Stahl- sowie die Aluminiumindustrie erläutert wurden.

Im Allgemeinen stellt eine weit verbreitete Möglichkeit, die Ausbringung von Produkten mit den eingesetzten Mengen an Produktionsfaktoren in Relation zu setzen, die Verwendung **produktionstheoretischer Ansätze** dar, welche den Einsatz verschiedener Produktionsfunktionen oder aber der Aktivitätsanalyse vorsehen. Unter einer Produktionsfunktion wird „die funktionale Abhängigkeit der erstellten Outputmengen [...] von den eingesetzten Inputmengen [...] verstanden“ [56], wobei mehrere Typen unterschieden werden. So wird beim auch Ertragsgesetz genannten Typ A eine zunächst progressive und im weiteren Verlauf degressive Zunahme des Gesamtertrags bei Erhöhung des Faktoreinsatzes unterstellt (vgl. Corsten [56]). Typ A ist weiterhin durch eine partielle Substitutionalität der Produktionsfaktoren gekennzeichnet. Der durch Gutenberg [131] geprägte Typ B sieht hingegen limitationale Faktoreinsatzbeziehungen vor, was bedeutet, dass eine bestimmte Ausbringungsmenge ein bestimmtes Faktoreinsatzverhältnis erfordert und eine Substitution einzelner Faktoren im Allgemeinen zu einer Verringerung der Ausbringungsmenge führen würde. Beim Typ B werden darüber hinaus technische Eigenschaften der Potentialfaktoren (Bsp.: Aggregate) sowie deren Intensität berücksichtigt, was mit einer höheren Realitätsnähe im Vergleich zum Typ A einhergeht (vgl. [56]). Die Repetierfaktoren (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe), welche

⁴³Die Prozessindustrie ist hauptsächlich durch stoffumwandelnde Prozesse charakterisiert (Bsp.: Eisen- und Stahlherstellung, Chemieindustrie), im Gegensatz zur Fertigungsindustrie, welche vor allem durch die Bearbeitung von Stückgütern gekennzeichnet ist.

im Produktionsprozess verbraucht werden, können beim Typ B durch konstante Produktionskoeffizienten gekennzeichnet sein oder von der Intensität der Potentialfaktoren abhängen (vgl. [56]). Der Fall konstanter Produktionskoeffizienten stellt den klassischen Input-Output-Ansatz nach Leontief dar (vgl. Abschnitt 3.2), der von linear-limitationalen Produktionsfunktionen ausgeht, was bedeutet, dass sich der Faktoreinsatz proportional zur Ausbringungsmenge verhält. Aus den Produktionsfunktionen des Typs B wurden zahlreiche weitere Produktionsfunktionen abgeleitet, welche bspw. in Schultmann [261] oder Corsten [56] beschrieben werden. Die Aktivitätsanalyse als weiterer produktionstheoretischer Ansatz ist sehr ähnlich zu den betriebswirtschaftlichen Input-Output-Modellen, wobei keine Wahl eines Produktionsfunktionstyps erfolgt. Spengler et al. [267] zeigen bspw. die Anwendung der Aktivitätsanalyse in der Eisen- und Stahlindustrie, wobei die Input- und Outputstoffströme anlagenspezifisch durch ein verfahrenstechnisches Prozessmodell bestimmt werden. Die Stoffströme hängen dabei ebenfalls von der Intensität ab, mit der ein Produktionsaggregat betrieben wird.

„Die empirische Geltung von Produktionsfunktionen [ist] als gering einzustufen“ [261], insofern komplexe funktionale Zusammenhänge gegeben sind, welche nur bedingt detailliert durch Produktionsfunktionen modelliert werden können. Eine Ausnahme bilden hierbei sogenannte *Engineering Production Functions*, welche auf naturwissenschaftlich-technischen Gesetzmäßigkeiten basieren. Jedoch geht deren Erstellung mit einem erheblichen Aufwand einher. Die Verwendung der Aktivitätsanalyse und Ableitung der Input- und Outputstoffströme durch ein verfahrenstechnisches Prozessmodell, wie von Spengler et al. [267] vorgeschlagen, stellt eine weitere Ausnahme dar. Allerdings sind hierzu aufwendige Prozesssimulationen mittels sogenannter Flowsheeting Simulationen (vgl. die folgenden Ausführungen) notwendig. Linear-limitationale Produktionsfunktionen allein erscheinen für die realitätsnahe Abbildung von Produktionssystemen der stoffumwandelnden Industrie hingegen eher ungeeignet, da bspw. Ausbeutekoeffizienten oder Produktionsqualitäten von unterschiedlichen prozesstechnischen Parametern wie Drücken, Temperaturen, etc. abhängen können und darüber hinaus Substitutionsmöglichkeiten bezüglich der Einsatzstoffe bestehen. Jedoch liegt ein großer Vorteil der eingangs vorgestellten produktionstheoretischen Ansätze in deren überwiegend einfachen Verwendung sowie der Tatsache, dass auch Kuppelproduktionsprozesse

abbildbar sind, weshalb diese Ansätze ggf. auch im Falle der Prozessindustrie als Basis verwendet werden können, wobei darauf zu achten ist, die Produktionsfunktionen sorgfältig aufzustellen und darüber hinaus mit technisch-naturwissenschaftlichen Ansätzen zu verknüpfen, um eine empirische Fundierung zu gewährleisten.

Verfahrenstechnische Prozessmodelle bieten die Möglichkeit der expliziten Einbeziehung von Stoff- und Energieströmen sowie der diese Ströme steuernden Parameter in betriebswirtschaftliche Fragestellungen und sind damit deutlich detaillierter als die zuvor vorgestellten produktionstheoretischen Ansätze [261]. In diesen Modellen werden die Stoff- und Energieumwandlung, deren Transport sowie deren Speicherung simuliert, wobei als Basis der Erstellung solcher Prozessmodelle Material- und Energiebilanzen zu sehen sind, welche um thermodynamische Zusammenhänge ergänzt werden können. Ein weit verbreitetes Instrument zur verfahrenstechnischen Prozesssimulation stellt die sogenannte Flowsheeting Simulation dar. Ausgangspunkt dieser computergestützten Simulation bilden Fließschemata des zu analysierenden Prozesses, welche die Grundoperationen abbilden und diese über Stoff- und Energieströme verknüpfen [291]. Gängige Softwaremodelle, wie *Aspen Plus*, ermöglichen so bspw. die Berechnung sich einstellender Temperatur- und Druckparameter, wobei eine Abbildung chemischer Einzelreaktionen nicht erforderlich ist. Zahlreiche Grundoperationen wie bspw. Reaktoren oder solche zum Aufteilen oder Erhitzen von Strömen sind in diesen Softwaremodellen bereits enthalten und können bei Bedarf manuell angepasst werden.

Im Bereich der Metallerzeugung wurden bereits zahlreiche Untersuchungen anhand von Flowsheeting Simulationen durchgeführt (vgl. hierzu bspw. Rentz et al. [241, 242], Fröhling et al. [119–121], Schultmann et al. [262], Porzio et al. [234], Iosif et al. [161] oder Bartusch [19]). Aufgrund der aufwendigen Parametrisierung dieser Modelle, die notwendig ist um das Verhalten der zu analysierenden Prozesse realitätsgetreu abbilden zu können, ist die Anwendung der Flowsheeting Simulation in der Regel auf kleinere Betrachtungsebenen wie bspw. einzelne Anlagen, Prozesse oder Standorte beschränkt. Eine Abbildung sämtlicher deutscher metallerzeugender Anlagen und Werke, wie im Rahmen dieser Arbeit gefordert, erscheint mit Hilfe dieses Werkzeugs deshalb nicht machbar (vgl. hierzu bspw. auch [118]).

Neben den zuvor erläuterten produktionstheoretischen Ansätzen und verfahrenstechnischen Prozessmodellen führt Schultmann [261] das Weiteren **Petri-Netze** als Möglichkeit der Modellierung von Stoff- und Energieströmen an. Bei dieser graphentheoretischen Modellierung werden Stellen und Transitionen unterschieden. Erstere geben den Bestand an Roh-, Hilfs- oder Betriebsstoffen sowie an Zwischen-, Endprodukten oder Abfällen wider. Transitionen hingegen stellen Umwandlungsprozesse dar, welche bspw. durch betriebswirtschaftliche Produktionsfunktionen oder die Aktivitätsanalyse charakterisiert sein können und damit die gleichen Vor- oder Nachteile wie die zugehörigen produktionstheoretischen Ansätze aufweisen. Vorteile von Petri-Netzen stellen darüber hinaus die Möglichkeit der Abbildung des dynamischen Verhaltens eines Systems wie bspw. Bestandsveränderungen im Zeitablauf sowie die Möglichkeit der Integration von Unsicherheiten wie bspw. schwankende Rohstoffzusammensetzungen im Rahmen fuzzyfizzierter Petri-Netze dar.

Im otello-Modell werden die Produktionsprozesse mit Hilfe **mehrstufiger Referenzprozessfolgen** abgebildet. Hierzu werden die wesentlichen Produktionsverfahren identifiziert und die damit jeweils einhergehenden Abfolgen von im Produktionsablauf hergestellten Zwischenprodukten als Referenz definiert (vgl. [159]). Darüber hinaus werden für alle auf diese Weise identifizierten Prozessschritte wiederum Referenzanlagen festgelegt. Somit erfolgt die Darstellung eines Produktionsverfahrens „durch ein Aneinanderreihen geeigneter Anlagentypen gemäß einer Referenzprozessfolge“ [159].

Die eigentliche produktionstheoretische Darstellung einer Anlage erfolgt in otello mittels anlagenspezifischer Inputkoeffizienten, die unter Verwendung eines Input-Output-Ansatzes (vgl. obige Ausführungen zu den produktionstheoretischen Ansätzen) zur Berechnung des Gesamtbedarfs an Produktionsfaktoren eines Werkes, welches aus mehreren Anlagen besteht, herangezogen werden. Daneben werden Emissionsfaktoren eingesetzt, um die Emissionsfracht einzelner Anlagen sowie des gesamten Werkes zu berechnen. Dieser Ansatz geht implizit davon aus, dass gleichen Anlagentypen in verschiedenen Werken die gleichen vordefinierten Inputfaktoren zugrunde liegen. Unterscheidungen hinsichtlich der Produktionstechnologie einzelner Werke existieren somit lediglich hinsichtlich der verwendeten Prozessfolge, der eingesetzten Anlagentypen, der Kapazitäten sowie der implementierten Emissionsminderungsmaßnahmen, welche die Inputkoeffizienten und

Emissionsfaktoren einzelner Anlagen beeinflussen und in letztere integriert oder nachgeschaltet sein können. Eine wesentliche Annahme des Ansatzes sieht vor, dass jedes Werk allen mit der jeweiligen Referenzprozessfolge einhergehenden Prozessschritten folgt, was bspw. bedeutet, dass für jedes integrierte Hüttenwerk eine Kokerei modelliert wird (vgl. [159]). Dies trifft in der Realität jedoch nur auf einen Teil deutscher Hüttenwerke zu, weshalb der tatsächliche Anlagenbestand nicht korrekt wiedergegeben wird.

Für die im Rahmen dieser Arbeit angestrebte Abschätzung vorhandener Energieeffizienz- und Treibhausgasminderungspotenziale greift der Ansatz von otello daher zu kurz. Wie für die Eisen- und Stahlindustrie in Abschnitt 2.3.1 dargestellt, ist die Energieeffizienz stark vom Produktionsverbund und dem Austausch von Kuppelgasen zwischen einzelnen Anlagen abhängig, weshalb es gilt, möglichst konkrete Spezifika einzelner Produktionsstandorte in die Analyse miteinzubeziehen. Darum soll ein Ansatz entwickelt werden, der neben der Variation der Referenzprozessfolgen, bspw. durch das Weglassen einzelner Anlagen, auch die Variation der Inputkoeffizienten bzw. der Emissionsfaktoren von gleichen Anlagentypen in verschiedenen Produktionsverbänden zulässt, da die Inputkoeffizienten letztlich nicht nur durch den Anlagentyp vorgegeben sind, sondern sich auch durch die jeweilige Betriebsweise ergeben, die im Allgemeinen zwischen einzelnen Werken unterschiedlich ist. Hierzu ist eine Herangehensweise zu entwickeln, die es erlaubt unter Berücksichtigung des aktuell in Deutschland vorhandenen Anlagenbestands die Unterschiede in den Einsatzmengen und der Energieeffizienz einzelner Werke abzuschätzen.

Um die eingangs des Abschnittes genannten Schwächen des Input-Output-Ansatzes auszugleichen und dessen empirische Geltung zu verbessern soll dieser produktionstheoretische Ansatz um einen verfahrenstechnischen Ansatz insoweit erweitert werden, dass mindestens auch Material- und Energiebilanzen Berücksichtigung finden. Aufgrund der hohen CO₂-Emissionen der Metallerzeugung und des umfangreichen Einsatzes fossiler Brennstoffe bietet sich hier eine Kohlenstoffbilanz an. Daneben kann eine Energiebilanz dazu dienen, die unterschiedliche Menge der in den einzelnen Werken anfallenden Kuppelgase und den daraus resultierenden jeweiligen Brennstoffverbrauch zu berücksichtigen.

3.5. Überblick über den zu entwickelnden Modellierungsansatz

Zusammenfassend zeigt sich, dass der in otello gewählte Ansatz die in Abschnitt 2.4 definierten Anforderungen an eine Bewertung klimapolitischer Instrumente mit Fokus auf den energieintensiven Industrien sowie die damit einhergehenden in Abschnitt 3.1.2 definierten Kriterien zumindest teilweise erfüllt. Die Anforderungen aus volkswirtschaftlicher Sicht (vgl. Abschnitt 2.4) werden dabei vorwiegend durch das Input-Output-Teilmodell umgesetzt, die Anforderungen aus technisch-betriebswirtschaftlicher Sicht durch das akteursbasierte Teilmodell.

Die wichtigsten notwendigen Anpassungen des otello-Ansatzes wurden bereits in den Abschnitten 3.2, 3.3 und 3.4 herausgestellt. Diese und zahlreiche weitere führen zu der Notwendigkeit einer umfassenden Überarbeitung des Ansatzes. Während in den folgenden Abschnitten 3.5.1, 3.5.2 und 3.5.3 ein Überblick über das in den Kapiteln 4 und 5 detaillierter beschriebene Gesamtmodell gegeben wird, zeigt Tabelle 3.2 zusammenfassend die zentralen Änderungen gegenüber dem otello-Ansatz auf. Bei der Überarbeitung des otello-Modells wurde zwar der gegebene Ansatz angepasst und weiterentwickelt, jedoch keine bereits bestehenden Quellcode-Fragmente genutzt, weshalb insofern auch von einer Neuentwicklung gesprochen werden kann.

Tabelle 3.2.: Gegenüberstellung des otello-Modells und des in dieser Arbeit verfolgten Ansatzes

	otello	eigener Ansatz
Betrachtete Sektoren (anthropogene Emissionsquellen)	Elektrizität, Stahl, Zement, Verkehr, Wohngebäude	präzise: Stahl, Aluminium; aggregiert: alle anderen Sektoren
Betrachtete Schadstoffe und Klimagase	Akteursbasiertes Modell: CO ₂ , NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ ; IO-Modell: keine	Akteursbasiertes Modell: CO ₂ , PFC; IO-Modell: CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, PFC, HFC, SF ₆
Modellierung klimapolitischer Instrumente	ja	ja

Tabelle 3.2.: Gegenüberstellung des otello-Modells und des in dieser Arbeit verfolgten Ansatzes

	otello	eigener Ansatz
Modellierung umweltpolitischer Instrumente	ja	nein
Einbezug der komplexen Ausnahmeregelungen umwelt-/klimapolitischer Instrumente (vgl. Abschnitt 2.2)	nein	ja
Sektoren, auf die sich umwelt-/klimapolitische Instrumente auswirken	Elektrizität, Stahl, Zement, Verkehr, Wohngebäude ¹	alle Sektoren
Betrachtung indirekter Emissionen	(nein) ²	ja
Betrachtung aller Kohlenstoffsenken (inkl. chemisch in Produkten gebundenem C)	nein	ja
Wichtigste endogen berechnete Größen des IO-Modells	privater Konsum + Investitionen in Kapazitätsanpassungen	privater Konsum + Investitionen in Kapazitätsanpassungen + Ausgaben für klimapolitische Instrumente
Ansatz zur Modellierung der Technologien	mehrstufige Referenzprozessfolgen + IO-Ansatz	mehrstufige Referenzprozessfolgen + IO-Ansatz + Kohlenstoff- u. Energiebilanz + Berücksichtigung von Kuppelprodukten
Anzahl modellierter Schadstoff-mindernder Technologien (Industrie)	24	(0) ³
Anzahl modellierter energieeffizienzsteigernder Technologien (Industrie)	3	29
Berücksichtigung der tatsächlichen Anlagenkonfigurationen	nein	ja ⁴

Tabelle 3.2.: Gegenüberstellung des otello-Modells und des in dieser Arbeit verfolgten Ansatzes

	otello	eigener Ansatz
Unterscheidung der Produktionsprozesse einzelner Werke	durch Prozesstyp, Kapazitäten und implementierte Emissionsminderungsmaßnahmen	durch Prozesstyp, Kapazitäten, Inputkoeffizienten und Verschaltung der Anlagen
Allokation der Produktionsmengen auf die Werke	Merit-Order (Rangwert)	gemäß vorherigem Produktionsanteil
Investitionsentscheidung	statisch (Rangwertvergleich) ⁵	dynamisch (Kapitalwert)
Modellierung ökonomischer Konsequenzen für einzelne Werke	Stückkostenvergleich	Berechnung werkspezifischer Gewinne/Verluste

¹ Gütersteuern werden für alle Sektoren berechnet, Emissionsrechte bspw. nur für die genannten Sektoren

² Einbezug von ökonomischen und ökologischen Rückkopplungen zwischen detailliert modellierten Sektoren; Rückkopplungen zu allen restlichen Sektoren nur auf ökonomischer Ebene (kein EEIO-Ansatz)

³ Einige der modellierten Technologien mindern neben Treibhausgasen ebenfalls Schadstoffe, jedoch stellen letztere keinen Fokus dieser Arbeit dar.

⁴ Abschätzung der Anlagenkonfigurationen einzelner Werke durch separates Modell unter Berücksichtigung der Kapazitäten und des Zu- und Verkaufs von Zwischenprodukten (vgl. Abschnitt 6.2.1).

⁵ Im Falle des Neubaus eines kompletten Werkes wird das Kapitalwertkriterium angewendet.

Die Modellstruktur dieser Neuentwicklung besteht im Wesentlichen aus dem Input-Output-Teilmodell zur Ableitung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Abschätzung der sektorübergreifenden Auswirkungen sowie dem aktorsbasierten Teilmodell zur Modellierung der Reaktionen der betrachteten Industrien auf klimapolitische Instrumente und Abschätzung vorhandener Treibhausgasreduktionspotenziale. Beide Teilmodelle werden in ein Modellsystem, im Folgenden auch vereinfacht als Modell bezeichnet, integriert, wodurch ein hybrides Modell entsteht, in dem Informationen top-down bzw. bottom-up zwischen den beiden Teilmodellen weitergegeben werden. Daneben zeigt sich die Berücksichtigung möglicher zukünftiger Entwicklungen in Form einer dynamischen Simulation charakteristisch für den hier gewählten Ansatz, mit dessen Hilfe verschiedene Ausprägungen

klimapolitischer Instrumente szenariobasiert bewertet werden können. Abbildung 3.2 liefert einen Überblick über das in den folgenden Abschnitten 3.5.1, 3.5.2 und 3.5.3 zusammengefasste, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell sowie über die wesentlichen Simulationsschritte eines Modelllaufs.

3.5.1. Überblick über das Input-Output-Teilmodell (top-down)

Die deutsche Volkswirtschaft wird durch das makroökonomische IO-Teilmodell repräsentiert, welches in der vorliegenden Arbeit teilendogenisiert und dynamisch ausgestaltet ist. Die Teilendogenisierung resultiert dabei maßgeblich aus der endogenen Abbildung des privaten Konsums (vgl. IO-Modelle des Typs II [319]), dargestellt durch ein *linear expenditure system* (LES), welches auf der Basis von vergangenen Konsumdaten die aktuelle Konsumnachfrage abhängig vom aktuellen verfügbaren Einkommen und den jeweiligen Güterpreisen berechnet. Daneben werden auch die Investitionen in Kapazitätsanpassungen endogen, abhängig von den zu produzierenden Mengen, modelliert. Andere Teile der Endnachfrage, wie die Exportnachfrage, werden hingegen exogen vorgegeben.

Neben der Anpassung der Endnachfrage werden in einem Simulationsdurchlauf auch die zur Herstellung eines Gutes notwendigen Vorleistungen und Wertschöpfungskategorien der IO-Matrix geändert. Erstere werden für die meisten Sektoren unter Verwendung angenommener zukünftiger Effizienzverbesserungen fortgeschrieben. Die Änderungen in den Vorleistungen der im aktorsbasierten Teilmodell detaillierter simulierten Sektoren, welche im makroökonomischen IO-Modell im Wesentlichen der Metallindustrie entsprechen, werden hingegen modellendogen abhängig von den getätigten Investitionen in den Anlagenbestand und den daraus resultierenden Technologieanpassungen im aktorsbasierten Teilmodell selbst berechnet (vgl. Abschnitt 3.5.2), was somit eine wesentliche Schnittstelle zwischen beiden Teilmodellen darstellt.

Die zentralen in einem Simulationsdurchlauf in den Wertschöpfungskategorien vorgenommenen Anpassungen beziehen sich auf die sektoralen Ausgaben für klimapolitische Instrumente, deren Ausprägungen bspw. in

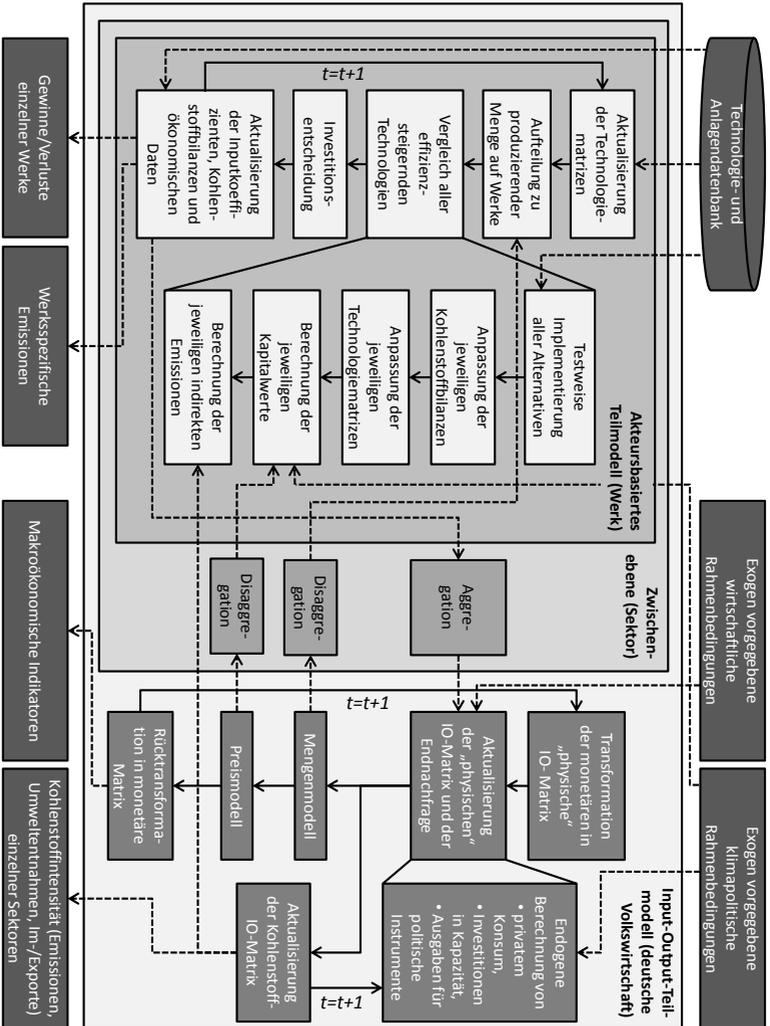


Abbildung 3.2.: Überblick über die Struktur des zu entwickelnden Modells (in Anlehnung an [159])

Form von Steuerhöhen oder Ausnahmeregeln (vgl. Abschnitt 2.2) zwar exogen in Szenarios vorgegeben werden, die jedoch wiederum mit dem endogen berechneten sektoralen Energieträgereinsatz sowie den ebenfalls endogen berechneten sektoralen Treibhausgasemissionen in Beziehung gesetzt werden, um die absoluten Ausgaben bestimmen zu können.

Sobald alle exogenen und endogenen Anpassungen an der IO-Matrix und der Endnachfrage durchgeführt und die wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen somit aktualisiert wurden, berechnet das Mengenmodell die unter diesen Rahmenbedingungen insgesamt nachgefragten und in den einzelnen Sektoren zu produzierenden Gütermengen. Letztere stellen darüber hinaus einen wichtigen Input für das aktorsbasierte Teilmodell dar, welches die so ermittelten Produktionsmengen auf die einzelnen Werke der Metallindustrie aufteilt und letztlich deren Aktivitätsraten⁴⁴ festlegt.

Neben den zu produzierenden Mengen müssen aufgrund der geänderten Vorleistungs- und Wertschöpfungsstrukturen auch die Preise der einzelnen Güter neu berechnet werden, was über ein Preismodell geschieht. Hierbei werden darüber hinaus exogen vorgegebene Entwicklungen, wie bspw. Preisabschätzungen für auf dem Weltmarkt gehandelte Brennstoffe sowie erwartete Reallohnsteigerungen, berücksichtigt. Über die im Mengenmodell berechneten Gütermengen und die im Preismodell berechneten Preisänderungen kann letztlich die neue hinsichtlich Aufkommen und Verwendung konsistente IO-Matrix abgeleitet werden, womit ein Simulationsdurchlauf endet und die nächste Periode beginnt.

Parallel zur Aktualisierung dieser, die ökonomischen Rahmenbedingungen enthaltenden IO-Matrix wird eine weitere IO-Matrix zur Aktualisierung der klimarelevanten Rahmenbedingungen fortgeschrieben. Während erstere in monetären (Euro) bzw. fiktiven physischen Einheiten angegeben ist (vgl. hierzu Kapitel 4), notiert letztere in Tonnen Kohlenstoff. Die Kohlenstoff-IO-Matrix ist dabei analog zur monetären IO-Matrix aufgebaut und enthält Informationen über den importierten Kohlenstoff (Bsp.: importiertes Rohöl), den aus der Umwelt entnommenen Kohlenstoff (Bsp.: Braunkohleabbau), den an andere Sektoren gelieferten Kohlenstoff (Bsp.: Lieferung von Koks aus der Kokerei an die Eisen- und Stahlindustrie), den emittierten Kohlenstoff (CO₂- und CH₄-Emissionen) sowie den im

⁴⁴Eine Aktivitätsrate beschreibt den Output eines Prozesses pro Zeiteinheit.

Bestand der Volkswirtschaft verbleibenden Kohlenstoff (Bsp.: Kunststoff gebunden im Endprodukt).

Die oben beschriebenen, während eines Simulationsdurchlaufs vorgenommenen Anpassungen an der monetären IO-Matrix⁴⁵ werden direkt an die Kohlenstoff-IO-Matrix weitergegeben, innerhalb derer abhängig vom Brennstoffeinsatz die resultierenden CO₂-Emissionen berechnet werden können. Die so berechneten CO₂-Emissionen stellen wiederum einen Input für die monetäre IO-Matrix dar, innerhalb derer u.a. die Ausgaben für Emissionszertifikate kalkuliert werden.

Neben der Kohlenstoff-IO-Matrix existiert eine weitere physische IO-Matrix, welche die in den einzelnen Sektoren verwendeten Energieträger enthält, in Terajoule angegeben ist und ebenfalls aus der monetären IO-Matrix abgeleitet wird. Sie dient dazu, die Ausgaben für die Strom- und Energiesteuern sowie für die EEG-Umlage zu berechnen.

Zusammengefasst erlaubt die gegebene Struktur des IO-Teilmodells, welches sowohl ökonomische als auch klimarelevante Entwicklungen integriert berücksichtigt, die durch die sektoralen Verflechtungen entstehenden indirekten Effekte zu beziffern. Eine Preis- oder Nachfrageänderung in einem Sektor wirkt sich in dieser Struktur auch auf die Preise, die herzustellenden Mengen und die entstehenden Emissionen in vor- oder nachgelagerten Sektoren aus, was eine ganzheitliche Bewertung der durch klimapolitische Instrumente induzierten Effekte zulässt. Hierzu zählt u.a. auch die Berechnung des *Carbon Footprints* einzelner Güter.

3.5.2. Überblick über das aktorsbasierte Teilmodell (bottom-up)

Während das IO-Teilmodell die makroökonomischen Rahmenbedingungen liefert und die Metallindustrie in den gesamtwirtschaftlichen Kontext inklusive der sektoralen Kohlenstoffflüsse und des sektoralen Energieverbrauchs einordnet, obliegt es dem aktorsbasierten Teilmodell die technischen und

⁴⁵Die Anpassungen werden, wie in Kapitel 4 beschrieben, an der IO-Matrix durchgeführt, welche die fiktiven physischen Einheiten (technische Koeffizienten) enthält und aus der monetären IO-Matrix abgeleitet wird.

betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Treibhausgasemissionsminderung in einzelnen metallherstellenden Werken zu berücksichtigen. Hierzu werden die einzelnen Werke in ihrer Funktion als Entscheider modelliert, wobei Entscheidungen hinsichtlich der Implementierung von effizienzsteigernden Technologien abhängig von den gegebenen Rahmenbedingungen getroffen werden.

Da jedes Werk durch unterschiedliche, hinsichtlich ihrer Effizienz variierende Prozesse gekennzeichnet ist und daher unterschiedliche Emissionsreduktionspotenziale besitzt, werden in einem ersten Schritt zur Bestimmung des Status quo zunächst die werksinternen Stoff- und Energieflüsse nahezu aller in Deutschland produzierenden Eisen-, Stahl- und Aluminiumwerke mittels eines nichtlinearen Optimierungsmodells (NLP) abgeschätzt (vgl. hierzu Abschnitt 6.2.1). Die so erhaltenen werkspezifischen Technologiematrizen bilden den Ausgangspunkt für die Simulation, innerhalb derer die einzelnen Werke als Akteure modelliert sind.

Ein Simulationsdurchlauf startet mit der Aufteilung der im IO-Teilmodell berechneten Produktionsmenge auf die einzelnen Werke, womit deren Aktivitätsrate für die jeweils aktuelle Periode festgelegt wird. Neben der zu produzierenden Menge bestimmen die exogen vorgegebenen klimapolitischen Instrumente den Handlungsspielraum eines Akteurs.

Um Entscheidungen über die Ergreifung von Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen zu treffen, vergleichen die Akteure die zur Verfügung stehenden Optionen, welche in einer Technologiedatenbank gespeichert sind. Hierzu werden nacheinander alle für die gegebene Anlagenkonfiguration vorhandenen effizienzsteigernden Technologien testweise implementiert. Dies beeinflusst die Stoff- und Energieflüsse zwischen einzelnen Anlagen, welche durch unterschiedliche Inputkoeffizienten charakterisiert sind, und damit auch die Treibhausgasemissionen eines Werkes. Eine Kohlenstoffbilanz stellt dabei die verfahrenstechnische Fundierung der induzierten Änderungen an den Inputkoeffizienten der einzelnen Anlagen sicher. Die Anpassung der Technologiematrix hingegen integriert diese Anlagen in das Gesamtwerk unter Beachtung etwaiger auftretender Kuppelprodukte.

Die Auswahl einer Technologie durch den Akteur basiert auf dem Kapitalwertkriterium, welches für jede Technologie neben den Investitionen

auch die Ausgaben für klimapolitische Instrumente sowie betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten berücksichtigt. Während die unterschiedlichen Ausprägungen klimapolitischer Instrumente als zentraler Untersuchungsgegenstand exogen vorgegeben werden, werden die betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten endogen durch die im IO-Teilmodell simulierten sektoralen Preisänderungen beeinflusst. Neben dieser Rückkopplung zum IO-Teilmodell werden weiterhin die indirekten Emissionen der Metallherzeugung unter Verwendung der Kohlenstoff-IO-Matrix berechnet. Hierzu werden die Emissionen, welche in vorgelagerten Prozessschritten entstehen, die nicht Bestandteil des aktorsbasierten Teilmodells sind, dem Endprodukt zugerechnet.

In der eigentlichen Investitionsentscheidung wählt ein Akteur die Alternative mit dem höchsten positiven Kapitalwert und implementiert die zugehörige Technologie, wobei an dieser Stelle ebenfalls Kohlenstoffbilanzen eine zulässige Änderung der Inputkoeffizienten sicherstellen und die Änderungen an den Inputkoeffizienten einzelner Anlagen mittels einer Anpassung der Technologiematrix in das Werk integriert werden. Neben dieser Entscheidungsroutine existieren zwei weitere, in der die Akteure nicht den Kapitalwert maximieren, sondern die werksseitigen Emissionen bzw. den *Carbon Footprint* minimieren, wodurch das technisch mögliche Treibhausgasreduktionspotenzial eines jeden Werkes beziffert werden kann.

Am Ende eines Simulationsdurchlaufs werden die geänderten Inputkoeffizienten zusammen mit den Treibhausgasemissionen der einzelnen Werke aggregiert und repräsentieren auf diese Weise die durchschnittliche Entwicklung der Produktionsstrukturen metallherzeugender Sektoren, was wiederum einen wichtigen Input für das IO-Teilmodell darstellt. Daneben erlauben die berechneten werkspezifischen Umsätze und Kosten die Ableitung der jeweiligen Gewinne und damit der Profitabilität einzelner Werke, wodurch letztlich die Gefahr einer Produktionsverlagerung ins Ausland (*Carbon Leakage*) zumindest grob abgeschätzt werden kann.

Zusammengefasst ist das aktorsbasierte Teilmodell dazu in der Lage, die Implikationen klimapolitischer Instrumente auf die Treibhausgasemissionen und die Profitabilität einzelner Werke unter Berücksichtigung technischer und betriebswirtschaftlicher Restriktionen abzuschätzen. Letztlich kann mit diesem Teilmodell die Technologiediffusion in den betrachteten

Sektoren unter verschiedenen wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen dynamisch simuliert werden.

3.5.3. Wechselwirkungen zwischen beiden Teilmodellen (hybrides Modell)

Wie aus den beiden vorherigen Abschnitten 3.5.1 und 3.5.2 hervorgeht, werden die klimapolitischen Instrumente auf beiden Ebenen der Modellierung wirksam, sowohl hinsichtlich der induzierten Preisänderungen auf volkswirtschaftlicher Ebene als auch hinsichtlich des Anreizes zur Implementierung effizienzsteigernder Technologien auf Werksebene. Eine Periode (ein Simulationsdurchlauf) repräsentiert in den beiden Teilmodellen ein Jahr, wobei Modellläufe bis zum Jahr 2030⁴⁶ durchgeführt werden.

Beide Modellteile einzeln erlauben bereits zahlreiche Aussagen hinsichtlich der in Abschnitt 2.4 definierten Anforderungen. So können mittels des aktorsbasierten Teilmodells bspw. technische Treibhausgasreduzierungs-potenziale und Einflüsse auf die Profitabilität einzelner Werke beziffert werden, während das Input-Output-Teilmodell dazu in der Lage ist, den *Carbon Footprint* einzelner Güter und die durch klimapolitische Instrumente induzierten Preisänderungen zu berechnen.

Das Zusammenspiel der Modellteile wurde zwar bereits in den beiden vorherigen Abschnitten dargestellt, soll jedoch an dieser Stelle anhand von drei Beispielen verdeutlicht werden. Ergebnisse aus dem Input-Output-Teilmodell sind in der folgenden Darstellung mit (*IO*) markiert, Ergebnisse aus dem aktorsbasierten Teilmodell mit (*AB*).

- Die Erhöhung der Zertifikatspreise wirkt sich direkt auf die Strompreise aus (*IO*), wodurch in der Metallerzeugung zusätzliche finanzielle Anreize entstehen Strom einzusparen, so dass bspw. Technologien zur Schrottvorwärmung im Elektrolichtbogenofen implementiert werden

⁴⁶Mit den im IO-Teilmodell hinterlegten Daten sind ebenfalls Szenarioanalysen mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2050 machbar. Hierbei erweist sich jedoch die Simulation der Investitionsentscheidungen im aktorsbasierten Teilmodell als schwierig, da große Unsicherheiten über die in ferner Zukunft verfügbaren Technologien und deren Implikationen herrscht.

(*AB*). Diese Implementierung verringert wiederum den *Carbon Footprint*, da im Elektrizitätssektor weniger Strom produziert werden muss (*IO*).

- Der zunehmende Export von Fahrzeugen führt zu einer Produktionssteigerung im Fahrzeugbau und damit einhergehend im Metallsektor (*IO*), wodurch die Treibhausgasemissionen der simulierten Werke steigen und zusätzliche Vorprodukte benötigt werden (*AB*), die wiederum die Produktion in vorgelagerten Sektoren ankurbeln (*IO*).
- Die Implementierung einer effizienzsteigernden Technologie kann ggf. die Produktionskosten senken (*AB*) und damit den Preis für ein Produkt verringern, wodurch die Nachfrage nach diesem Produkt (*IO*) und damit auch die insgesamt emittierten Treibhausgase bei dessen Herstellung steigen können (*AB*).

Die konkrete Implementierung des Modellsystems wird in den folgenden Kapiteln 4 bzw. 5 für das Input-Output-Teilmodell bzw. das aktorsbasierte Teilmodell dargestellt. Sämtliche in den Beschreibungen verwendete Indizes, Parameter und Variablen finden sich darüber hinaus zusammengefasst in den Tabellen A.1 bzw. A.2 im Anhang A.1.

4. Entwicklung des makroökonomischen Teilmodells

Nachdem der vorherige Abschnitt 3.5 einen Überblick über das zu entwickelnde Modellsystem geliefert hat, wird in diesem Kapitel das makroökonomische Teilmodell, welches auf einem Input-Output-Ansatz basiert, vorgestellt. Es dient dazu, sektorübergreifende, gesamtwirtschaftliche Effekte wie auch indirekt durch die Nachfrage nach Vorprodukten induzierte Treibhausgasemissionen zu beziffern und somit einen hinsichtlich wirtschaftlicher und ökologischer Entwicklungen konsistenten Rahmen zu liefern, den die Metallindustrie in ihren Entscheidungen berücksichtigt und gleichzeitig durch ihre Entscheidungen beeinflusst. Bevor jedoch die konkrete Ausgestaltung des Modells mit allen notwendigen Erweiterungen in Abschnitt 4.2 dargelegt wird, zeigt Abschnitt 4.1 zunächst die Grundlagen der Input-Output-Rechnung auf.

4.1. Grundlagen der Input-Output-Rechnung

Die im Folgenden und den Abschnitten 4.1.1 sowie 4.1.2 vorgenommene Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge einer Input-Output-Analyse geht im Wesentlichen auf Miller und Blair [208] zurück. Eine Input-Output-Tabelle, welche den Startpunkt aller Analysen bildet, wird basierend auf den beobachteten und ausgewerteten Daten eines bestimmten Wirtschaftsraumes, häufig eines Staates, gebildet. Voraussetzung hierfür ist, dass die wirtschaftlichen Aktivitäten dieses Wirtschaftsraumes einzelnen Sektoren, z.B. der Stahl- oder Zementherstellung, zugeordnet werden können, wobei die Granularität dieser Sektoren je nach Anwendungsbereich der

IO-Analyse sehr unterschiedlich sein kann¹. Die wichtigsten in einer IO-Tabelle enthaltenen Informationen stellen die Produktströme eines jeden Sektors zu allen anderen Sektoren dar, wobei Sektoren gleichzeitig als Lieferanten und Abnehmer von Produkten (oder Dienstleistungen) auftreten. Die Sektoren, oft auch als Industrien oder Produktionsbereiche bezeichnet, nutzen nach der Input-Output-Logik die bezogenen (Vor-)Produkte (Vorleistungen), um ihrerseits Produkte herzustellen und an andere, in der Wertschöpfungskette nachgelagerte Sektoren zu liefern. Die Produktströme werden dabei häufig in monetären Einheiten angegeben, da es sich in der Regel um Güterbündel handelt, die mehrere unterschiedliche Produkte, wie bspw. Roheisen, Stahlbleche und Stahlträger, umfassen können. Dies trägt jedoch die Problematik mit sich, dass Änderungen in den monetären Güterströmen nicht nur auf geänderte Liefermengen, sondern eventuell auch auf geänderte Preise zurückzuführen sind. Die Lösung dieses Problems wird im Rahmen der Dynamisierung des Grundmodells in Abschnitt 4.2.1 diskutiert. Zunächst wird jedoch in den folgenden Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 die grundlegende mathematische Notation einer Input-Output-Analyse aufgezeigt. Die zeitliche Auflösung der in einer Input-Output-Tabelle enthaltenen Werte beträgt normalerweise ein Jahr.

4.1.1. Mathematische Herleitung der Zusammenhänge einer Input-Output-Tabelle

Die wesentliche in einer Input-Output-Tabelle enthaltene Information ist der in monetären Einheiten gemessene Güterstrom $z_{i,j}$ von Sektor i zu Sektor j . Daneben liefern einzelne Sektoren nicht nur Produkte an andere Sektoren, sondern auch zu Abnehmern, die sich außerhalb der industriellen Produktkreisläufe befinden, so z.B. zu privaten Haushalten oder Regierungseinrichtungen. Ein weiterer Teil wird exportiert und verlässt damit ebenfalls den betrachteten Wirtschaftsraum. Diese Abnehmer h werden dem Endnachfragebereich F , auch als letzte Verwendung bezeichnet, zugeordnet. Unter den Annahmen, dass insgesamt n Sektoren und m Endnachfragebereiche (Abnehmer) vorliegen, berechnen sich die durch

¹So kann ein Sektor bspw. nur spezielle Stahlprodukte wie Bleche enthalten oder aber den gesamten Bereich der Warenherstellung umfassen.

die Sektoren zu produzierenden Mengen x , auch als Output bezeichnet, gemäß dem Gleichungssystem 4.1.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= z_{1,1} + \dots + z_{1,j} + \dots + z_{1,n} + \sum_{h=1}^m f_{1,h} \\
 &\vdots \\
 x_i &= z_{i,1} + \dots + z_{i,j} + \dots + z_{i,n} + \sum_{h=1}^m f_{i,h} \\
 &\vdots \\
 x_n &= z_{n,1} + \dots + z_{n,j} + \dots + z_{n,n} + \sum_{h=1}^m f_{n,h}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Das Gleichungssystem gibt somit die Verteilung der durch die Sektoren produzierten und gelieferten Produkte auf alle anderen Sektoren sowie den Endnachfragebereich an. An dieser Stelle, wie auch über die gesamte Arbeit hinweg, wird bezüglich der mathematischen Notationen der Konvention gefolgt, dass einzelne Werte und Vektoren durch Kleinbuchstaben, Matrizen durch Großbuchstaben gekennzeichnet werden. Somit stellt der Wert $f_{i,h}$ ein Element des Endnachfragebereichs F dar. Weiterhin werden Vektoren durch einen Pfeil hervorgehoben, so dass bspw. \vec{f}_h den h -ten Spaltenvektor des Endnachfragebereichs F wiedergibt.² Die Zusammenhänge sind nochmals in Gleichung 4.2 dargestellt. Ein Überblick über die gesamte in dieser Arbeit verwendeten Notation findet sich in den Tabellen A.1 und A.2 in Anhang A.1.

²Wird ein Wert zusätzlich mit t indiziert, wie bspw. $z_{i,j,t}$, so gibt dieser Wert das Matrixelement ($z_{i,j} \in Z$) zum Zeitpunkt t wieder. Dasselbe gilt für Vektoren.

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n,1} & \cdots & z_{n,n} \end{bmatrix}, \quad \vec{z}_j = \begin{bmatrix} z_{1,j} \\ \vdots \\ z_{n,j} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

$$F = \begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,m} \end{bmatrix}, \quad \vec{f}_h = \begin{bmatrix} f_{1,h} \\ \vdots \\ f_{n,h} \end{bmatrix}$$

Das Gleichungssystem 4.1 kann somit unter Zuhilfenahme zweier Spaltenvektoren der Dimension n bzw. m , jeweils bestehend aus Einsen: $\vec{i} = [1, 1, \dots, 1]^T$ bzw. $\vec{j} = [1, 1, \dots, 1]^T$ verkürzt in Gleichung 4.3 überführt werden. In letzterer erlaubt die Verwendung von \vec{i} bzw. \vec{j} das Berechnen der Zeilensummen von Z bzw. F .

$$\vec{x} = \sum_{j=1}^n \vec{z}_j + \sum_{h=1}^m \vec{f}_h = Z\vec{i} + F\vec{j} \quad (4.3)$$

Der Spaltenvektor \vec{z}_j gibt an, welchen monetären Gegenwert Sektor j von den jeweiligen anderen Sektoren bezieht und repräsentiert somit die Verteilung der Inputs dieses Produktionsbereichs. Neben den als Vorleistungen bezeichneten Zahlungsströmen zwischen den Sektoren setzt jeder Sektor darüber hinaus die Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital als Primärinputs W ein [177], welche ebenfalls einen monetären Gegenwert besitzen und als Wertschöpfung bezeichnet werden. Zusätzlich werden importierte Güter als Primärinputs der einzelnen Sektoren aufgeführt. Die beschriebenen Zusammenhänge lassen sich strukturiert in einer Input-Output-Tabelle darstellen, wie sie in Tabelle 4.1 abgebildet ist.

Ein grundlegender inhärenter Zusammenhang jeder Input-Output-Tabelle ist dadurch gegeben, dass der gesamte Input (Aufkommen) eines jeden Sektors i dem gesamten Output (Verwendung) dieses Sektors entsprechen muss, was durch Gleichung 4.4 wiedergegeben wird. Die Multiplikation mit $(\vec{i})^T$ bzw. $(\vec{k})^T = [1, 1, \dots, 1]$ (Dimension 1) erlaubt dabei die Berechnung der Spaltensummen von Z bzw. W .

Tabelle 4.1.: Schematische Darstellung einer Input-Output-Tabelle (in Anlehnung an [208] und [177])

		Produktionsbereiche					Letzte Verwendung					Gesamte Verwend.
		1	...	j	...	n	1	...	h	...	m	
Produktionsbereiche	1	$z_{1,1}$	...	$z_{1,j}$	...	$z_{1,n}$	$f_{1,1}$	...	$f_{1,h}$	...	$f_{1,m}$	x_1
	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮		⋮		⋮	⋮
	i	$z_{i,1}$	...	$z_{i,j}$	...	$z_{i,n}$	$f_{i,1}$	...	$f_{i,h}$	...	$f_{i,m}$	x_i
	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮		⋮		⋮	⋮
	n	$z_{n,1}$	...	$z_{n,j}$	...	$z_{n,n}$	$f_{n,1}$	...	$f_{n,h}$	...	$f_{n,m}$	x_n
Primärinputs	1	$w_{1,1}$	...	$w_{1,j}$	...	$w_{1,n}$	Gesamtes Aufkommen entspricht gesamter Verwendung					
	⋮	⋮		⋮		⋮						
	g	$w_{g,1}$	...	$w_{g,j}$	...	$w_{g,n}$						
	⋮	⋮		⋮		⋮						
	l	$w_{l,1}$	...	$w_{l,j}$	...	$w_{l,n}$						
Gesamtes Aufkommen		x_1	...	x_j	...	x_n						

$$\vec{x} = Z\vec{i} + F\vec{j} = \begin{pmatrix} \vec{i} \end{pmatrix}^T Z + \begin{pmatrix} \vec{k} \end{pmatrix}^T W \quad (4.4)$$

Die vom statistischen Bundesamt herausgegebene Input-Output-Tabelle für Deutschland [65] enthält insgesamt $n = 71$ Produktionsbereiche und unterscheidet die Endnachfragebereiche *Konsumausgaben privater Haushalte* $h = pri$, *Anlageinvestitionen* $h = inv$, *Vorratsveränderungen* $h = vor$, *Exporte* $h = exp$ sowie *Konsumausgaben des Staates* und *Konsumausgaben privater Organisationen ohne Erwerbszweck*. Die Primärinputs sind weiterhin unterteilt in *Gütersteuern abzüglich Gütersubventionen* $g = gst$, *Arbeitnehmerentgelt* $g = ae$, *Abschreibungen* $g = abs$, *Nettobetriebsüberschuss* $g = nbu$, *Importe* $g = imp$ sowie *sonstige Produktionsabgaben* $g = sop$. Die IO-Tabelle ist zu Herstellungspreisen bewertet, so dass für einen Übergang

auf Anschaffungspreise zusätzlich die Steuern zu berücksichtigen sind [177]. Weiterhin unterliegen die Sektoren der deutschen IO-Tabelle einer funktionellen Gliederung, die im Gegensatz zur institutionellen Gliederung die „Input- und Output-Ströme der Produktionsstätten [...] getrennt nach Haupt- und Nebenprodukten“ [159] ausweist, so dass die einzelnen Sektoren durch einen möglichst homogenen Output charakterisiert sind.

Mit den gegebenen grundlegenden Zusammenhängen einer IO-Tabelle sind bereits im statischen Fall zahlreiche Analysen möglich, was im folgenden Abschnitt über die Herleitung des Mengen- und Preismodells gezeigt wird.

4.1.2. Mengen- und Preismodell

Mittels Gleichung 4.5 lassen sich zunächst die direkten Input-Koeffizienten $a_{i,j}$, die häufig auch als technische Koeffizienten bezeichnet werden, ableiten. Sie geben an, welcher monetäre Input aus Sektor i zur Produktion von 1 € Output des Sektors j notwendig ist.

$$a_{i,j} = \frac{z_{i,j}}{x_j} \quad (4.5)$$

Die technischen Koeffizienten werden im statischen Fall der IO-Analyse als konstant angenommen, so dass eine Verdoppelung des Outputs eines Sektors mit einer Verdoppelung der jeweiligen Inputs einhergeht, wobei Größendegressionseffekte keine Berücksichtigung finden. Dies impliziert bereits die in einem IO-Modell unterstellte Produktionsfunktion, da die Erhöhung nur eines Inputs keinen zusätzlichen Output erzeugen kann, insofern alle anderen Inputs konstant gehalten werden. Es liegen somit limitationale Faktoreinsatzbeziehungen ohne der Möglichkeit von Substitutionen vor, weswegen auch von einer linear-limitationalen Produktionsfunktion gesprochen wird, welche durch Gleichung 4.6 beschrieben wird (vgl. hierzu auch die produktionstheoretischen Ansätze in Abschnitt 3.4).

$$x_j = \min \left(\frac{z_{1,j}}{a_{1,j}}, \frac{z_{2,j}}{a_{2,j}}, \dots, \frac{z_{n,j}}{a_{n,j}} \right) \quad (4.6)$$

Mit der Annahme konstanter technischer Koeffizienten $a_{i,j}$ und unter der Verwendung von Gleichung 4.5 kann das Gleichungssystem 4.1 nun in das Gleichungssystem 4.7 überführt werden.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= a_{1,1}x_1 + \dots + a_{1,i}x_i + \dots + a_{1,n}x_n + \sum_{h=1}^m f_{1,h} \\
 &\vdots \\
 x_i &= a_{i,1}x_1 + \dots + a_{i,i}x_i + \dots + a_{i,n}x_n + \sum_{h=1}^m f_{i,h} \\
 &\vdots \\
 x_n &= a_{n,1}x_1 + \dots + a_{n,i}x_i + \dots + a_{n,n}x_n + \sum_{h=1}^m f_{n,h}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Das so angepasste Gleichungssystem verdeutlicht die Abhängigkeit der intersektoralen Güterströme vom gesamten Output eines jeden Sektors ($a_{i,j}x_j$). Dabei führt diese Darstellung bereits zu der Frage, wie hoch der Output eines jeden Sektors sein muss, um eine vorgegebene Endnachfrage zu befriedigen. Um dies zu beantworten wird zunächst das Gleichungssystem 4.7 durch Umformungen in das Gleichungssystem 4.8 überführt.

$$\begin{aligned}
 (1 - a_{1,1})x_1 - \dots - a_{1,i}x_i - \dots - a_{1,n}x_n &= \sum_{h=1}^m f_{1,h} \\
 &\vdots \\
 -a_{i,1}x_1 - \dots + (1 - a_{i,i})x_i - \dots - a_{i,n}x_n &= \sum_{h=1}^m f_{i,h} \\
 &\vdots \\
 -a_{n,1}x_1 - \dots - a_{n,i}x_i - \dots + (1 - a_{n,n})x_n &= \sum_{h=1}^m f_{n,h}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

In Matrixschreibweise ergibt sich mit $A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \dots & a_{n,n} \end{bmatrix}$ sowie der

$n \times n$ Einheitsmatrix I nach Umformung die zentrale Gleichung 4.9 der IO-Analyse, welche auch als **Mengenmodell** bezeichnet wird.

$$\vec{x} = (I - A)^{-1} \left(\sum_{h=1}^m \vec{f}_h \right) = L \left(\sum_{h=1}^m \vec{f}_h \right) \quad (4.9)$$

Darin bezeichnet L die Leontief-Inverse, welche auch als Gesamtbedarfsmatrix bezeichnet wird. Im Gegensatz zur Direktbedarfsmatrix A gibt die Leontief-Inverse L neben den direkt von jedem Sektor benötigten Inputs auch die indirekt benötigten, welche sich aus den Vorleistungsverflechtungen ergeben, an. Mittels Gleichung 4.9 kann somit der Gesamtbedarf (die durch die Sektoren jeweils zu produzierenden Mengen) bei gegebener Endnachfrage bestimmt werden.

Eine simple Erweiterung zeigt bereits die Relevanz dieses Ansatzes für klimapolitische Fragestellungen. Wird eine Matrix D^{THG} eingeführt, deren Elemente $d_{b,j}^{THG}$ die Emissionsfaktoren aller Treibhausgase b bezogen auf 1 € Output aller Sektoren j angeben, lässt sich mittels Gleichung 4.10 der Gesamtausstoß aller Treibhausgase \vec{e}^{THG} im betrachteten Wirtschaftsraum ermitteln.

$$\vec{e}^{THG} = D^{THG} \vec{x} = (D^{THG} L) \sum_{h=1}^m \vec{f}_h \quad (4.10)$$

Der Gesamtausstoß hängt somit wiederum direkt von der Endnachfrage ab. Dieser vergleichsweise einfache Linkage-Ansatz wird im Abschnitt 4.2.2 für die CO₂-Emissionen durch einen die Energieeffizienz und den Kohlenstoff-Input berücksichtigenden Ansatz ersetzt.

Neben der Wirkung von Nachfrageimpulsen lassen sich auch die Effekte von Preisimpulsen unter Zuhilfenahme der Input-Output-Logik analysieren. Das sogenannte **Preismodell** ist analog zum Mengenmodell aufgebaut und wird durch Gleichung 4.11 wiedergegeben.

$$\vec{p} = (I - A^T)^{-1} \left(\sum_{g=1}^l \vec{w}_g^x \right)^T = L^T \left(\sum_{g=1}^l \vec{w}_g^x \right)^T \quad (4.11)$$

Der Zeilenvektor $\vec{w}_g^x = \left[\frac{w_{g,1}}{x_1}, \dots, \frac{w_{g,n}}{x_n} \right]$ gibt darin den (monetären) Einsatz des Primärinputs g pro 1 € Output der einzelnen Sektoren j an. Das Preismodell trägt somit der Tatsache Rechnung, dass sich Änderungen der Preise einzelner Primärinputs auf die Kosten und damit die Preise \vec{p} der Outputs aller Sektoren auswirken. Die Preise entsprechen dabei den sektoralen Gesamtkosten, welche sich aus den zugelieferten Inputs sowie den (wertschöpfenden)³ Primärinputs zusammensetzen. Analog zum Mengenmodell werden die Preisänderungen in den Primärinputs einzelner Sektoren über die (transponierte) Leontief-Inverse an in der Wertschöpfungskette nachgelagerte Sektoren weitergereicht, die ihre Preise daraufhin anpassen und deren Produkte wiederum Inputs für andere Sektoren darstellen.

Da nur monetäre, keine physischen Input-Koeffizienten betrachtet und alle Input-Koeffizienten auf 1 € Output bezogen werden, stellen die so ermittelten Preise keine Absolutpreise sondern Preisindizes dar, welche die Änderungen im Vergleich zum Basisfall ausdrücken. Dies erlaubt im Bezug auf die angestrebte Dynamisierung des Modells die Verwendung von fiktiven physischen Einheiten, um die Entwicklungen der Preise von der Entwicklung der physischen Input-Koeffizienten zu trennen, ohne dabei Kenntnis über die tatsächlichen physischen Produktströme jedes Sektors zu besitzen (vgl. hierzu Abschnitt 4.2.1).

Zusammengefasst wirken sich beim Mengenmodell Nachfrageänderungen direkt und indirekt über die Leontief-Inverse auf die zu produzierenden Mengen aus, während beim Preismodell Änderungen der Primärinput-Preise über die transponierte Leontief-Inverse direkte und indirekte Preisänderungen hervorrufen. Im bisher analysierten statischen Fall wird die Konstanz der Direktbedarfsmatrix sowie der Leontief-Inverse vorausgesetzt, was jedoch für die Simulation zukünftiger Entwicklungen nicht tragbar ist, da bspw. der technische Fortschritt nicht berücksichtigt wird. Im Folgenden wird daher der vorgestellte Ansatz dynamisch erweitert.

³Importierte Güter stellen bspw. keinen Wertschöpfungsbereich dar, beeinflussen aber dennoch den Durchschnittspreis des Outputs eines Sektors.

4.2. Erweiterungen des Grundmodells

Die zwei wichtigsten Erweiterungen des im vorigen Abschnitt dargestellten Grundmodells stellen die dynamische Ausgestaltung des Ansatzes (Abschnitt 4.2.1), welche zahlreiche zusätzliche Rückkopplungen erfordert und mit einem umfassenden zusätzlichen Datenbedarf einhergeht sowie die umweltökonomische Erweiterung (Abschnitt 4.2.2), welche neben den Treibhausgasemissionen auch die gesamte Kohlenstoffintensität umfasst, dar. Während Abschnitt 4.2.3 die durch den erweiterten Ansatz ermöglichten Analysen aufzeigt, werden die vorgenommenen Erweiterungen in den folgenden zwei Abschnitten chronologisch, einem Simulationsdurchlauf folgend, erläutert. Die zeitliche Auflösung eines Durchlaufs entspricht dabei, den gegebenen IO-Daten folgend, einem Jahr.

4.2.1. Dynamisierung des Input-Output-Modells

Abbildung 4.1 zeigt einen Überblick über die dynamische Ausgestaltung des entwickelten IO-Teilmodells. Die darin dargestellten Rückkopplungen und Berechnungsmethoden werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Beginnend im Jahr t wird zunächst die monetäre $n \times n$ IO-Tabelle Z_t zusammen mit der $l \times n$ Matrix der Primärinputs W_t und der $n \times m$ Matrix der Endnachfrage F_t , welche in Mio. € notieren, in die $n \times n$ physische Direktbedarfsmatrix C_t , die $l \times n$ Matrix der Primärinput-Koeffizienten U_t und die $n \times m$ Matrix der Endnachfrage D_t , welche in fiktiven physischen Einheiten notieren, gemäß den Gleichungen 4.12 bis 4.14 überführt, wobei C_t und U_t die in den einzelnen Sektoren jeweils zum Einsatz kommenden Technologien repräsentieren (technische Koeffizienten, vgl. auch Gleichung 4.5).

$$c_{i,j,t} = \frac{z_{i,j,t}}{\sum_i z_{i,j,t} + \sum_g w_{g,j,t}} \cdot \frac{p_{j,t}}{p_{i,t}} \quad (4.12)$$

$$u_{g,j,t} = \frac{w_{g,j,t}}{\sum_i z_{i,j,t} + \sum_g w_{g,j,t}} \cdot \frac{p_{j,t}}{\pi_{g,j,t}} \quad (4.13)$$

$$d_{i,h,t} = \frac{f_{i,h,t}}{p_{i,t}} \quad (4.14)$$

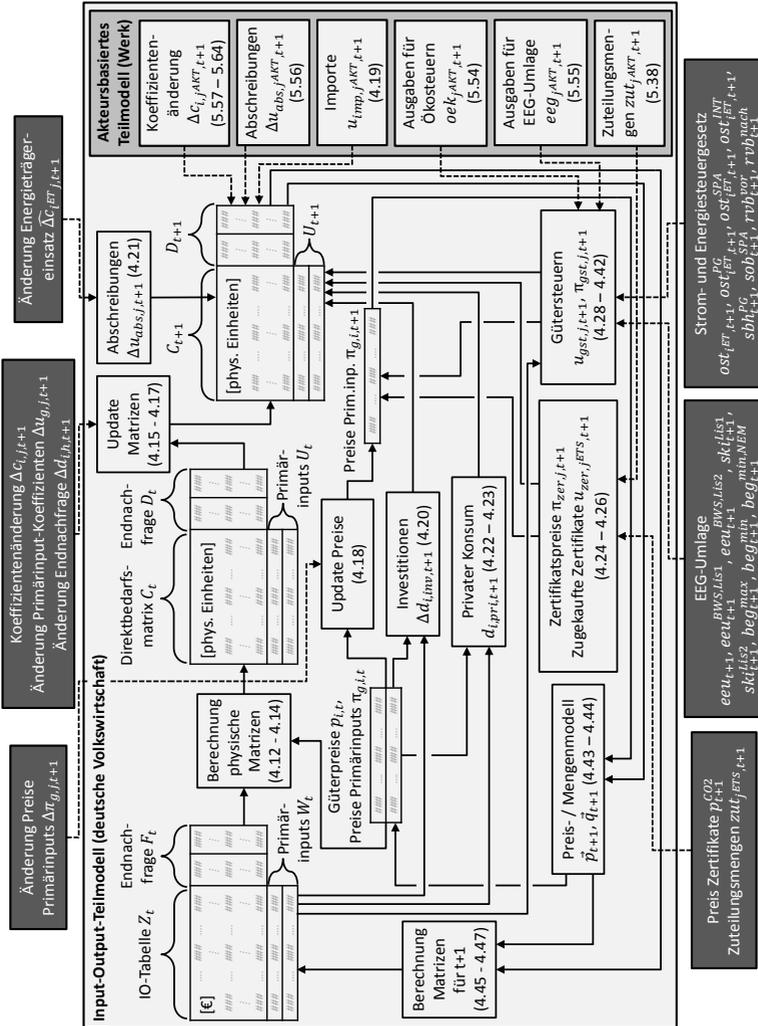


Abbildung 4.1.: Überblick über die Struktur des IO-Teilmodells mit Fokus auf der Simulation wirtschaftlicher Entwicklungen (In Klammern sind die für die Berechnungen relevanten Gleichungen angegeben)

Hierzu werden die Preise $p_{i,t}$ für Produkt i im Jahr t und $\pi_{g,j,t}$ für Primärinput g des Produkts j verwendet. Da bereits im Abschnitt 4.1 konstatiert wurde, dass es sich bei den einzelnen Produkten um Güterbündel handelt und die Aussagekraft von physischen Einheiten damit begrenzt ist, wird davon abgesehen, einen Versuch zu unternehmen sämtliche Produktströme in echten physischen Einheiten zu beziffern. Dennoch ist es notwendig, die zukünftigen Entwicklungen der Preise und Mengen voneinander zu entkoppeln, weshalb die Preise im Start- bzw. Basisjahr t^{BAS} der Simulation im Sinne eines Preisindizes auf 1,0 gesetzt werden (vgl. hierzu das Preismodell aus Abschnitt 4.1.2). Dadurch werden die Mengen in fiktiven physischen Einheiten gemessen, welche einem Preis von 1,0 € im Basisjahr entsprechen⁴. Im Startjahr entspricht somit die monetäre Direktbedarfsmatrix A_t der physischen Direktbedarfsmatrix C_t . Ähnliches gilt für die Primärinputs W_t und die Endnachfrage F_t . Im weiteren Verlauf werden die fiktiven physischen Einheiten vereinfachend als physische Einheiten bezeichnet, da die generelle Aussagekraft dieselbe ist.

Um zukünftigen Entwicklungen Rechnung zu tragen, werden im Rahmen der dynamischen Ausgestaltung des Modells die physische Direktbedarfsmatrix C_t , die physische Matrix der Primärinput-Koeffizienten⁵ U_t , die physische Endnachfrage D_t sowie die Preise der Primärinputs Π_t jährlich gemäß den Gleichungen 4.15 bis 4.18 angepasst. $\Delta c_{i,j,t+1}$, $\Delta u_{g,j,t+1}$, $\Delta d_{i,h,t+1}$ und $\Delta \pi_{g,j,t+1}$ stellen dabei exogen gegebene oder endogen berechnete prozentuale Änderungsraten dar.

⁴Beträgt die hergestellte Menge eines Produktes bspw. 500 t und ist der monetäre Gegenwert 10.000 €, so ergibt sich der Preis dieses Produktes zu 1,0 € pro 0,05 t, was die generelle Anwendbarkeit dieser Vorgehensweise zeigt. Vgl. hierzu auch Duchin [88].

⁵Primärinputs können oft nicht in echten physischen Einheiten angegeben werden. Eine Trennung in Mengen und Preise ergibt dennoch Sinn, da bspw. im Falle des Nettobetriebsüberschusses nbu eine Erhöhung der Menge als zusätzlicher Umsatz und damit des Gewinns interpretiert werden kann, während die Erhöhung des Preises für zusätzlichen Gewinn bei gleichem Umsatz stehen kann. Ähnliches gilt auch für die anderen Primärinputs.

$$c_{i,j,t+1} = c_{i,j,t} \cdot \Delta c_{i,j,t+1} \quad (4.15)$$

$$u_{g,j,t+1} = u_{g,j,t} \cdot \Delta u_{g,j,t+1} \quad (4.16)$$

$$d_{i,h,t+1} = d_{i,h,t} \cdot \Delta d_{i,h,t+1} \quad (4.17)$$

$$\pi_{g,j,t+1} = \pi_{g,j,t} \cdot \Delta \pi_{g,j,t+1} \quad (4.18)$$

4.2.1.1. Endogenisierung des Input-Output-Modells

Ein Teil der Änderungen wird für die im aktorsbasierten Teilmodell vertretenen Sektoren $j^{AKT} \subset j$ direkt aus letzterem endogen übernommen. So werden z.B. die Input-Koeffizienten $\Delta c_{i,j^{AKT},t+1}$ und die Abschreibungen $\Delta u_{abs,j^{AKT},t+1}$ für die Eisen- und Stahl- sowie die Aluminiumindustrie vergleichsweise detailliert auf Werks- bzw. Anlagenebene berechnet (vgl. Kapitel 5). Des Weiteren werden im aktorsbasierten Teilmodell bei nicht ausreichender Kapazität der inländischen Produktionsanlagen die zusätzlich notwendigen Importe $imz_{j^{AKT},t+1}$ als Verhältnis zu den im Inland produzierten Mengen beziffert (vgl. Abschnitt 5.3.3) und die Änderungen gemäß Gleichung 4.19 in die Matrix der Primärinput-Koeffizienten übernommen.

$$u_{imp,j^{AKT},t+1} = u_{imp,j^{AKT},t} + \frac{imz_{j^{AKT},t+1} \cdot q_{j^{AKT},t} - imz_{j^{AKT},t} \cdot q_{j^{AKT},t-1}}{\sum_i z_{i,j^{AKT},t} + \sum_g w_{g,j^{AKT},t}} \cdot p_{j^{AKT},t} \quad (4.19)$$

$q_{j,t} \in \vec{q}_t$ steht in Analogie zu $x_{j,t} \in \vec{x}_t$ (vgl. Gleichung 4.9) für den Output eines Sektors j im Jahr t , wobei $q_{j,t}$ in physischen Einheiten notiert. Somit kann $(imz_{j^{AKT},t+1} \cdot q_{j^{AKT},t})$ als absolute Zunahme der physischen Importe resultierend aus der Unterkapazität des aktorsbasierten Teilmodells interpretiert werden. Die Änderung der Zunahme gegenüber dem Vorjahr wird in Gleichung 4.19 ähnlich zu Gleichung 4.12 in die direkten physischen Primärinput-Koeffizienten umgerechnet und zu den Vorjahreswerten $u_{imp,j^{AKT},t}$ hinzuaddiert.⁶

⁶Weiterhin werden die Matrizen C_t und U_t normiert, da sich durch die zusätzlichen Importe die Gesamtmenge eines Sektors, bestehend aus produzierten und impor-

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 erläutert, ist ein möglicher Ansatz der Dynamisierung eines IO-Modells die Formulierung einer Kapitalbedarfs-Matrix, um die Investitionen in Kapitalgüter im Zeitverlauf abbilden zu können. Da dies mit einem sehr hohen zusätzlichen Datenbedarf einhergeht, wird in der vorliegenden Arbeit eine vergleichsweise einfache Methodik zur Berücksichtigung notwendiger Kapazitätsanpassungen verwendet, welche in Gleichung 4.20 beschrieben ist.

$$\Delta d_{i,inv,t+1} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{w_{abs,j,t}}{\pi_{abs,j,t}}}{\sum_{j=1}^n \frac{w_{abs,j,t-1}}{\pi_{abs,j,t-1}}} \quad (4.20)$$

Aus dieser Gleichung geht hervor, dass die Investitionen *inv* in Anlagen und Bauten abhängig von der Änderung der absoluten, physischen Abschreibungen des Vorjahres berechnet werden. Somit wird eine Abhängigkeit der Investitionen in Kapazitätsanpassungen vom Umfang der Nutzung vorhandener Produktionsanlagen unterstellt. Da keine Informationen vorliegen, durch welchen Sektor *j* welche Investitionen *inv* in den einzelnen Sektoren *i* generiert werden, wird vereinfachend die gleiche durchschnittliche prozentuale Änderung der gesamten Abschreibungen auf den Endnachfragebereich $d_{i,inv}$ der einzelnen Sektoren *i* übertragen⁷. Die Formulierung in Gleichung 4.20 verdeutlicht zudem das Akzelerationsprinzip, da eine Erhöhung der Produktionsmengen zusätzliche Abschreibungen generiert, die zu einer Erhöhung zukünftiger Investitionen führen, was letztlich wiederum die Produktionsmengen ankurbelt.

Auch bezüglich der Abschreibungen *abs* wird angenommen, dass diese endogen von anderen Parametern abhängen. Durch eine Regressionsanalyse lässt sich zeigen, dass eine Abhängigkeit der Abschreibungen von den erreichten Energieeffizienzsteigerungen existiert (vgl. Abschnitt 6.1). In Gleichung 4.21 repräsentiert $\widehat{\Delta}_{C_{iET},j,t}$ daher die Änderung des Energie-

tierten Mengen, erhöht, die Koeffizienten C_t und U_t sich jedoch auf die niedrigere Gesamtmenge ohne zusätzliche Importe beziehen. Ohne Normierung würde dies zu einer Überschätzung der Koeffizienten führen.

⁷In der IO-Tabelle des Modells wird im Endnachfragebereich darüber hinaus zwischen Investitionen in Bauten und Investitionen in Anlagen unterschieden, für die ebenfalls jeweils die gleichen prozentualen Änderungen angenommen werden.

trägereinsatzes $i^{ET} \subset i$ zur Energiebereitstellung im Sektor j .⁸ abq steht hingegen für die Quote, mit der sich die Abschreibungen, bezogen auf die Änderung der Energieeinsparungen $\left(1 - \widehat{\Delta c_{iET},j,t+1}\right)$, ändern.

$$\Delta u_{abs,j,t+1} = 1 + \left(1 - \widehat{\Delta c_{iET},j,t+1}\right) \cdot abq \quad (4.21)$$

Die bereits in Abschnitt 3.2.2 kurz erläuterte Endogenisierung von IO-Modellen hin zum Modell-Typ II (vgl. [319]) sieht die integrierte Berücksichtigung von Einkommen und Ausgaben der Haushalte vor. Hierzu wird in der vorliegenden Arbeit ein lineares Ausgabensystem (*linear expenditure system*, LES) [233, 277] verwendet, in welchem der private Konsum in einen konstanten Teil μ_v , den Mindestkonsum des Verwendungszwecks v und einen variablen Teil α_v , welcher vom verbleibenden Einkommen und den jeweiligen Anschaffungspreisen abhängt, aufgespaltet wird. Zunächst wird jedoch mittels Gleichung 4.22 das im Jahr t für Konsumzwecke zur Verfügung stehende Einkommen vek_t abgeleitet.

$$vek_t = \left(\sum_j w_{ae,j,t} \cdot nlq \cdot meq + \sum_j w_{nbu,j,t} \right) \cdot (1 - spq) \quad (4.22)$$

Dieses setzt sich aus den Arbeitsentgelten ae sowie den Nettobetriebsüberschüssen nbu zusammen. Erstere werden zunächst mittels einer Quote nlq auf die Nettolöhne und mittels einer die Sozialleistungen berücksichtigenden Quote meq auf das Masseneinkommen umgerechnet. Das Masseneinkommen ergibt zusammen mit den Nettobetriebsüberschüssen letztlich das verfügbare Einkommen, von dem weiterhin der gesparte Anteil (Sparquote spq) abzuziehen ist, der nicht für Konsumzwecke zur Verfügung steht.

Der private Konsum $d_{i,pri,t+1}$ jedes Produkts i kann mittels Gleichung 4.23 ohne den Umweg über etwaige Änderungsraten $\Delta d_{i,pri,t+1}$ direkt berechnet werden. Hierzu müssen die Produkte der Sektoren i, j zunächst in die Verwendungszwecke v, r transformiert werden, um den Konsumbereichen der Haushalte zu entsprechen. So besteht bspw. der Verwendungszweck

⁸Im Vergleich dazu bezeichnet $\Delta c_{iET},j,t$ den Energieträgereinsatz zur Energiebereitstellung und zur stofflichen Nutzung, vgl. auch Gleichung 4.53.

bzw. der Konsumbereich *Nahrungsmittel* aus Produkten der Sektoren *Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd, Fische und Fischereierzeugnisse, Nahrungs- und Futtermittel* sowie weiterer Produktionsbereiche. Umgekehrt kann ein Produktionsbereich auch mehrere Verwendungszwecke abdecken.

$$d_{i,pri,t+1} = \sum_v \left(\left(\mu_v \cdot \frac{p_{v,t}^{AN}}{p_{v,t}^{ANBAS}} + \alpha_v \cdot \left(vek_t - \sum_r \frac{p_{r,t}^{AN}}{p_{r,t}^{ANBAS}} \cdot \mu_r \right) \right) \cdot \frac{\sum_j kvt_{i,v}}{\sum_j kvt_{j,v}} \cdot \frac{\Delta bev_t \cdot \Delta eff_{i,t}^H}{ste_i \cdot p_{i,t}} \right) \quad (4.23)$$

mit $p_{v,t}^{AN} = \sum_i p_{i,t} \cdot ste_i \cdot \frac{kvt_{i,v}}{\sum_j kvt_{j,v}}$

Die Konsumverflechtungstabelle *KVT* [66] gibt in Gleichung 4.23 die in einem Jahr gegebenen monetären Ströme der Produktionsbereiche i an die Verwendungszwecke v analog zu einer IO-Tabelle wieder. Daher bezeichnet $\frac{kvt_{i,v}}{\sum_j kvt_{j,v}}$ die jeweiligen Anteile der Produktionsbereiche i an 1 € Verwendungszweck v . Weiterhin bezeichnet $p_{v,t}^{AN}$ den von den Endkonsumenten zu zahlenden Anschaffungspreis auf den Verwendungszweck v , der sich aus den Herstellungspreisen $p_{i,t}$ der Produkte i zuzüglich der Steuern ste_i errechnet. Mittels $\frac{p_{v,t}^{AN}}{p_{v,t}^{ANBAS}}$ werden die Anschaffungspreise in t auf die Anschaffungspreise des Basisjahrs t^{BAS} bezogen, da die so erhaltenen Preisindizes die relative Preisänderung gegenüber dem Basisjahr darstellen, für welches die Anschaffungspreise zur Bestimmung der Parameter Mindestkonsum μ_v und variabler Konsumanteil α_v auf 1,0 € gesetzt wurden (Vgl. zu dieser Vorgehensweise auch die Ausführungen zu den Gleichungen 4.12 bis 4.14).⁹ μ_v bezeichnet den absoluten monetären Mindestkonsum zu Preisen des Basisjahrs, während α_v den nach Abzug des Mindestkonsums übrigen Teil des Einkommens auf die Verwendungszwecke aufteilt ($\sum_v \alpha_v = 1$). Der Mindestkonsum kann dabei auch als menschliches Grundbedürfnis (Bsp.: Nahrung, Wohnen), das in der Regel

⁹Die Bestimmung der Parameter μ_v und α_v wird in Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

zuerst befriedigt wird, interpretiert werden. Der so erhaltene monetäre Konsum pro Verwendungszweck v wird in Gleichung 4.23 wiederum den Produktionsbereichen i zugeordnet und in physische Einheiten überführt. Daneben wird mittels Δbev_t die Änderung der Bevölkerung und damit des Konsums berücksichtigt und mittels $\Delta eff_{i,t}^H$ etwaige Effizienzsteigerungen, vor allem im Bezug auf den Energieträgereinsatz i^{ET} für Heizvorgänge in privaten Haushalten, modelliert. Gesamt betrachtet werden mittels Gleichung 4.23 die Auswirkungen einer Änderung der Herstellungspreise auf die Nachfrage der privaten Konsumenten und damit letztlich auf die herzustellenden Mengen modelliert.

4.2.1.2. Abbildung der klimapolitischen Instrumente im Input-Output-Modell

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Bewertung klimapolitischer Instrumente liegt, wird der Einfluss letzterer auf die Herstellungspreise vergleichsweise detailliert modelliert. Neben dem Emissionszertifikatehandel (vgl. Abschnitt 2.2.3) werden das Energie- und das Stromsteuergesetz (vgl. Abschnitt 2.2.4) sowie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (vgl. Abschnitt 2.2.5) betrachtet.

Die verwendete Input-Output-Tabelle sieht neben den bereits in Abschnitt 4.1.1 aufgezeigten klassischen Primärinputbereichen auch eine Zeile \vec{w}_{zer} für die von den jeweiligen Sektoren käuflich erworbenen Emissionszertifikate vor, da diese ebenfalls die Herstellungspreise beeinflussen. Gleichung 4.24 zeigt die Anpassung der Zertifikatspreise $\pi_{zer,j,t+1}$, während Gleichungen 4.25 und 4.26 die Anpassung der zugekauften Menge an Emissionszertifikaten $u_{zer,j,t+1}$ beschreiben. Da die Preise der Primärinputs im Startjahr t^{BAS} auf 1,0 gesetzt werden, werden in Gleichung 4.24 die relativen Änderungen des Preises für Emissionszertifikate $p_t^{CO_2}$, welcher in € pro t CO₂-Äquivalent angegeben ist und exogen vorgegeben wird, im Vergleich zum Vorjahr berechnet.

$$\pi_{zer,j,t+1} = \pi_{zer,j,t} \cdot \frac{p_{t+1}^{CO2}}{p_t^{CO2}} \quad (4.24)$$

$$u_{zer,j^{ETS},t+1} = \frac{\left(\sum_{b^{ETS}} e_{j^{ETS},b^{ETS},t} - zut_{j^{ETS},t+1}\right) \cdot p_{t+1}^{CO2}}{\left(\sum_i z_{i,j^{ETS},t} + \sum_g w_{g,j^{ETS},t}\right) \cdot 10^6} \cdot \frac{p_{j^{ETS},t}}{\pi_{zer,j^{ETS},t+1}} \quad (4.25)$$

$$u_{zer,j \neq j^{ETS},t+1} = 0 \quad (4.26)$$

Die zugekaufte Menge an Zertifikaten hängt in Gleichung 4.25 von den sektoral emittierten Treibhausgasen $e_{j^{ETS},b^{ETS},t}$ ab, wobei diese in t CO₂-Äquivalente (vgl. Tabelle 2.1 in Abschnitt 2.1) angegeben sind. Der Handel findet dabei nur für bestimmte Sektoren $j^{ETS} \subset j$ und Treibhausgase $b^{ETS} \subset b$, wie sie im TEHG [285] (vgl. Abschnitt 2.2.3) spezifiziert sind, statt.¹⁰ Weiterhin ist die Menge an zugekauften Zertifikaten abhängig von der kostenlos zugeteilten Menge $zut_{j^{ETS},t+1}$, welche von den Emissionen abzuziehen ist. Während die Emissionen $e_{j,b,t}$ endogen berechnet werden (vgl. Abschnitt 4.2.2), wird die zugeteilte Menge an Zertifikaten exogen vorgegeben. Auch Gleichung 4.25 transformiert letztlich analog zu den anderen Primärinputs die monetären Größen der zugekauften Emissionsberechtigungen in die physischen Primärinput-Koeffizienten, der Faktor 10^6 berücksichtigt darüber hinaus die in Mio. € notierende monetäre IO-Tabelle. Für nicht handelspflichtige Sektoren werden die entsprechenden Ausgaben auf Null gesetzt (Gleichung 4.26).

Während die sektoralen Ausgaben für Emissionsberechtigungen direkt von den Treibhausgasemissionen abhängen, werden die Ausgaben für Ökosteuer und EEG-Umlage durch den Input an Energieträgern bestimmt (vgl. Abschnitte 2.2.4 und 2.2.5). Deshalb wird analog zur Struktur der monetären IO-Tabelle eine weitere Matrix ENT_t definiert, welche den physischen Input an Energieträgern i^{ET} der einzelnen Sektoren j angibt und in TJ notiert. Die Fortschreibung dieser Energieträgermatrix, welche für das Basisjahr t^{BAS} in absoluten Einheiten (TJ) bestimmt wird (vgl. Abschnitt 6.1.1), erfolgt abhängig von der relativen Änderung der physischen IO-Tabelle gemäß Gleichung 4.27.

¹⁰Neben CO₂ fallen seit 2013 nun auch N₂O und PFC unter das Handelsgesetz.

$$ent_{iET,j,t} = ent_{iET,j,t-1} \cdot \frac{\frac{z_{iET,j,t}}{p_{iET,t}}}{\frac{z_{iET,j,t-1}}{p_{iET,t-1}}} \quad (4.27)$$

Neben den Normalsteuersätzen $ost_{iET,t}$ auf Energieträger i^{ET} , welche in € pro GJ angegeben sind (vgl. Spalte 2 in Tabelle 2.4, Abschnitt 2.2.4), sehen das Strom- und Energiesteuergesetz zwei Entlastungsstufen $ela_{j^{PG},t}^{St1}$ bzw. $ela_{j^{PG},t}^{St2}$ für dem produzierenden Gewerbe zugehörige Sektoren $j^{PG} \subset j$ vor, welche von der zu zahlenden Ökoststeuer $oek_{j,t}$ abgezogen werden, was sich ebenfalls in Gleichung 4.28 wiederfindet. Die Berechnung dieser Entlastungen wird darüber hinaus mittels der Gleichungen 4.29 und 4.30 vorgenommen. Gehört ein Sektor nicht dem produzierenden Gewerbe an, werden keine Entlastungen gewährt (Gleichung 4.31). Durch den Faktor 1.000 wird die in TJ angegebene Matrix ENT_t in GJ umgerechnet. An dieser Stelle, wie auch über die gesamte Arbeit hinweg, wird bei Gleichungen der Konvention gefolgt, dass Subskripte als Indizes zu verstehen sind, während Superskripte Bezeichnungen darstellen.

$$oek_{j,t+1} = \sum_{iET} ent_{iET,j,t} \cdot 1.000 \cdot ost_{iET,t+1} - ela_{j,t+1}^{St1} - ela_{j,t+1}^{St2} \quad (4.28)$$

$$ela_{j^{PG},t+1}^{St1} = \sum_{iET} ent_{iET,j^{PG},t} \cdot 1.000 \cdot \left| ost_{iET,t+1}^{PG} \right| - anz_{j^{PG}}^U \cdot sbh_{t+1}^{PG} \quad (4.29)$$

$$ela_{j^{PG},t+1}^{St2} = ers_{t+1}^{SPA} \cdot \left(\sum_{iET} ent_{iET,j^{PG},t} \cdot 1.000 \cdot \left| ost_{iET,t+1}^{SPA} \right| - anz_{j^{PG}}^U \cdot sob_{t+1}^{SPA} - \frac{rvb_{t+1}^{vor} - rvb_{t+1}^{nach}}{2} \cdot w_{ae,j^{PG},t} \cdot 10^6 \right) \quad (4.30)$$

$$ela_{j \neq j^{PG},t+1}^{St1} = ela_{j \neq j^{PG},t+1}^{St2} = 0 \quad (4.31)$$

$ela_{j^{PG},t+1}^{St1}$ wird in Gleichung 4.29 über die in € pro GJ notierenden Steuerentlastungssätze $ost_{i^{ET},t+1}^{PG}$ für das produzierende Gewerbe berechnet (vgl. Spalte 3 in Tabelle 2.4, Abschnitt 2.2.4). Daneben wird der pro Unternehmen zu entrichtende Selbstbehalt sbh_{t+1}^{PG} mit der Anzahl der Unternehmen in einem Sektor $anz_{j^{PG}}^U$ multipliziert und von der Entlastung abgezogen.

Die Berechnung der Entlastungen in der zweiten Stufe $ela_{j^{PG},t+1}^{St2}$ mittels Gleichung 4.30 ist zunächst ähnlich aufgebaut. Die maximalen Entlastungssätze $ost_{i^{ET},t+1}^{SPA}$ im sogenannten Spitzenausgleich (vgl. Spalte 4 in Tabelle 2.4, Abschnitt 2.2.4) werden jedoch neben dem von jedem Unternehmen zu zahlenden Sockelbetrag sob_{t+1}^{SPA} um den Unterschiedsbetrag des durch den Arbeitgeber zu entrichtenden Rentenversicherungsbeitrags gekürzt. Dabei bezeichnen rvb_{t+1}^{vor} und rvb_{t+1}^{nach} die vor bzw. nach der ökologischen Steuerreform zu zahlenden Rentenversicherungsbeiträge (vgl. Abschnitt 2.2.4), welche zu gleichen Teilen von Arbeitgeber und Arbeitnehmer getragen werden ($\frac{1}{2}$) und mit den (Brutto-)Arbeitsentgelten $w_{ae,j^{PG},t}$ verrechnet werden. Der Faktor 10^6 berücksichtigt dabei wiederum die in Mio. € notierende IO-Tabelle. Letztlich wird die so ermittelte maximale Entlastungssumme mit dem Erstattungssatz ers_{t+1}^{SPA} im Spitzenausgleich multipliziert.

Neben den aufgezeigten Entlastungen existieren weiterhin Steuervergünstigungen bzw. -befreiungen für bestimmte Sektoren j^{INT} , die als besonders energieintensiv gelten (vgl. Abschnitt 2.2.4). In diesem Fall wird der verminderte Steuersatz $ost_{i^{ET},t}^{INT}$ verwendet, was in Gleichung 4.32 dargestellt wird. Im Falle einer Steuerbefreiung gilt $ost_{i^{ET},t}^{INT} = 0$.

$$oek_{j^{INT},t+1} = \sum_{i^{ET}} ent_{i^{ET},j^{INT},t} \cdot 1.000 \cdot ost_{i^{ET},t+1}^{INT} \quad (4.32)$$

Im Gegensatz zur Ökosteuern hängt die pro Sektor j zu zahlende EEG-Umlage $eeg_{j,t+1}$ lediglich von der eingesetzten Elektrizität $i^{El} \subset i$ ab, wobei auch hier zahlreiche Sonderregeln existieren (vgl. Abschnitt 2.2.5). So wird ein Teil der Sektoren gemäß EEG [107] zwei Branchenlisten zugeordnet ($j^{Lis1} \subset j^{Lis} \subset j$ bzw. $j^{Lis2} \subset j^{Lis} \subset j$), für die unterschiedliche Bedingungen gelten. Gehört ein Sektor keiner der beiden Listen an, so ist Gleichung 4.33 zur Berechnung der regulär zu zahlenden EEG-Umlage

maßgeblich, wobei eeu_{t+1} die EEG-Umlage im Sinne eines exogen gegebenen Steuersatzes, angegeben in € pro GJ, darstellt. Der Faktor 1.000 berücksichtigt auch hier die in TJ notierende Energieträgermatrix ENT .

$$ee_{j \neq j^{Lis}, t+1} = ent_{i^{El}, j \neq j^{Lis}, t} \cdot 1.000 \cdot eeu_{t+1} \quad (4.33)$$

Gehört ein Unternehmen bzw. ein Sektor einer der beiden Listen an, müssen weitere Anforderungen erfüllt sein, damit eine Reduzierung der EEG-Umlage (Begünstigung) erfolgt. Diese Anforderungen sind in Gleichung 4.34 festgehalten.

$$j \begin{cases} = j^{Lis1}, & \text{falls } \frac{ent_{i^{El}, j^{Lis1}, t}}{anz_{j^{Lis1}}} > 3,6 \\ & \text{und } \sum_{g \in \{ae, sop, abs, nbu\}} \frac{z_{i^{El}, j^{Lis1}, t}}{w_{g, j^{Lis1}, t}} \geq ski_{t+1}^{Lis1} \\ = j^{Lis2}, & \text{falls } \frac{ent_{i^{El}, j^{Lis2}, t}}{anz_{j^{Lis2}}} > 3,6 \\ & \text{und } \sum_{g \in \{ae, sop, abs, nbu\}} \frac{z_{i^{El}, j^{Lis2}, t}}{w_{g, j^{Lis2}, t}} \geq ski_{t+1}^{Lis2} \\ \neq j^{Lis}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.34)$$

Zum einen muss der Stromverbrauch eines Unternehmens größer als 1 GWh (3,6 TJ) sein, zum anderen muss die Stromkostenintensität über einem vorgegebenen Mindestwert ski_{t+1}^{Lis1} bzw. ski_{t+1}^{Lis2} liegen, der je nach Liste unterschiedlich hoch ist. Die Stromkostenintensität bezeichnet dabei das Verhältnis der Stromkosten zur Bruttowertschöpfung, welche sich wiederum aus den Arbeitsentgelten ae , den sonstigen Produktionsabgaben sop , den Abschreibungen abs sowie dem Nettobetriebsüberschuss nbu zusammensetzt. Werden die gegebenen Anforderungen nicht erfüllt, so ist Gleichung 4.33 maßgeblich zur Berechnung der zu zahlenden EEG-Umlage. Bei einer Erfüllung der Anforderungen werden Gleichungen 4.35 bis 4.39 zur Berechnung herangezogen.

$$eeg_{j^{Lis},t+1} = \max \left(\min \left(eeg_{j^{Lis},t+1}^{Lis}, eeg_{j^{Lis},t+1}^{max} \right), eeg_{j^{Lis},t+1}^{min} \right) \quad (4.35)$$

$$eeg_{j^{Lis1},t+1}^{Lis} = anz_{j^{Lis1},t+1}^U \cdot 3.600 \cdot eeu_{t+1} + eeu_{t+1}^{BWS,Lis1} \cdot \sum_{g \in \{ae,sop,abs,nbu\}} w_{g,j^{Lis1},t} \cdot 10^6 \quad (4.36)$$

$$eeg_{j^{Lis2},t+1}^{Lis} = anz_{j^{Lis2},t+1}^U \cdot 3.600 \cdot eeu_{t+1} + eeu_{t+1}^{BWS,Lis2} \cdot \sum_{g \in \{ae,sop,abs,nbu\}} w_{g,j^{Lis2},t} \cdot 10^6 \quad (4.37)$$

$$eeg_{j^{Lis},t+1}^{max} = \left(anz_{j^{Lis},t+1}^U \cdot 3,6 + \left(ent_{i^{El},j^{Lis},t} - anz_{j^{Lis},t+1}^U \cdot 3,6 \right) \cdot beg_{t+1}^{max} \right) \cdot 1.000 \cdot eeu_{t+1} \quad (4.38)$$

$$eeg_{j^{Lis},t+1}^{min} = \left(anz_{j^{Lis},t+1}^U \cdot 3,6 \cdot eeu_{t+1} + \left(ent_{i^{El},j^{Lis},t} - anz_{j^{Lis},t+1}^U \cdot 3,6 \right) \cdot beg_{t+1}^{min} \right) \cdot 1.000 \quad (4.39)$$

Diese Berechnung sieht Begrenzungen der zu zahlenden EEG-Umlage nach oben $eeg_{j^{Lis},t+1}^{max}$ und unten $eeg_{j^{Lis},t+1}^{min}$ vor, die jeweils einzuhalten sind (Gleichung 4.35). Während aus Gleichung 4.38 hervorgeht, dass die erste GWh (entspricht 3,6 TJ) voll zu bezahlen ist, wird die Umlage eeu_{t+1} des verbleibenden Stromeinsatzes durch einen vorgegebenen Prozentsatz beg_{t+1}^{max} begrenzt. Der Faktor 1.000 wird auch hier für die Umrechnung von GJ in TJ verwendet. Gleichung 4.39, welche die untere Grenze berechnet, ist ähnlich zu Gleichung 4.38 aufgebaut, wobei die Begrenzung beg_{t+1}^{min} hier in absoluten Einheiten (€ pro GJ) angegeben ist. Innerhalb der gegebenen Grenzen ergibt sich die EEG-Umlage $eeg_{j^{Lis},t+1}^{Lis}$ gemäß den Gleichungen 4.36 sowie 4.37. Neben der ersten GWh, die voll zu bezahlen ist, berechnet sich die darüber hinaus zu bezahlende Umlage abhängig von der jeweiligen Bruttowertschöpfung, wobei $eeu_{t+1}^{BWS,Lis1}$ bzw. $eeu_{t+1}^{BWS,Lis2}$ die vorgegebenen Prozentsätze nach Liste 1 bzw. Liste 2 des EEG darstellen (vgl. Abschnitt 2.2.5).

Weitere Ausnahmen des EEG betreffen die energieintensive Nicht-Eisen-Metallindustrie j^{NEM} (Gleichung 4.40), für die eine niedrigere Untergrenze $beg_{t+1}^{min,NEM}$ als beg_{t+1}^{min} in Gleichung 4.39 gilt.

$$eeg_{jNEM,t+1}^{min} = \left(anz_{jNEM}^U \cdot 3,6 \cdot eeu_{t+1} + \left(ent_{i^{El},jNEM,t} - anz_{jNEM}^U \cdot 3,6 \right) \cdot beg_{t+1}^{min,NEM} \right) \cdot 1.000 \quad (4.40)$$

Neben dieser, das aktuelle EEG reflektierenden Berechnungsweise sind auch weiterhin die älteren Berechnungsmethoden nach EEG 2009 [105] und EEG 2012 [106] (vgl. Abschnitt 2.2.5) für die entsprechenden Jahre t im Modell implementiert, werden jedoch an dieser Stelle nicht genauer ausgeführt.

Für die im aktorsbasierten Teilmodell vertretenen Sektoren $j^{AKT} \subset j$ werden die durch klimapolitische Instrumente induzierten Ausgaben auf Werksebene und damit detaillierter als in den vorigen Gleichungen dargestellt berechnet (vgl. Abschnitt 5.3). Hierzu gehören neben der Ökosteuer $oek_{jAKT,t+1}$ und der EEG-Umlage $eeg_{jAKT,t+1}$ auch die mittels der verschiedenen Zuteilungsansätze (vgl. Abschnitt 2.2.3) ermittelten kostenlos zugeteilten Zertifikate $zut_{jAKT,t+1}$.

Während die Ausgaben für Emissionszertifikate im hier beschriebenen Teilmodell durch eine separate Zeile \vec{w}_{zer} in der IO-Tabelle wiedergegeben werden, können Ökosteuer und EEG-Umlage ihrer Definition nach den Gütersteuern gst zugeordnet werden. Dies erfolgt mittels der Gleichungen 4.41 und 4.42. Bezüglich der Preise $\pi_{gst,j,t+1}$ werden wiederum relative Änderungen der pro TJ Energieträgereinsatz zu entrichtenden Ökosteuer und EEG-Umlage im Vergleich zum Vorjahr gemäß Gleichung 4.41 weitergegeben. Diese Änderungen werden weiterhin gewichtet mit dem Anteil der klimapolitischen Instrumente an den gesamten Gütersteuern, die zusätzlich aus einem fixen Anteil fix_j bestehen. Für diesen fixen Anteil werden keine Änderungen der Steuern bzw. Preise angenommen (= 1).

Bezüglich der mittels Gleichung 4.42 berechneten Mengen $u_{gst,j,t+1}$ werden, wie auch im Falle der Zertifikate, die monetären Größen über die Preise $p_{j,t}$ und $\pi_{gst,j,t+1}$ in die physischen Primärinput-Koeffizienten überführt, wobei der Faktor 10^6 die Einheiten der IO-Tabelle berücksichtigt, welche in Mio. € angegeben ist.

$$\pi_{gst,j,t+1} = \pi_{gst,j,t} \cdot \left(\frac{oe k_{j,t+1} + eeg_{j,t+1}}{oe k_{j,t+1} + eeg_{j,t+1} + fix_j} \cdot \frac{oe k_{j,t+1} + eeg_{j,t+1}}{\sum_{i \in ET} ent_{i,ET,j,t}} + \frac{fix_j}{oe k_{j,t+1} + eeg_{j,t+1} + fix_j} \cdot 1 \right) \quad (4.41)$$

$$u_{gst,j,t+1} = \frac{oe k_{j,t+1} + eeg_{j,t+1} + fix_j}{\left(\sum_i z_{i,j,t} + \sum_g w_{g,j,t} \right) \cdot 10^6} \cdot \frac{p_{j,t}}{\pi_{gst,j,t+1}} \quad (4.42)$$

4.2.1.3. Ableitung der aktualisierten Input-Output-Tabelle

Neben den im vorliegenden Abschnitt aufgezeigten endogenen Anpassungen der IO-Tabelle gehen, wie bereits erläutert, weiterhin exogene Größen in die Gleichungen 4.15 bis 4.18 ein. Diese exogenen Größen, wie bspw. Änderungen der sektoralen Exporte $\Delta d_{i,exp,t+1}$, werden in Abschnitt 6.1 spezifiziert. Insofern keine exogenen oder endogenen Änderungen betrachtet werden, werden die entsprechenden Werte $\Delta c_{i,j,t+1}$, $\Delta u_{g,j,t+1}$, $\Delta d_{i,h,t+1}$ sowie $\Delta \pi_{g,j,t+1}$ gleich Eins gesetzt.

Die bisherigen Anpassungen wurden an den physischen Koeffizienten-Matrizen C_t und U_t vorgenommen, die den Input relativ zum Output angeben, sowie an den Preisen der Primärintputs Π_t und an der physischen absoluten Endnachfrage D_t . Während die Änderungen in C_t und D_t die sektoralen Lieferstrukturen und damit den Gesamtbedarf beeinflussen, zeigen die Änderungen in C_t , U_t und Π_t Auswirkungen auf die sektoralen Kostenstrukturen und damit die Produktpreise. Um letztlich Aussagen über den Gesamtbedarf in physischen Einheiten \vec{q} und die sich einstellenden Güterpreise \vec{p} machen zu können, sind daher das Mengen- (vgl. Gleichung 4.9) und das Preismodell (vgl. Gleichung 4.11) vom monetären auf den physischen Fall zu übertragen. Dies zeigen Gleichungen 4.43 und 4.44, welche analog zum monetären Mengen- und Preismodell aufgebaut sind. Um in letzterer den Wert der eingesetzten Primärintputs pro physischem Output, analog zu \vec{w}_g^x , zu erhalten wird der Zeilenvektor $\vec{u}_{g,t+1}$ elementweise mit dem Zeilenvektor $\vec{\pi}_{g,t+1}$ multipliziert.

$$\vec{q}_{t+1} = (I - C_{t+1})^{-1} \cdot \left(\sum_{h=1}^m \vec{d}_{h,t+1} \right) \quad (4.43)$$

$$\vec{p}_{t+1} = (I - C_{t+1}^T)^{-1} \cdot \left(\sum_{g=1}^l \vec{u}_{g,t+1} \circ \vec{\pi}_{g,t+1} \right)^T \quad (4.44)$$

Schließlich kann mit den so berechneten Größen die aktualisierte monetäre IO-Tabelle, bestehend aus den Vorleistungen Z_{t+1} , den Primärinputs W_{t+1} und dem Endnachfragebereich F_{t+1} für das Jahr $t + 1$ gemäß den Gleichungen 4.45 bis 4.47 abgeleitet werden. Hierzu werden die jeweiligen physischen Größen mit den aktualisierten Preisen $p_{i,t+1}$ bzw. $\pi_{g,j,t+1}$ multipliziert und die Koeffizienten der Matrizen C_{t+1} bzw. U_{t+1} über den aktualisierten Gesamtbedarf \vec{q}_{t+1} in absolute Einheiten transformiert. Die so für das Jahr $t + 1$ ermittelte monetäre IO-Tabelle ist hinsichtlich Aufkommen und Verwendung konsistent (vgl. Gleichung 4.4).

$$z_{i,j,t+1} = c_{i,j,t+1} \cdot p_{i,t+1} \cdot q_{j,t+1} \quad (4.45)$$

$$w_{g,j,t+1} = u_{g,j,t+1} \cdot \pi_{g,j,t+1} \cdot q_{j,t+1} \quad (4.46)$$

$$f_{i,h,t+1} = d_{i,h,t+1} \cdot p_{i,t+1} \quad (4.47)$$

Mit den Gleichungen 4.45 bis 4.47 schließt sich der Simulationsdurchlauf, so dass t um Eins erhöht wird und die Aktualisierungen für das Folgejahr, wiederum beginnend bei Gleichungen 4.12 bis 4.14, vorgenommen werden.

Neben der in diesem Abschnitt erläuterten, auf einer endogenen Entwicklung von privatem Konsum, Kapazitätsanpassungen und Ausgaben für klimapolitische Instrumente beruhenden Dynamik, erhöhen weiterhin die durch das aktorsbasierte Teilmodell bestimmten Größen (j^{AKT}) den Endogenisierungsgrad des vorgestellten IO-Modells. Diese Dynamik erlaubt die für eine Bewertung klimapolitischer Instrumente notwendige Simulation konsistenter zukünftiger Entwicklungen. Mit dem bisher vorgestellten Ansatz lassen sich jedoch lediglich ökonomische Auswirkungen auf die Preise

und Produktionsmengen einzelner Güter abschätzen, weswegen eine Erweiterung des Modells zur Abschätzung der Effekte auf bspw. die sektoralen Treibhausgasemissionen und den fossilen Ressourcenverbrauch benötigt wird. Hierzu wird im Abschnitt 4.2.2 eine umweltökonomische Erweiterung des Modells hinsichtlich klimarelevanter Parameter vorgenommen.

4.2.2. Umweltökonomische Erweiterung des Input-Output-Modells

Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit der Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen in umweltökonomisch erweiterten IO-Modellen stellt die Verwendung des sogenannten Linkage-Ansatzes (vgl. Gleichung 4.10) dar, welcher zuvor bestimmte Emissionsfaktoren mit dem Output der Sektoren in Beziehung setzt. Dieser Ansatz greift jedoch zu kurz, da keine zukünftigen Effizienzsteigerungen berücksichtigt werden und die Höhe der Emissionen lediglich von der produzierten Menge abhängt. Des Weiteren vernachlässigt dieser Ansatz den Kohlenstoff, welcher nicht in Form von CO_2 emittiert wird, sondern chemisch in den (End-)Produkten gebunden ist, damit im Bestand einer Volkswirtschaft verbleibt und den fossilen Ressourcenverbrauch maßgeblich mit beeinflusst. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit eine Methodik verfolgt, die die anthropogenen Kohlenstoffflüsse einer Volkswirtschaft der Input-Output-Logik folgend explizit aufschlüsselt, um so zumindest die Entstehung des bedeutendsten Treibhausgases CO_2 (vgl. Abbildung 2.1 in Abschnitt 2.1) adäquat unter Berücksichtigung der Entwicklung von Energie- und Materialeffizienz abbilden zu können. Für die restlichen Treibhausgase, die in Deutschland etwa 12% der emittierten CO_2 -Äquivalente repräsentieren und nicht direkt vom eingesetzten Kohlenstoff abhängen (vgl. Gleichung 2.1 in Abschnitt 2.1), wird der Linkage-Ansatz beibehalten.

Da eine die anthropogenen Kohlenstoffflüsse Deutschlands repräsentierende, physische IO-Tabelle nicht (öffentlich) verfügbar ist, muss diese in einem ersten Schritt aus den vorhandenen Daten für das Basisjahr t^{BAS} abgeleitet werden, was im Rahmen des Kapitels 6, welches die Datengrundlage beider Teilmodelle beschreibt, erläutert wird. Im vorliegenden Abschnitt werden hingegen, den einzelnen Schritten eines Simulationsdurchlaufs folgend, die jährliche Aktualisierung der Kohlenstoff-IO-Tabelle (KIO-Tabelle)

sowie die Interaktion mit der monetären bzw. physischen IO-Tabelle des vorherigen Abschnitts beschrieben und letztlich in Abschnitt 4.2.3 die durch diesen neuen Ansatz ermöglichten Analysen aufgezeigt.

Die KIO-Tabelle, welche in Tabelle 4.2 dargestellt ist und in Tonnen Kohlenstoff notiert, enthält im ersten Quadranten neben den Kohlenstoffflüssen zwischen sämtlichen Produktionsbereichen $cz_{i,j}$ auch die Kohlenstoffflüsse zwischen Produktionsbereichen und privatem Konsum, der somit hier nicht der letzten Verwendung zugeordnet wird. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass private Haushalte zwar keine Produkte herstellen, aber fossile Ressourcen beziehen und Treibhausgase emittieren, weshalb Z die Dimensionen $n \times n$ und CZ die Dimensionen $n + 1 \times n + 1$ besitzt. Die Primärinputs, welche als in den Wirtschaftsraum eintretende Kohlenstoffflüsse interpretiert werden können, bestehen aus dem importierten Kohlenstoff¹¹ cw_j^{IMP} , dem aus der Umwelt im Inland z.B. durch Abbau oder Förderung entnommenen Kohlenstoff cw_j^{UMW} sowie dem aus dem Bestand der Volkswirtschaft entnommenen Kohlenstoff cw_j^{BES} . Letzterer kann dabei auch als Recyclingaktivität interpretiert werden, da Kohlenstoff, der bereits chemisch im Endprodukt gebunden war, wiederum im Produktionsprozess eingesetzt wird. Die letzte Verwendung, welche die aus dem Wirtschaftsraum austretenden Kohlenstoffflüsse umfasst, gliedert sich in den Kohlenstoff, welcher in Form von CO_2 emittiert wird $cf_i^{CO_2}$, in den Kohlenstoff, welcher in Form von CH_4 emittiert wird $cf_i^{CH_4}$, in den Kohlenstoff, welcher exportiert wird cf_i^{EXP} und letztlich in den Kohlenstoff, welcher im Bestand verbleibt cf_i^{BES} , d.h. in Endprodukten gebunden ist und bis zu einem möglichen Recycling nicht für Produktionszwecke zur Verfügung steht. Dabei werden alle der in Tabelle 4.2 dargestellten Flüsse in Tonnen Kohlenstoff pro Jahr angegeben.

Da eine individuelle Anpassung aller $n+1 \times n+1$ für das Basisjahr gegebenen Kohlenstoffflüsse $cz_{i,j}$ unter Berücksichtigung der spezifischen sektoralen Eigenschaften zu aufwendig und damit nicht zielführend erscheint, werden die Sektoren zunächst in die folgenden vier homogenen Klassen eingeteilt:

¹¹Unter importiertem Kohlenstoff werden in dieser Arbeit keine importierten Emissionen im dem Sinne verstanden, dass ein Import Produktionsvorgänge und damit Emissionen im Ausland auslöst (*embodied emissions*, vgl. Abschnitt 3.2.2), sondern tatsächliche Kohlenstoffflüsse, die die Landesgrenzen übertreten, z.B. importiertes Erdöl.

Tabelle 4.2: Schematische Darstellung der verwendeten Kohlenstoff-IO-Tabelle

		Produktionsbereiche			Letzte Verwendung				Gesamte Verwend.		
		1	...	j	...	$n+1$					
Produktionsbereiche	1	$cz_{1,1}$...	$cz_{1,j}$...	$cz_{1,n+1}$	$cf_1^{CO_2}$	$cf_1^{CH_4}$	cf_1^{EXP}	cf_1^{BES}	cx_1
	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	i	$cz_{i,1}$...	$cz_{i,j}$...	$cz_{i,n+1}$	$cf_i^{CO_2}$	$cf_i^{CH_4}$	cf_i^{EXP}	cf_i^{BES}	cx_i
	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$n+1$	$cz_{n+1,1}$...	$cz_{n+1,j}$...	$cz_{n+1,n+1}$	$cf_{n+1}^{CO_2}$	$cf_{n+1}^{CH_4}$	cf_{n+1}^{EXP}	cf_{n+1}^{BES}	cx_{n+1}
Primärinputs		$cw_{1,1}^{IMP}$	...	cw_j^{IMP}	...	cw_{n+1}^{IMP}	Gesamtes Aufkommen			
		$cw_{1,1}^{UMW}$	...	cw_j^{UMW}	...	cw_{n+1}^{UMW}	entspricht			
		$cw_{1,1}^{BES}$	...	cw_j^{BES}	...	cw_{n+1}^{BES}	gesamter Verwendung			
Gesamtes Aufkommen	cx_1	...	cx_j	...	cx_{n+1}						

- (a) Sektoren, welche (meist fossile) Energieträger bereitstellen $i^{ET} \subset i$ (z.B. Kohlebergbau oder Mineralölverarbeitung),
- (b) Sektoren, welche vornehmlich energieintensive Halbzeuge herstellen $i^{HZ} \subset i$ (z.B. Stahl oder Zement),
- (c) Sektoren, welche vornehmlich Endprodukte unter Verwendung dieser Halbzeuge herstellen $i^{EP} \subset i$ (z.B. Automobile oder Maschinen) und
- (d) Dienstleistungen oder Sektoren, welche den ersten drei Klassen nicht direkt zuordenbar sind $i^{DL} \subset i$ (z.B. Kreditinstitute oder Erziehung). Die letzte Sektorklasse beinhaltet ebenfalls die Haushalte.

Diese Klassifizierung repräsentiert vereinfacht eine Wertschöpfungskette, die den folgenden Annahmen unterliegt. Die rohstoffnahen Industrien i^{HZ} setzen einen großen Teil der Energieträger i^{ET} zur Bereitstellung der für die Prozesse notwendigen Energie ein, verarbeiten diese Energieträger aber auch teilweise stofflich in den Halbzeugen (Bsp.: Kunststoffe). Die Halbzeuge i^{HZ} werden wiederum in den Endprodukten i^{EP} verbaut, wodurch der Kohlenstoffgehalt dieser Endprodukte bestimmt wird. Während alle Sektoren i bzw. $i^{ET} \cup i^{HZ} \cup i^{EP} \cup i^{DL}$ dadurch gekennzeichnet sind, dass sie Energieträger i^{ET} einsetzen, verwenden alle Sektoren weiterhin Endprodukte anderer Sektoren (Vorleistungen oder Kapitalgüter), welche u.a. zur Aufrechterhaltung der Produktion benötigt werden. Letztere erhöhen dabei den Bestand an Kohlenstoff in den einzelnen Sektoren und der privaten Haushalte. Abbildung 4.2 zeigt die im Rahmen des IO-Teilmodells angenommenen anthropogenen Kohlenstoffflüsse zwischen den Sektoren. Es wird deutlich, dass der Kohlenstoff entweder über Umweltentnahmen cw^{UMW} , welche allein durch Energieträger bereitstellende Sektoren i^{ET} vorgenommen werden¹² oder über Importe cw^{IMP} in den Wirtschaftsraum eingetragen wird. Der Austrag aus dem System erfolgt über Exporte cf^{EXP} , Emissionen ($cf^{CO_2} + cf^{CH_4}$) sowie eine Erhöhung des Kohlenstoffbestandes ($cf^{BES} - cw^{BES}$) (vgl. Tabelle 4.2). Weitere bedeutende Kohlenstoffflüsse finden zwischen den Sektoren statt und beeinflussen damit entweder den Kohlenstoffgehalt des in der Wertschöpfungskette nachgelagerten Produktes oder den Kohlenstoffbestand des nachgelagerten

¹²Neben dem Einsatz von Energieträgern zur Energiebereitstellung ist im Zementsektor auch das Brennen von Calciumcarbonat ($CaCO_3$), welches in Form von Kalkstein, Kreide und Mergel abgebaut wird und eine wesentliche Quelle für CO_2 -Emissionen [159] darstellt, relevant. Deshalb wird dieser Eintrag an Kohlenstoff in den Wirtschaftsraum analog zu den Energieträgern i^{ET} behandelt.

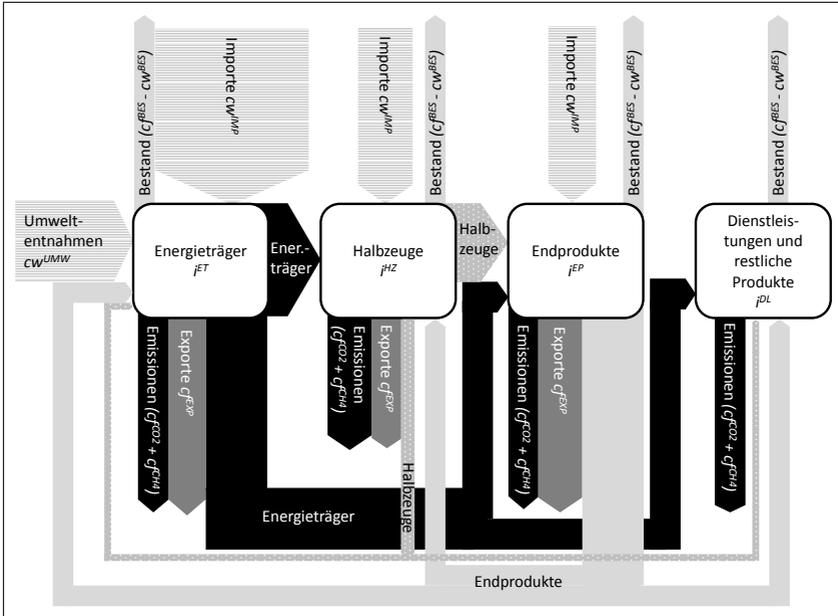


Abbildung 4.2.: Klassifizierung der Sektoren und mögliche anthropogene Kohlenstoffflüsse zwischen diesen

Sektors. Bezüglich der Sektoren i^{DL} , welche hauptsächlich Dienstleistungen umfassen, wird angenommen, dass diese keinen Kohlenstoff binden, aber dennoch den Bestand an Kohlenstoff durch den Einkauf entsprechender Vorleistungen oder von Kapitalgütern beeinflussen. Die tatsächliche Höhe der einzelnen Flüsse wird für den Wirtschaftsraum Deutschland in Kapitel 7, welches die Anwendung des Modellsystems beschreibt, beziffert. Tabelle A.3 im Anhang A.2 gibt weiterhin die auf die Sektoren der deutschen IO-Tabelle angewendete Klassifizierung wieder.

Ein Überblick über die dynamisch ausgestaltete umweltökonomische Erweiterung und jährliche Aktualisierung der KIO-Tabelle ist in Abbildung 4.3 zu finden. Die darin dargestellten Berechnungen und Rückkopplungen zur monetären bzw. physischen IO-Tabelle werden im Folgenden detailliert beschrieben.

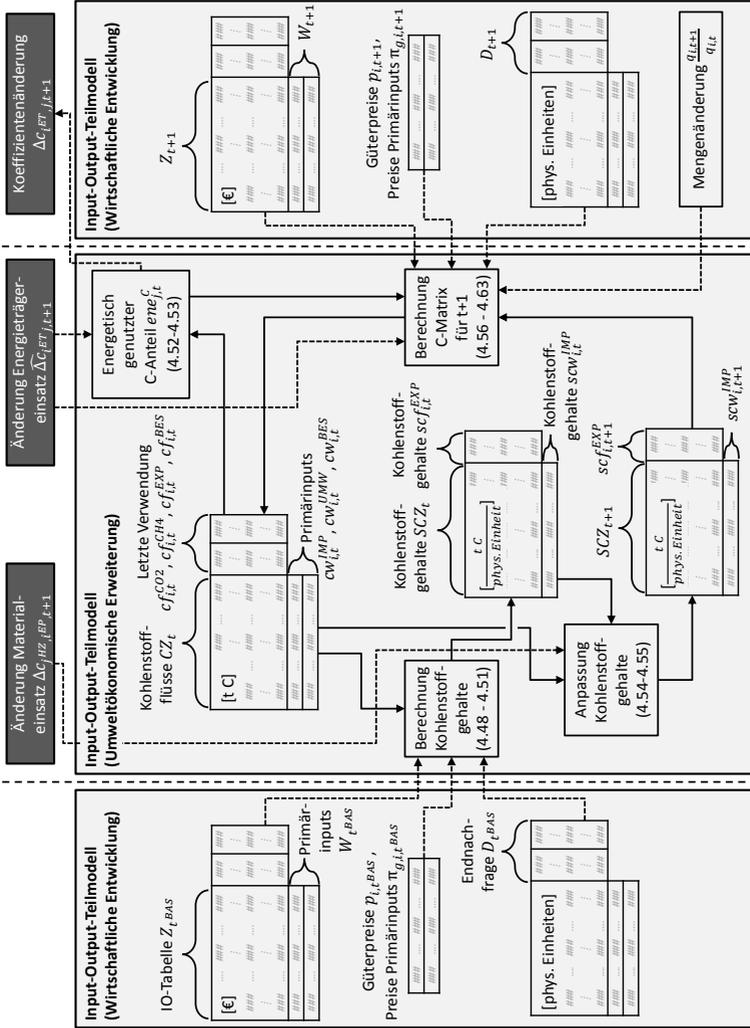


Abbildung 4.3.: Überblick über die Struktur der umweltökonomischen Erweiterung sowie der Wechselwirkungen mit den wirtschaftlichen Entwicklungen (In Klammern sind die für die Berechnungen relevanten Gleichungen angegeben)

Zunächst werden aus der für das Basisjahr t^{BAS} gegebenen KIO-Tabelle (vgl. Abschnitt 6.1) die spezifischen Kohlenstoffgehalte der einzelnen Einträge ermittelt. Hierzu werden die absoluten Kohlenstoffflüsse zu der physischen IO-Tabelle (vgl. Abschnitt 4.2.1) in Beziehung gesetzt, was, wie in den Gleichungen 4.48 bis 4.51 dargestellt, für die Vorleistungen $SCZ_{i,j,t^{BAS}}$, die Exporte $scf_{i,t^{BAS}}^{EXP}$ und die Importe $scw_{j,t^{BAS}}^{IMP}$ geschieht. Gleichung 4.49 berücksichtigt die privaten Haushalte, welche ebenfalls der Matrix CZ_t zugeordnet werden (vgl. oben).¹³

$$SCZ_{i,j \neq n+1,t^{BAS}} = \frac{Cz_{i,j \neq n+1,t^{BAS}}}{\frac{z_{i,j \neq n+1,t^{BAS}}}{p_{i,t^{BAS}}}} \quad (4.48)$$

$$SCZ_{i,n+1,t^{BAS}} = \frac{Cz_{i,n+1,t^{BAS}}}{d_{i,pri,t^{BAS}}} \quad (4.49)$$

$$scf_{i,t^{BAS}}^{EXP} = \frac{cf_{i,t^{BAS}}^{EXP}}{d_{i,exp,t^{BAS}}} \quad (4.50)$$

$$scw_{j,t^{BAS}}^{IMP} = \frac{cw_{j,t^{BAS}}^{IMP}}{\frac{w_{imp,j,t^{BAS}}}{\pi_{imp,j,t^{BAS}}}} \quad (4.51)$$

Mit diesen Gleichungen geht die implizite Annahme einher, dass, im Vergleich zum monetären IO-Modell, in dem die einzelnen Produkte (Güterbündel), unabhängig davon in welchem Sektor sie eingesetzt werden, denselben Preis besitzen, die spezifische Kohlenstoffmatrix SCZ_t zwischen verschiedenen Kohlenstoffgehalten der gleichen Güterbündel unterscheidet, da sich die Werte in SCZ_t innerhalb der Zeilen unterscheiden.

Um die Matrix CZ_t jährlich fortzuschreiben, müssen die Koeffizientenänderungen $\Delta c_{i,j,t+1}$, die in Gleichung 4.15 auf die physische Direktbedarfsmatrix C_t angewendet werden, zunächst abhängig von den betroffenen Sektoren i, j interpretiert werden. Wird bspw. der Input an Energieträgern

¹³Daneben werden weiterhin spezifische Kohlenstoffgehalte für die Vorratsveränderungen $h = vor$ im Basisjahr t^{BAS} berechnet, die jedoch für die Simulation nur von untergeordneter Bedeutung sind, da vereinfachend angenommen wird, dass in zukünftigen Perioden nicht auf Vorrat produziert wird.

i^{ET} eines Sektors j geändert, so wird der zugehörige Wert als Änderung der Energieeffizienz $\widehat{\Delta c_{i^{ET},j,t+1}}$ des eingesetzten Ofens oder Prozesses interpretiert, wobei angenommen wird, dass der Anteil der Energieträger, welche stofflich genutzt werden und daher chemisch im Produkt gebunden sind, unverändert bleibt. Somit bleibt, während die Energieeffizienz angepasst wird, die Materialeffizienz gleich, da bspw. mit weniger Erdöl, welches direkter Bestandteil des Kunststoffes wird, in der Regel auch proportional dazu weniger Kunststoff hergestellt werden kann. Bleibt daneben ebenfalls die Energieeffizienz unverändert auf dem gleichen Niveau, wird $\widehat{\Delta c_{i^{ET},j,t+1}}$ gleich Eins gesetzt. Um die Unterscheidung zwischen Energie- und Materialeffizienz zu realisieren, wird mittels Gleichung 4.52 der energetisch genutzte und damit emittierte Anteil des Kohlenstoffs $ene_{j,t}^C$ berechnet, indem die im Sektor j entstehenden CO_2 -Emissionen $cf_{j,t}^{CO_2}$ auf den gesamten Input an Kohlenstoff der Energieträger in diesen Sektor bezogen werden. Nun kann die Änderung des gesamten Energieträgereinsatzes zur energetischen und stofflichen Nutzung $\Delta c_{i^{ET},j,t+1}$ Gleichung 4.53 folgend angepasst werden. Letztere sieht nur für den energetisch genutzten Anteil des Kohlenstoffs $ene_{j,t}^C$ eine Anpassung vor. Der so angepasste Wert $\Delta c_{i^{ET},j,t+1}$ wird auch in Gleichung 4.15 zur Fortschreibung der physischen Direktbedarfsmatrix verwendet.

$$ene_{j,t}^C = \frac{cf_{j,t}^{CO_2}}{\sum_{i^{ET}} CZ_{i^{ET},j,t}} \quad (4.52)$$

$$\Delta c_{i^{ET},j,t+1} = 1 - (1 - \widehat{\Delta c_{i^{ET},j,t+1}}) \cdot ene_{j,t}^C \quad (4.53)$$

Wird der Input an Halbzeugen $\Delta c_{j^{HZ},i^{EP},t+1}$ eines Sektors i^{EP} , welcher verkaufsfertige Endprodukte herstellt, angepasst, kann dies als Änderung der Materialeffizienz interpretiert werden. Somit ändert sich ebenfalls der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt der Endprodukte i^{EP} , weshalb die spezifische Kohlenstoffmatrix SCZ_{t+1} sowie die Kohlenstoffgehalte der Exporte $scf_{i^{EP},t+1}^{EX P}$, wie in den Gleichungen 4.54 und 4.55 dargestellt, angepasst werden. Dabei wird die Änderung des gesamten Kohlenstoff-Inputs aus Halbzeugen relativ zum Vorjahr berechnet, wobei für die Importe $cw_{i^{EP},t}^{IMP}$, welche ebenfalls einen Teil des Aufkommens der Endprodukte

i^{EP} repräsentieren, keine Änderungen hinsichtlich des Kohlenstoffgehalts angenommen werden.

$$SCZ_{i^{EP},j,t+1} = \frac{\sum_{j^{HZ}} \Delta c_{j^{HZ},i^{EP},t+1} \cdot CZ_{j^{HZ},i^{EP},t} + cw_{i^{EP},t}^{IMP}}{\sum_{j^{HZ}} CZ_{j^{HZ},i^{EP},t} + cw_{i^{EP},t}^{IMP}} \quad (4.54)$$

$$\cdot SCZ_{i^{EP},j,t}$$

$$scf_{i^{EP},t+1}^{EXP} = \frac{\sum_{j^{HZ}} \Delta c_{j^{HZ},i^{EP},t+1} \cdot CZ_{j^{HZ},i^{EP},t} + cw_{i^{EP},t}^{IMP}}{\sum_{j^{HZ}} CZ_{j^{HZ},i^{EP},t} + cw_{i^{EP},t}^{IMP}} \quad (4.55)$$

$$\cdot scf_{i^{EP},t}^{EXP}$$

Mit der aktualisierten spezifischen Kohlenstoffmatrix SCZ_{t+1} sowie den aktualisierten Kohlenstoffgehalten der Exporte $scf_{i,t+1}^{EXP}$ lassen sich die neue Kohlenstoffmatrix CZ_{t+1} sowie der exportierte Kohlenstoff $cf_{i,t+1}^{EXP}$ gemäß den Gleichungen 4.56 bis 4.58 für das Jahr $t + 1$ ermitteln. Zudem wird mittels Gleichung 4.59 der importierte Kohlenstoff $cw_{j,t+1}^{IMP}$ berechnet, wobei $scw_{j,t+1}^{IMP} = scw_{j,t}^{IMP}$ gesetzt und damit als konstant angenommen wird. Die Gleichungen 4.56 bis 4.59 wurden dabei jeweils aus den Gleichungen 4.48 bis 4.51 abgeleitet und zeigen, dass die KIO-Tabelle direkt von der physischen IO-Tabelle (Abschnitt 4.2.1) und den dort vorgenommenen Anpassungen abhängt.

$$CZ_{i,j \neq n+1,t+1} = SCZ_{i,j \neq n+1,t+1} \cdot \frac{z_{i,j \neq n+1,t+1}}{p_{i,t+1}} \quad (4.56)$$

$$CZ_{i,n+1,t+1} = SCZ_{i,n+1,t+1} \cdot d_{i,pr,i,t+1} \quad (4.57)$$

$$cf_{i,t+1}^{EXP} = scf_{i,t+1}^{EXP} \cdot d_{i,exp,t+1} \quad (4.58)$$

$$cw_{j,t+1}^{IMP} = scw_{j,t+1}^{IMP} \cdot \frac{w_{imp,j,t+1}}{\pi_{imp,j,t+1}} \quad (4.59)$$

Bezüglich der in Tonnen Kohlenstoff angegebenen Umweltentnahmen $cw_{i,t+1}^{UMW}$ und CH_4 -Emissionen $cf_{i,t+1}^{CH_4}$ werden, dem Linkage-Ansatz (Gleichung 4.10) folgend, die relativen Änderungen der herzustellenden physi-

schen Mengen \vec{q}_t auf die jeweiligen Größen übertragen, was Gleichungen 4.60 sowie 4.61 entnommen werden kann.

$$cw_{i,t+1}^{UMW} = cw_{i,t}^{UMW} \cdot \frac{q_{i,t+1}}{q_{i,t}} \quad (4.60)$$

$$cf_{i,t+1}^{CH4} = cf_{i,t}^{CH4} \cdot \frac{q_{i,t+1}}{q_{i,t}} \quad (4.61)$$

Bezüglich der ebenfalls in Tonnen Kohlenstoff notierenden CO₂-Emissionen $cf_{i,t+1}^{CO2}$ werden hingegen neben den Änderungen der herzustellenden physischen Mengen auch die Änderungen der Energieeffizienz $\widehat{\Delta}C_{j^{ET},i,t+1}$ berücksichtigt, was die Simulation der Auswirkungen von zukünftigen Effizienzsteigerungen ermöglicht. In Gleichung 4.62 werden hierzu die auf einzelne Energieträger j^{ET} bezogenen Änderungen mit dem Anteil des durch diese Energieträger in den Sektor i eingebrachten Kohlenstoffs gewichtet.

$$cf_{i \neq n+1, t+1}^{CO2} = cf_{i \neq n+1, t}^{CO2} \cdot \frac{q_{i \neq n+1, t+1}}{q_{i \neq n+1, t}} \cdot \frac{\sum_{j^{ET}} \widehat{\Delta}C_{j^{ET}, i \neq n+1, t+1} \cdot cz_{j^{ET}, i \neq n+1, t+1}}{\sum_{j^{ET}} cz_{j^{ET}, i \neq n+1, t+1}} \quad (4.62)$$

$$cf_{n+1, t+1}^{CO2} = \sum_{j^{ET}} cz_{j^{ET}, n+1, t+1} \cdot ene_{n+1, t}^C \quad (4.63)$$

Die Berechnung des durch die Haushalte emittierten Kohlendioxids erfolgt gemäß Gleichung 4.63. Eine Änderung der CO₂-Emissionen, induziert durch die von den Haushalten nachgefragten physischen Mengen, muss im Vergleich zu den Produktionsbereichen dabei nicht separat berechnet werden, da die bezogenen Mengen bereits für den Endnachfragebereich $h = pri$ der IO-Tabelle mittels des LES (vgl. Gleichung 4.23) abhängig von Preisen, Einkommen und einer exogen gegebenen Effizienzsteigerung $\Delta eff_{i,t}^H$ berechnet werden. Somit ist lediglich der Anteil des energetisch genutzten Kohlenstoffs $ene_{n+1, t}^C$ in Gleichung 4.63 zu berücksichtigen.

Die restlichen in Tonnen CO₂-Äquivalente angegebenen Treibhausgase $e_{j,b \notin \{ch4,co2\},t}$ pro Sektor j , welche keinen Kohlenstoff enthalten und damit nicht Bestandteil der KIO-Tabelle sind, werden wiederum gemäß dem Linkage-Ansatz abhängig von der Änderung der herzustellenden Menge berechnet (Gleichung 4.64). Der Index $b \in \{co2, ch4, n2o, pfc, hfc, sf6\}$ umfasst dabei sämtliche im Kyoto-Protokoll berücksichtigten Treibhausgase CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC und SF₆ (vgl. Abschnitt 2.1). Die bereits in Tonnen Kohlenstoff angegebenen CO₂- und CH₄-Emissionen $cf_{i,t+1}^{CO2}$ und $cf_{i,t+1}^{CH4}$ werden zur Vergleichbarkeit gemäß Gleichungen 4.65 und 4.66 ebenfalls in Tonnen CO₂-Äquivalente umgerechnet, wozu der Kohlenstoffgehalt cge_b^{THG} der Treibhausgase b sowie die Treibhauswirksamkeit trw_b (vgl. Tabelle 2.1 in Abschnitt 2.1) berücksichtigt werden.

$$e_{i,b \notin \{co2,ch4\},t+1} = e_{i,b \notin \{co2,ch4\},t} \cdot \frac{q_{i,t+1}}{q_{i,t}} \quad (4.64)$$

$$e_{i,co2,t+1} = \frac{cf_{i,t+1}^{CO2}}{cge_{co2}^{THG}} \quad (4.65)$$

$$e_{i,ch4,t+1} = \frac{cf_{i,t+1}^{CH4}}{cge_{ch4}^{THG}} \cdot trw_{ch4} \quad (4.66)$$

Die Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte, welche nicht wie CO₂ direkt vom Kohlenstoff-Input abhängen, werden hingegen als konstant angenommen, wobei diese Treibhausgase im privaten Konsum ohnehin vernachlässigbar sind (< 1% bezogen auf die Treibhauswirksamkeit, vgl. bspw. [67]).

Die für das Jahr $t+1$ berechnete Kohlenstoff-IO-Tabelle kann nicht analog zum monetären Fall über das Mengen- und Preismodell zum Ausgleich gebracht werden, da die KIO-Tabelle in rein physischen Einheiten notiert und somit eine Aufspaltung in physische Flüsse und Preise nicht möglich ist. Stattdessen wird eine alternative Vorgehensweise genutzt. Bisher wurden alle Größen der Kohlenstoff-IO-Tabelle basierend auf der physischen IO-Tabelle (Abschnitt 4.2.1) fortgeschrieben, mit Ausnahme der jährlichen Kohlenstoff-Bestandszu- $cf_{i,t+1}^{BES}$ und -abnahmen $cw_{i,t+1}^{BES}$, welche somit als zu bestimmende Größen verbleiben. Zunächst wird daher die Differenz

$dif_{i,t+1}$ des Aufkommens und der Verwendung von Kohlenstoff für jeden Sektor i nach Gleichung 4.67 bestimmt und die jeweilige Spaltensumme von der Zeilensumme abgezogen.

$$\begin{aligned}
 dif_{i,t+1} = & \sum_j cz_{i,j,t+1} + cf_{i,t+1}^{CO_2} + cf_{i,t+1}^{CH_4} + cf_{i,t+1}^{EXP} \\
 & - \sum_j cz_{j,i,t+1} - cw_{i,t+1}^{IMP} - cw_{i,t+1}^{UMW}
 \end{aligned} \tag{4.67}$$

Diese Differenzen können folgendermaßen interpretiert werden. Ist das durch Vorleistungen, Importe und Umweltentnahmen induzierte Aufkommen an Kohlenstoff größer als die durch Lieferungen, CO₂-Emissionen, CH₄-Emissionen und Exporte induzierte Verwendung, liegt eine Zunahme des in der Volkswirtschaft verbleibenden Bestandes $cf_{i,t+1}^{BES}$ an Kohlenstoff im Sektor i dar. Dieser Bestand repräsentiert bspw. durch vorgelagerte Sektoren gelieferte Endprodukte in deren Nutzungsphase (u.a. zur Aufrechterhaltung der Produktion) oder die Entsorgung von Produkten nach ihrer Gebrauchsphase, wobei diese Positionen in der Regel nicht über eine rein monetäre IO-Tabelle erfasst werden.¹⁴ Liegt umgekehrt die Verwendung des Kohlenstoffs über dessen Aufkommen, kann dies als Entnahme aus dem vorhandenen Bestand und damit als Recyclingaktivität interpretiert werden. Gleichung 4.68 veranschaulicht diesen Zusammenhang mathematisch.

$$\begin{aligned}
 cf_{i,t+1}^{BES} = 0, \quad cw_{i,t+1}^{BES} = dif_{i,t+1}, \quad & \text{falls } dif_{i,t+1} > 0 \\
 cf_{i,t+1}^{BES} = 0, \quad cf_{i,t+1}^{BES} = -dif_{i,t+1}, \quad & \text{falls } dif_{i,t+1} < 0
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

¹⁴Es existieren in der deutschen IO-Tabelle zwar ein Sektor *Abwasser-, Abfallbehandlungs- und sonstige Entsorgungsleistungen* und ein Sektor *Herstellung von Sekundärrohstoffen*, jedoch repräsentieren deren technische Koeffizienten nur sehr bedingt die Menge entsorgter Gegenstände oder den Input an Sekundärrohstoffen, was u.a. daran liegt, dass der monetäre Gegenwert der betroffenen Produkte bei deren Entsorgung oder deren Recycling deutlich geringer als bei deren Produktion ist. Zudem existiert nach der IO-Logik nicht die Möglichkeit nachgefragte (letzte Verwendung) und nach deren Nutzung ggf. zu recycelnde Produkte im Sinne eines Zyklus wieder als Vorleistungen einzusetzen.

Mit dem Aufstellen der nun hinsichtlich Aufkommen und Verwendung konsistenten KIO-Tabelle für $t + 1$ endet ein Simulationsdurchlauf, so dass analog zur monetären IO-Tabelle (Abschnitt 4.2.1) t um Eins erhöht wird und die Aktualisierungen für das Folgejahr, beginnend bei den Gleichungen 4.52 und 4.53, vorgenommen werden.

Die in diesem Abschnitt erläuterte umfassende Berücksichtigung sämtlicher Kohlenstoffflüsse in einer IO-Tabelle geht deutlich über den oft verwendeten Linkage-Ansatz hinaus, erlaubt die Simulation von Auswirkungen zukünftiger Material- oder Energieeffizienzsteigerungen sowie von jährlichen Änderungen des Kohlenstoffbestandes und ermöglicht so, wie im folgenden Abschnitt dargestellt, weiterführende Analysen.

4.2.3. Analysen auf Basis des erweiterten Input-Output-Modells

Viele im Rahmen einer Bewertung klimapolitischer Instrumente zu untersuchende Größen können direkt aus den bereits vorgestellten Variablen des Input-Output-Teilmodells entnommen werden. So geben bspw. die Vektoren \vec{p}_t die Preisentwicklung einzelner Güter und \vec{q}_t die pro Sektor nachgefragte Menge in jährlicher Auflösung an. Daneben lassen sich weitere Zeitreihen analysieren, die die Entwicklung

- der Bruttowertschöpfung $\sum_{j=1}^n \sum_{g \in \{ae, sop, abs, nbu\}} w_{g,j,t}$,
- der Ausgaben für Gütersteuern $\sum_{j=1}^n w_{gst,j,t}$,
- der Ausgaben für Emissionsberechtigungen $\sum_{j=1}^n w_{zer,j,t}$,
- der Konsumausgaben $\sum_{i=1}^n f_{i,pri,t}$,
- der Treibhausgasemissionen $\sum_{i=1}^{n+1} e_{i,b,t}$,
- des Energieträgereinsatzes $\sum_{j=1}^{n+1} ent_{i^{ET},j,t}$,
- der Umweltentnahmen (Kohlenstoff) $\sum_{j=1}^n cw_{j,t}^{UMW}$,
- der Bestandsänderungen (Kohlenstoff) $\sum_{i=1}^n cf_{i,t}^{BES} - \sum_{j=1}^n cw_{j,t}^{BES}$
- sowie weiterer Größen wiedergeben.

Darüber hinaus wird zur Bestimmung der mittleren Preisänderungen der Preisindex nach Laspeyres p_t^{Las} herangezogen, welcher sich nach Gleichung 4.69 berechnet. Der Laspeyres-Index bezieht den aktuellen Preis eines Warenkorbs aus dem Basisjahr auf den im Basisjahr gegebenen Preis dieses Warenkorbs. In Gleichung 4.69 ist der Warenkorb dabei durch die im Jahr t^{BAS} hergestellten Mengen \bar{q}_t^{BAS} definiert.

$$p_t^{Las} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{i,t} \cdot q_{i,t^{BAS}}}{\sum_{i=1}^n p_{i,t^{BAS}} \cdot q_{i,t^{BAS}}} \quad (4.69)$$

Neben der Entwicklung der aggregierten Werte und der Abschätzung der direkten sektoralen Effekte, werden weiterhin, der Input-Output-Logik folgend, die indirekten Effekte, welche durch die Nachfrage nach Vorprodukten entstehen, auf die einzelnen Sektoren unter Nutzung der Leontief-Inverse beziffert (vgl. hierzu auch die Gleichungen 4.9, 4.11, 4.43 und 4.44). So zeigt Gleichung 4.70 die Berechnung der pro physischer Einheit eines Sektors j direkt und durch die Verknüpfungen über die Vorleistungen dieses Sektors indirekt in anderen Sektoren induzierten monetären Primärintputs $w_{g,j,t}^{ind} \in W_t^{ind}$.¹⁵ Gleichung 4.71 gibt darüber hinaus die in Mio. € notierenden absoluten Primärintputs $w_{g,j,t}^{LeV}$, welche direkt und indirekt durch die Endnachfrage (letzte Verwendung) nach einzelnen Gütern induziert werden, wieder. Dabei gilt $w_{g,j,t}^{LeV} \neq w_{g,j,t}$, da $w_{g,j,t}$ die direkt in den Sektor j eingebrachten Primärintputs angibt (vgl. auch *production-based Accounting* und *consumption-based Accounting* in Abschnitt 3.2.2).

$$W_t^{ind} = (U_t \circ \Pi_t) \cdot (I - C_t)^{-1} \quad (4.70)$$

$$w_{g,j,t}^{LeV} = w_{g,j,t}^{ind} \cdot \sum_{h=1}^m d_{j,h,t} \quad (4.71)$$

Die Berechnung der direkt und indirekt pro physischer Einheit eines Sektors i emittierten Treibhausgase erfolgt analog mittels Gleichung 4.72, wobei hierzu zunächst die Emissionsfaktoren $ef_{i,b,t}$, welche in Tonnen CO₂-Äquivalente pro physischer Einheit angegeben werden, zu bestimmen sind.

¹⁵Durch das Hadamard-Produkt \circ wird eine elementweise Multiplikation zweier Matrizen realisiert.

Die unterschiedlichen Schreibweisen der Gleichungen 4.70 und 4.72 resultieren daraus, dass in $U_t \circ \Pi_t$ die Sektoren zeilenweise und in $\vec{e}f_{b,t}$ spaltenweise enthalten sind. $\sum_b e f_{i,b,t}^{ind}$ kann auch als der durch das Herstellen einer physischen Einheit von i im Jahr t erzeugte *Carbon Footprint* interpretiert werden, da durch die Leontief-Inverse die gesamte Wertschöpfungskette eines Produktes in die Analyse mit einbezogen wird. $e_{i,b,t}^{LeV}$ steht, ebenfalls analog zu $w_{g,j,t}^{LeV}$, für die in Tonnen CO₂-Äquivalente notierenden absoluten Treibhausgasemissionen, welche direkt und indirekt durch die Endnachfrage (letzte Verwendung) nach einzelnen Gütern induziert werden (vgl. Gleichung 4.73).

$$\vec{e}f_{b,t}^{ind} = (I - C_t^T)^{-1} \cdot \vec{e}f_{b,t} \quad \text{mit} \quad e f_{i,b,t} = \frac{e_{i,b,t}}{q_{i,t}} \quad (4.72)$$

$$e_{i,b,t}^{LeV} = e f_{i,b,t}^{ind} \cdot \sum_{h=1}^m d_{i,h,t} \quad (4.73)$$

Dieselben mittels der Gleichungen 4.70 bis 4.73 vorgenommenen Analysen können auch auf weitere Bereiche der Primärinputs oder letzten Verwendung übertragen werden. So werden bspw. die direkt und indirekt induzierten relativen und absoluten Effekte bezüglich

- des importierten Kohlenstoffs $c w_{i,t}^{IMP,ind}$ bzw. $c w_{i,t}^{IMP,LeV}$,
- der Umweltentnahmen $c w_{i,t}^{UMW,ind}$ bzw. $c w_{i,t}^{UMW,LeV}$ oder
- der Bestandsänderungen $c f_{i,t}^{BES,ind} - c w_{i,t}^{BES,ind}$ bzw. $c f_{i,t}^{BES,LeV} - c w_{i,t}^{BES,LeV}$ berechnet.

Dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Input-Output-Teilmodell liegt zwar kein multiregionaler Ansatz zugrunde, da das Modell auf einer nationalen IO-Tabelle basiert. Dennoch wird an dieser Stelle eine grobe Abschätzung der durch die inländische Nachfrage (inkl. Exporte) im Ausland induzierten Umweltauswirkungen (z.B. Treibhausgasemissionen, Umweltentnahmen) vorgenommen, um bspw. auch den *Carbon Footprint* vollständig zu erfassen. Hierzu wird in Gleichung 4.74 eine neue physische Direktbedarfsmatrix C_t^{Welt} aus der inländischen Direktbedarfsmatrix C_t

abgeleitet, indem angenommen wird, dass der Anteil importierter Güter $u_{imp,j,t}$ eines Sektors j nun ebenfalls im Inland hergestellt wird und die technischen Koeffizienten $c_{i,j,t}$ entsprechend dieses Anteils erhöht. Dies ist gleichbedeutend mit der vereinfachenden Annahme, dass die Produkte im Ausland mit derselben Produktionstechnologie wie im Inland hergestellt werden (vgl. *domestic technology assumption*, Abschnitt 3.2.2). Mittels dem Mengenmodell 4.75 ergeben sich folglich die im In- und Ausland herzustellenden Mengen \vec{q}_t^{Welt} zur Befriedigung der Endnachfrage.

$$c_{i,j,t}^{Welt} = c_{i,j,t} \cdot \left(1 + \frac{u_{imp,j,t}}{1 - u_{imp,j,t}} \right) \quad (4.74)$$

$$\vec{q}_t^{Welt} = (I - C_t^{Welt})^{-1} \cdot \left(\sum_{h=1}^m \vec{d}_h \right) \quad (4.75)$$

Mit den so berechneten Mengen lassen sich die obigen nationalen Analysen unter den gegebenen Annahmen auf den internationalen Fall übertragen. Gleichung 4.76 gibt bspw. die insgesamt im In- und Ausland, bedingt durch die nationale Endnachfrage entstehenden Treibhausgasemissionen $e_{b,t}^{THG,Welt}$ an. Da von der gleichen Produktionstechnologie wie im nationalen Fall ausgegangen wird, können dieselben Emissionsfaktoren $ef_{i,b,t}$ für die Sektoren i angesetzt werden. Zusätzlich zu den Sektoren sind die Emissionen der privaten Haushalte im Inland $e_{n+1,b,t}$ zu berücksichtigen.

$$e_{b,t}^{THG,Welt} = \sum_{i=1}^n q_{i,t}^{Welt} \cdot ef_{i,b,t} + e_{n+1,b,t} \quad (4.76)$$

Ähnliche Analysen können auf internationaler Ebene auch für andere Bereiche der Primärinputs oder der letzten Verwendung durchgeführt werden. Bezüglich der Kohlenstoff-Umweltentnahmen $cw_{i,t}^{UMW,Welt}$ muss jedoch bspw. berücksichtigt werden, dass die spezifischen Umweltentnahmen pro hergestellter Menge $cw_{i,t}^{UMW,Welt}$ um den Importanteil $u_{imp,i,t}$ zu erhöhen sind, da auch die Umweltentnahmen zuvor importierter Güter im Sinne einer internationalen IO-Tabelle nun in die Betrachtung mit einbezogen werden. Dies zeigt Gleichung 4.77.

$$cw_{i,t}^{UMW,Welt} = q_{i,t}^{Welt} \cdot cw_{i,t}^{fUMW,Welt}$$

$$\text{mit } cw_{i,t}^{fUMW,Welt} = \frac{cw_{i,t}^{UMW}}{q_{i,t}} \cdot \left(1 + \frac{u_{imp,i,t}}{1 - u_{imp,i,t}} \right) \quad (4.77)$$

Aus der Annahme einer die internationalen Verflechtungen berücksichtigenden IO-Tabelle mit gleichen Produktionstechnologien folgt weiterhin, dass nichts importiert wird und die gegebenen technischen Koeffizienten und Primärinputs die Herstellung aller nachgefragten Güter repräsentieren, so dass $cw_{i,t}^{IMP,Welt} = 0$ gilt.

Neben der Analyse der direkten mit der Produktion einhergehenden Effekte lassen sich ebenfalls die indirekten Effekte, induziert durch die Nachfrage nach Vorprodukten, mittels der Leontief-Inverse auf den internationalen Fall übertragen. Gleichungen 4.78 und 4.80 zeigen dieses Vorgehen exemplarisch für die direkt und indirekt pro physischer Einheit eines Produkts i national und international emittierten Treibhausgase $e_{i,b,t}^{Welt,ind}$ sowie die Umweltentnahmen $cw_{i,t}^{UMW,Welt,ind}$ in Analogie zu Gleichung 4.72.

$$\vec{e}_{b,t}^{Welt,ind} = \left(I - (C_t^{Welt})^T \right)^{-1} \cdot \vec{e}_{b,t} \quad (4.78)$$

$$e_{i,b,t}^{Welt,LeV} = e_{i,b,t}^{Welt,ind} \cdot \sum_{h=1}^m d_{i,h,t} \quad (4.79)$$

Ebenfalls in Analogie zu Gleichung 4.73 geben Gleichungen 4.79 und 4.81 die internationalen Treibhausgasemissionen $e_{i,b,t}^{Welt,LeV}$ sowie die internationalen Umweltentnahmen $cw_{i,t}^{Umw,Welt,LeV}$ wieder, welche direkt und indirekt durch die Endnachfrage (letzte Verwendung) nach einzelnen Gütern im Inland (inkl. Exporte) induziert werden.

$$\vec{cw}_t^{UMW,Welt,ind} = \left(I - (C_t^{Welt})^T \right)^{-1} \cdot \vec{cw}_t^{UMW,Welt} \quad (4.80)$$

$$cw_{i,t}^{UMW,Welt,LeV} = cw_{i,t}^{UMW,Welt,ind} \cdot \sum_{h=1}^m d_{i,h,t} \quad (4.81)$$

Die Analysen lassen sich auch auf andere Bereiche wie die Bestandsänderungen ($c f_{i,t}^{BES, Welt, ind} - c w_{i,t}^{BES, Welt, ind}$, $c f_{i,t}^{BES, Welt, LeV} - c w_{i,t}^{BES, Welt, LeV}$) übertragen. Dabei ist zu beachten, dass die in einem Simulationsdurchlauf erhaltenen Absolutwerte zunächst auf die im Inland produzierten Mengen \vec{q}_t bezogen werden (vgl. $\vec{e} f_{b,t}$ bzw. $\vec{c} w f_t^{UMW, Welt}$), bevor diese mittels der Leontief-Inversen den einzelnen Sektoren zugerechnet werden.

Letztlich werden die in diesem Abschnitt dargestellten Analysemöglichkeiten in Kapitel 7 genutzt, um einzelne Szenarien miteinander zu vergleichen und auf diese Weise Aussagen über die zukünftige Entwicklung der emittierten Treibhausgase und wirtschaftlichen Auswirkungen, besonders im Bezug auf sich ändernde klimapolitische Rahmenbedingungen, vornehmen zu können.

4.3. Zusammenfassung und kritische Würdigung des makroökonomischen Teilmodells

Die Vorteile eines IO-Modells gegenüber vergleichbaren Ansätzen liegen in der Berücksichtigung sektoraler Verflechtungen und damit in der Möglichkeit, indirekte ökonomische sowie ökologische Effekte zu beziffern (vgl. auch Abschnitt 3.2). Die prinzipielle Eignung von IO-Modellen zur Bewertung klimapolitischer Instrumente wird jedoch durch deren statischen Ansatz, welcher zukünftige Entwicklungen wie Material- oder Energieeffizienzsteigerungen außer Acht lässt, eingeschränkt. Somit wurde das statische IO-Modell in dem vorliegenden Kapitel durch die Implementierung zusätzlicher Rückkopplungen teilendogenisiert (Abschnitt 4.2.1) und durch die zusätzliche Betrachtung der anthropogenen Kohlenstoffflüsse umweltökonomisch erweitert (Abschnitt 4.2.2).

Schwierigkeiten der gewählten Modellierung bestehen in dem Auftreten zeitlicher Inkonsistenzen in einigen Gleichungen, da dem Teilmodell ein sukzessiver Ansatz zur Berücksichtigung der innerhalb eines Simulationsdurchlaufs durch exogene Parameter angestoßenen Wechselwirkungen zugrunde liegt (vgl. bspw. Gleichungen 4.19, 4.20, 4.23 oder 4.25). Rückkopplungen werden deshalb teilweise nicht innerhalb einer Periode, sondern erst beim Übergang zur nächsten Periode wirksam, was jedoch bei der Betrachtung

makroökonomischer Effekte, welche sich häufig erst mit einem gewissen Zeitverzug einstellen, hinnehmbar erscheint. Im Gegensatz zu einem die Wechselwirkungen simultan berücksichtigenden Ansatz, bspw. durch ein Differentialgleichungssystem, lässt ein sukzessiver Ansatz darüber hinaus eine deutlich detailliertere Modellierung der verschiedenen Einflüsse sowie die Integration des im folgenden Kapitel beschriebenen aktorsbasierten Teilmodells zu.

Die Simulation von Kohlenstoffflüssen in Analogie zu einer IO-Tabelle erlaubt eine vergleichsweise detaillierte Abschätzung der Auswirkungen von Material- und Energieeffizienzanpassungen auf die CO₂-Emissionen. Jedoch werden auch in dem gewählten Ansatz die anthropogenen Kohlenstoffkreisläufe nicht vollständig abgebildet, da die einzelnen Wertschöpfungsketten durch die Klassifizierung der Sektoren nur vereinfacht wiedergegeben werden. Somit ist bspw. nicht berücksichtigt, dass ein Endprodukt Teil eines anderen Endproduktes werden kann und dessen Kohlenstoffgehalt ebenfalls beeinflusst. Weiterhin können keine Bestände an Kohlenstoff, sondern lediglich jährliche Bestandsänderungen simuliert werden. Dennoch liefert die entwickelte umweltökonomische Erweiterung in Form einer Kohlenstoff-IO-Tabelle wichtige Einsichten in den anthropogenen Kohlenstoffkreislauf und dessen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen sowie den fossilen Ressourcenverbrauch.

Letztlich stellt die Berechnung der Abschreibungen in Abhängigkeit der Energieeinsparungen mittels Gleichung 4.21 eine starke Vereinfachung dar. Diese soll jedoch für die im Fokus stehende Metallerzeugung durch die explizite Modellierung von Investitionsentscheidungen in den Anlagenbestand, abhängig von den gegebenen wirtschaftlichen und klimapolitischen Rahmenbedingungen, ersetzt werden, was im folgenden Kapitel zum aktorsbasierten Teilmodell gezeigt wird.

5. Entwicklung des technisch- betriebswirtschaftlichen Teilmodells der Metallerzeugung

Ökonomische klimapolitische Instrumente werden seitens der politischen Entscheidungsträger derart ausgestaltet, dass finanzielle Anreize zu einer Emissionsminderung generiert werden. Kosten und Nutzen von Handlungsalternativen einzelner Emittenten werden damit indirekt beeinflusst (vgl. Abschnitt 2.2.1). Dies bedeutet im Falle der Metallerzeugung, dass Investitionen in energieeffizienzsteigernde Technologien unter unterschiedlichen klimapolitischen Rahmenbedingungen auch zu unterschiedlichen wirtschaftlichen Implikationen führen, weshalb die Investitionsstrategien metall erzeugender Betriebe abhängig von der zukünftigen Klimapolitik zu bewerten sind. Hierzu wird im vorliegenden Kapitel ein akteursbasiertes Teilmodell entwickelt, das die Investitionsentscheidungen der einzelnen Akteure, die die wesentlichen deutschen Stahl und Aluminium produzierenden Werke umfassen, in den Vordergrund stellt. Dies ermöglicht gleichermaßen die Abschätzung der durch klimapolitische Instrumente induzierten Emissionsminderungen wie auch der damit einhergehenden Auswirkungen auf ökonomische Faktoren einzelner Werke, wodurch u.a. seitens der Metallindustrie wirtschaftlich nicht tragbare Klimapolitiken aufgedeckt werden können. Ein Überblick über das in den folgenden Abschnitten detailliert beschriebene akteursbasierte Teilmodell findet sich in Abbildung 5.1. Während im Abschnitt 5.1 die Modellierung der Produktionsprozesse und damit die technische Fundierung des Teilmodells aufgezeigt wird, gibt Abschnitt 5.2 die dynamische Investitionsentscheidung und damit die betriebswirtschaftliche Fundierung wieder. Das Teilmodell wird dabei

chronologisch, einem Simulationsdurchlauf folgend, vorgestellt, wobei die zeitliche Auflösung analog zum Input-Output-Teilmodell ein Jahr beträgt. Abschnitt 5.3 zeigt darüber hinaus die Schnittstellen zu letzterem auf.

5.1. Modellierung der Produktionsprozesse

Wie bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben, wird zur Modellierung der Produktionsprozesse ein um verfahrenstechnische Parameter erweiterter Input-Output-Ansatz verwendet. Die prinzipielle Funktionsweise eines Input-Output-Ansatzes wurde schon in Abschnitt 4.1 für das makroökonomische Teilmodell dargelegt und ist ohne Weiteres auf den hier vorliegenden produktionstheoretischen Ansatz übertragbar, weshalb vor allem die zahlreichen notwendigen Erweiterungen im Vordergrund dieses Abschnitts stehen. Die Charakteristika der einzelnen betrachteten Produktionsprozesse wurden in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 ebenfalls bereits erläutert und beeinflussen maßgeblich die im Folgenden aufgezeigte Modellierung.

Die Produktionstechnologie eines Werkes wird durch dessen Technologiematrix repräsentiert, deren schrittweise Erstellung in Abschnitt 5.1.1 dargelegt wird. Abschnitt 5.1.2 hingegen zeigt, wie die Implementierung energieeffizienzsteigernder Technologien Einfluss auf die Technologiematrix und damit auf die Treibhausgasemissionen der einzelnen Anlagen eines Werkes nimmt.

5.1.1. Erstellung der Technologiematrix und Modellierung werksinterner Stoff- und Energieflüsse

Unter einer Technologiematrix wird, in der Notation des makroökonomischen Teilmodells (Gleichung 4.9), die Einheitsmatrix I abzüglich der Direktbedarfsmatrix A verstanden ($I - A$). Sie gibt damit die pro einer Einheit j notwendigen Inputs i an, wobei diese ein negatives Vorzeichen besitzen. Darüber hinaus können neben dem Hauptprodukt j auch zusätzlich anfallende Kuppelprodukte mit positivem Vorzeichen in einer Technologiematrix berücksichtigt werden, was in den bisherigen Ausführungen zum

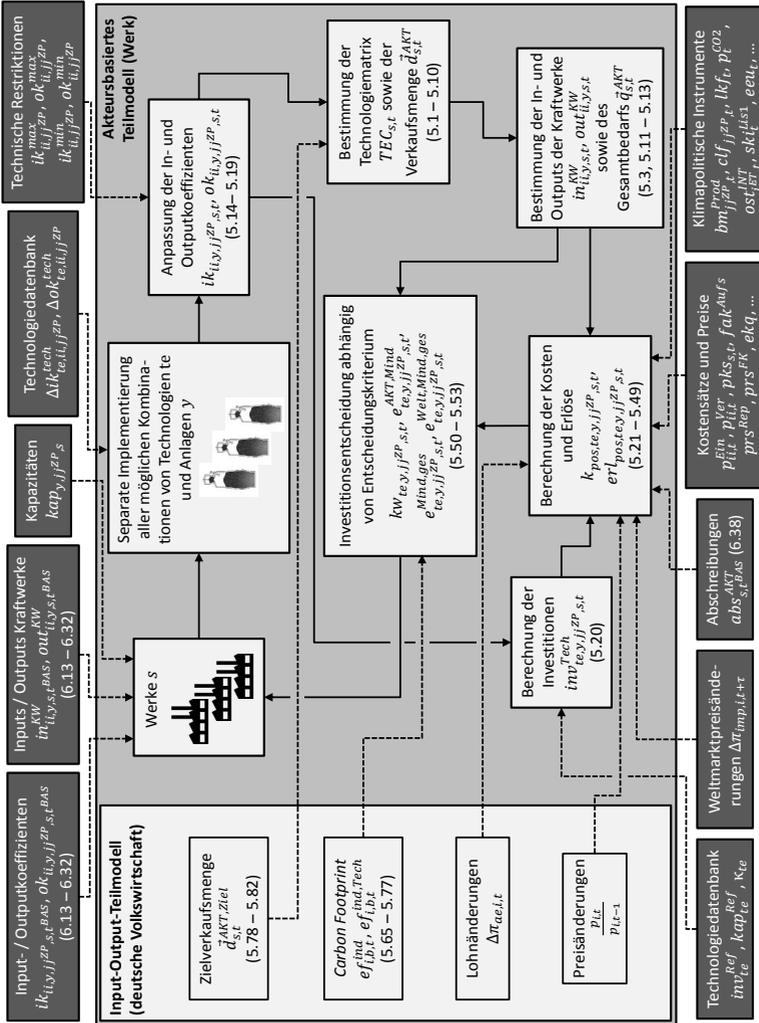


Abbildung 5.1.: Überblick über die Struktur des aktorsbasierten Teilmodells (In Klammern sind die für die Berechnungen relevanten Gleichungen angegeben)

makroökonomischen Teilmodell keine Rolle gespielt hat, da die deutsche IO-Tabelle einer funktionellen Gliederung mit einem möglichst einheitlichen Güterbündel (vgl. Abschnitt 4.1.1) unterliegt.

Die Produktionsschritte der Metallerzeugung sind hingegen durch die Entstehung einer Vielzahl von Kuppelprodukten gekennzeichnet, die teilweise veräußert oder in anderen Anlagen als Input genutzt werden können. Vor allem die Erzeugung und gleichzeitige Nutzung von Prozessgasen, Dampf (Abwärme) oder Elektrizität am gleichen Standort bestimmen die Energieeffizienz und damit letztlich die Treibhausgasemissionen eines Werkes. Um die Produktionstechnologie eines Werkes als Symbiose der einzelnen Anlagen eines Standortes zu modellieren, wird im Folgenden gemäß Gleichungen 5.1 bis 5.13 die Technologiematrix $TEC_{s,t}$ ¹ aus den Input- und Outputkoeffizienten $ik_{ii,y,jj}^{zP,s,t}$ und $ok_{ii,y,jj}^{zP,s,t}$ der Anlagen y , welche das Zwischenprodukt $jj^{zP} \subset jj$ herstellen, für jedes Werk s im Jahr t abgeleitet. Die Input- und Outputkoeffizienten werden dabei in kg oder MJ (Brennstoffe, Elektrizität) pro Tonne Zwischenprodukt angegeben.

Aufgrund des maßgeblichen Einflusses der anlagenspezifischen Koeffizienten auf die Energieeffizienz eines Werkes werden diese für das Basisjahr t^{BAS} detailliert mittels eines nichtlinearen Optimierungsmodells (NLP), welches in Abschnitt 6.2.1 beschrieben wird, bestimmt. Zur Unterscheidung der im aktorsbasierten Teilmodell betrachteten Stoff- und Energieflüsse von den im makroökonomischen Teilmodell betrachteten Gütern und Sektoren, die auch mehrere Stoffe umfassen können, werden die einzelnen Stoffe² mit ii bzw. jj bezeichnet. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass eine Anlage y genau ein Zwischenprodukt jj^{zP} produziert, während alle anderen in der Anlage entstehenden und in vor- oder nachgelagerten Prozessschritten verwendbaren Produkte als Kuppelprodukte $ii^{KP} \subset ii$ bezeichnet werden.³ So produziert bspw. die Kokerei das Zwischenprodukt Koks, der Hochofen

¹Die von vier Indizes abhängende Variable $tec_{ii,jj,s,t}$ kann dabei als Element einer zweidimensionalen Matrix $tec_{ii,jj} \in TEC$ des Werks s im Jahr t interpretiert werden.

²Im aktorsbasierten Teilmodell wird unter dem Begriff Stoff neben den festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen auch die Elektrizität subsumiert, wodurch alle auftretenden Inputs- und Outputs einer Anlage abgedeckt werden.

³Weiterhin werden auch Kuppelprodukte modelliert, die nicht in anderen Prozessschritten verwendet, aber veräußert werden können oder entsorgt werden müssen. Diese werden zur Unterscheidung mit ii^{ext} indiziert (vgl. hierzu auch die folgenden Ausführungen).

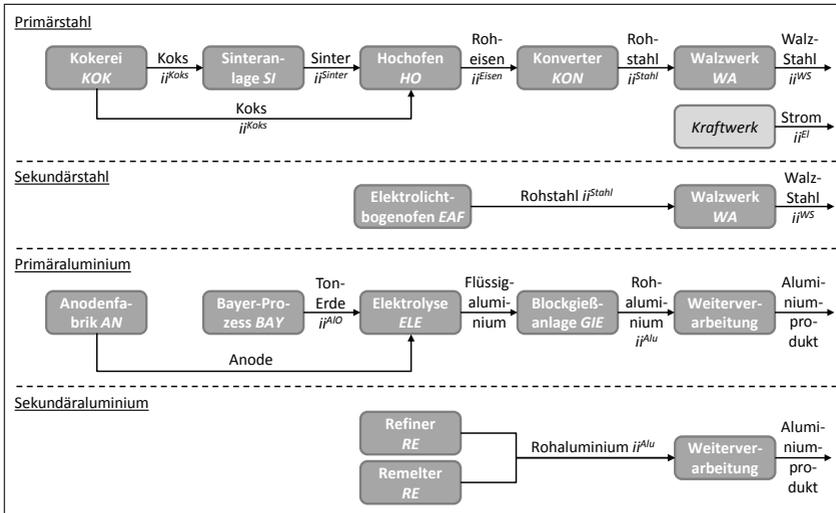


Abbildung 5.2.: Im aktorsbasierten Teilmodell betrachtete Verfahrensrouten mit den jeweiligen Zwischenprodukten ij^{ZP}

Roheisen oder die Schmelzflusselektrolyse flüssiges Aluminium. Die im aktorsbasierten Teilmodell modellierten Prozessschritte und Zwischenprodukte der vier betrachteten Verfahrensrouten können Abbildung 5.2 entnommen werden (vgl. hierzu auch die Prozessbeschreibungen in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2). Alle weiteren berücksichtigten Stoffe sind in Tabelle A.4 in Anhang A.3 aufgelistet, während die in der Modellierung verwendete Notation wie im Falle des IO-Teilmodells in den Tabellen A.1 und A.2 in Anhang A.1 zu finden ist.

Die Gleichungen 5.1 und 5.2 zur initialen Erstellung der Technologiematrix implizieren, dass mehrere Anlagen y , die das gleiche Zwischenprodukt jj^{ZP} herstellen, an einem Standort vorhanden sein können, aber nicht notwendigerweise durch dieselbe Effizienz, d.h. dieselben Input- und Outputkoeffizienten, charakterisiert sind. Somit werden die Koeffizienten der Anlagen gleichen Typs, z.B. aller Hochofen *HO* eines integrierten Hüttenwerks, mit deren jeweiligen, in Tonnen pro Jahr angegebenen Kapazität $kap_{y,jj^{ZP},s}$ gewichtet.

$$tec_{ii,jj}^{ZP,s,t} = \frac{\sum_y (ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t} - ik_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}) \cdot kap_{y,jj}^{ZP,s}}{\sum_y kap_{y,jj}^{ZP,s} \cdot 1.000},$$

falls $ii = ii^{ZP}$ oder $ii = ii^{KP}$

(5.1)

$$tec_{ii,jj,s,t} = 1, \text{ falls } ii = jj$$

$$tec_{ii,jj,s,t} = tec_{ii,jj+o,s,t} = 0, \text{ sonst}$$

Ein Problem bei der Aufstellung der Technologiematrix stellen der Ein- und Verkauf einzelner Zwischenprodukte dar. So führen bspw. Unterkapazitäten in vorgelagerten Prozessstufen zu der Notwendigkeit des Zukaufs, während Überkapazitäten genutzt werden können, zusätzliche Erlöse zu erzielen, wobei beide Fälle in der Praxis häufig anzutreffen sind. Sobald jedoch Zwischenprodukte über die Systemgrenzen eines Werkes hinweg geliefert und nicht nur im und für das Werk selbst produziert werden, muss dies entsprechend in der Technologiematrix berücksichtigt werden, da der Gesamtbedarf, welcher abhängig von der Endnachfrage mittels der Leontief-Inversen (vgl. Gleichung 4.9) berechnet werden kann, ansonsten verfälscht wird. Dies lässt sich mit den Importen *imp* der Primärintputs *g* des makroökonomischen Teilmodells vergleichen, welche nicht den Vorleistungen zugeordnet werden, da ansonsten bei der Ableitung des Gesamtbedarfs durch die Bereitstellung des eigentlich importierten Gutes fälschlicherweise Produktionsprozesse im Inland ausgelöst werden würden. Anstelle der Definition entsprechender Primärintputs wird an dieser Stelle jedoch die vorliegende $2 \cdot o \times 2 \cdot o$ Technologiematrix in einen internen ($ii, jj \in \{1, \dots, o\}$) und einen externen Teil ($ii + o, jj + o \in \{o + 1, \dots, 2 \cdot o\}$) aufgespalten, wobei *o* die Anzahl der betrachteten Stoffe wiedergibt.

$$tec_{ii+o,jj}^{ZP,s,t} = \frac{\sum_y (ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t} - ik_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}) \cdot kap_{y,jj}^{ZP,s}}{\sum_y kap_{y,jj}^{ZP,s} \cdot 1.000},$$

falls $ii = ii^{ext}$

(5.2)

$$tec_{ii+o,jj+o,s,t} = 1, \text{ falls } ii = jj$$

$$tec_{ii+o,jj,s,t} = tec_{ii+o,jj+o,s,t} = 0, \text{ sonst}$$

Zunächst werden die Zwischen- und Kuppelprodukte ii^{ZP} bzw. ii^{KP} gemäß Gleichung 5.1 dem internen und alle Stoffe $ii^{ext} \subset ii$, welche nicht im Werk produziert werden können (Bsp.: Kohle) oder als Nebenprodukte anfallen, aber nicht verwendet werden können (Bsp.: Treibhausgasemissionen), gemäß Gleichung 5.2 dem externen Teil zugeordnet. Dieses Vorgehen der initialen Erstellung einer Technologiematrix $TEC_{s,t}$, welche in Tonnen pro Tonne oder GJ pro Tonne (Brennstoffe, Elektrizität) notiert, impliziert jedoch, dass alle Zwischenprodukte intern hergestellt werden und vernachlässigt daher zunächst noch jeden etwaigen externen Bezug an Zwischenprodukten, weshalb sich ein iteratives Verfahren, dem in den Gleichungen 5.3 bis 5.8 aufgezeigten Algorithmus folgend, zur Korrektur dieser Implikation anschließt.

Hierfür wird zunächst der Gesamtbedarf $\bar{q}_{s,t}^{AKT}$ des Werks s , welcher die jährlich bereitzustellenden oder zu beziehenden Inputs (> 0) sowie die anfallenden Outputs (< 0) in Tonnen bzw. GJ angibt, mittels Gleichung 5.3 berechnet. Diese entspricht dem physischen Mengenmodell des makroökonomischen Teilmodells (vgl. Gleichung 4.43), wobei $\bar{d}_{s,t}^{AKT}$ die in Tonnen notierende jährliche Verkaufsmenge an Zwischen- und Endprodukten, d.h. die durch das jeweilige Werk s im Jahr t bereitzustellende Endnachfrage, wiedergibt. Die Verkaufsmenge wird wiederum durch das IO-Teilmodell, welches die makroökonomischen Rahmenbedingungen liefert, vorgegeben, wobei die Verteilung der insgesamt zukünftig nachgefragten physischen Mengen auf die einzelnen Werke in Abschnitt 5.3 beschrieben wird.

$$\bar{q}_{s,t}^{AKT} = (TEC_{s,t})^{-1} \cdot \bar{d}_{s,t}^{AKT} \quad (5.3)$$

Die mittels Gleichungen 5.1 und 5.3 berechneten Werte zeigen, dass die bisherige Vorgehensweise zu unplausiblen Ergebnissen führen kann, da die intern durch das Werk s produzierten Zwischenprodukte $q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}$ ggf. die bisher vernachlässigten jährlichen Kapazitäten $\sum_y kap_{y,jj^{ZP},s}$ des Werkes übersteigen können. Eine mögliche Lösung des Problems stellt eine einfache Verschiebung der Menge an intern produzierten Zwischenprodukten, für die die Kapazität gerade nicht mehr ausreicht, hin zu einem externen Bezug dar, was einer Verringerung der die internen Produktionsprozesse reflektierenden Koeffizienten jj^{ZP} und einer Erhöhung der die externen Lieferbeziehungen reflektierenden Koeffizienten $jj^{ZP} + o$ der

Technologiematrix $TEC_{s,t}$ gleichkommen würde. Problematisch zeigt sich hierbei jedoch die Vernachlässigung von Wechselwirkungen, was das folgende Beispiel verdeutlicht. Reichen in einem integrierten Hüttenwerk die Kapazitäten der Kokerei KOK sowie der Sinteranlage SI nicht aus um die Endnachfrage zu befriedigen, führt eine Reduktion der Sinterproduktion bis auf das Niveau der verfügbaren Sinterkapazität dazu, dass automatisch auch der Bedarf an Koks für den Sinterprozess zurückgeht (vgl. hierzu auch Abbildung 2.8). Dies bedeutet wiederum, dass die interne Koksproduktion in geringerem Umfang als zunächst angenommen reduziert werden müsste, um die verfügbare Kapazität der Kokerei einzuhalten. Eine mögliche Lösung des Problems stellt die Verwendung des hier vorgestellten iterativen Ansatzes dar, welcher fortwährend die Einhaltung der folgenden Nebenbedingungen 5.4 bis 5.6 prüft. Letztere müssen dabei für alle Zwischenprodukte ii^{ZP} gleichzeitig eingehalten werden.

Die simultane Berücksichtigung der aufgezeigten sowie der weiteren im Folgenden erläuterten Wechselwirkungen würde zu einer deutlich komplexeren Problemformulierung führen als bei Verwendung eines iterativen Ansatzes, da die Inverse $(TEC_{s,t})^{-1}$, welche den pro Tonne Zwischenprodukt benötigten Gesamtbedarf aller Stoffe widerspiegelt, explizit für alle betroffenen Einträge $tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t}$ aufgelöst werden müsste.

$$q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} < \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} \quad (5.4)$$

$$\neg \left(\left(q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} < \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} \right) \wedge \left((\exists jj^{ZP} \text{ sodass } \right. \right. \\ \left. \left. tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} < 0 \right) \vee \left(d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} < d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel} \right) \right) \right) \quad (5.5)$$

$$\neg \left(\left(d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel} > 0 \right) \wedge \left(\exists jj^{ZP} \text{ sodass } tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} < 0 \right) \right) \quad (5.6)$$

Die Kapazitätsrestriktion wird durch Nebenbedingung 5.4 umgesetzt, während Restriktion 5.5 sicherstellt, dass, falls ein Teil der Kapazität $kap_{y,ii^{ZP},s}$ zur Produktion von ii^{ZP} ungenutzt bleibt, die entsprechenden Zwischenprodukte ii^{ZP} nicht extern bezogen werden. Ein negativer

Eintrag in der Technologiematrix $TEC_{s,t}$ bezeichnet dabei einen Input. Weiterhin garantiert Restriktion 5.5, dass ein Nichterfüllen der durch das IO-Teilmodell vorgegebenen Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel}$ nur möglich ist, wenn die Kapazität bereits vollständig erschöpft ist. Dies impliziert, dass die aufgrund des Kapazitätsmangels nicht herstellbare Verkaufsmenge auf die anderen Werke aufgeteilt oder importiert werden kann (vgl. Abschnitt 5.3.3 und Gleichung 4.19). Die letzte Nebenbedingung 5.6 untersagt den reinen Handel mit Zwischenprodukten, da ein zugekauftes Zwischenprodukt ii^{ZP} nicht gleichzeitig verkauft werden kann, ohne im Produktionsprozess eingesetzt worden zu sein.

Solange eine der anzupassenden Variablen einer dieser drei Nebenbedingungen nicht genügt, wird der folgende Algorithmus ausgeführt, der über alle Zwischenprodukte ii^{ZP} hinweg iteriert. Ist Nebenbedingung 5.4 für ein ii^{ZP} nicht erfüllt, was das Erfüllen von Nebenbedingung 5.5 impliziert, so wird für dieses Zwischenprodukt die in Gleichung 5.7 dargestellte Fallunterscheidung vorgenommen. Durch diese wird die Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ von ii^{ZP} gemäß des Umfangs der Kapazitätsüberschreitung $q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} > 0$ herabgesetzt. Falls keine positive Verkaufsmenge gegeben ist ($d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} = 0$), d.h. falls das Zwischenprodukt ii^{ZP} vollständig in den nachfolgenden Produktionsschritten zur Weiterverarbeitung genutzt wird, wird ein Teil der anfänglich intern hergestellten Menge extern bezogen. Dieser Teil wird durch das relative Ausmaß der Kapazitätsüberschreitung bezogen auf die hergestellte Menge $q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ determiniert, wodurch die internen Inputkoeffizienten (Index ii^{ZP} in $TEC_{s,t}$) verringert und die externen Inputkoeffizienten (Index $ii^{ZP} + o$ in $TEC_{s,t}$) um denselben Betrag erhöht werden. Wie bereits eingangs erläutert, stellen negative Werte in $TEC_{s,t}$ Inputs, positive Werte hingegen Outputs dar.

$$\begin{aligned}
d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} &= \max \left(d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \left(q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} \right), 0 \right), \text{ falls } d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} > 0 \\
tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} &= tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} + \max \left(tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} \right. \\
&\quad \left. \cdot \frac{q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s}}{q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}}, tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} \right), \\
&\text{falls } \exists jj^{ZP} \text{ sodass } tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} < 0 \quad (5.7) \\
&\text{und } d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} = 0 \\
tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} &= tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} - \max \left(tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} \right. \\
&\quad \left. \cdot \frac{q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s}}{q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}}, tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} \right), \\
&\text{falls } \exists jj^{ZP} \text{ sodass } tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} < 0 \\
&\text{und } d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} = 0
\end{aligned}$$

Ist für ein ii^{ZP} Nebenbedingung 5.4 erfüllt und Nebenbedingung 5.5 nicht erfüllt, so ist die mittels Gleichung 5.8 dargestellte Fallunterscheidung maßgeblich. Durch diese wird der intern produzierte Teil von ii^{ZP} erhöht, falls zuvor ein externer Bezug stattgefunden hat. Im Gegensatz zu Gleichung 5.7 wird dabei die innerhalb der Technologiemarkt umzuverteilende Menge abhängig von der ungenutzten Kapazität $q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} < 0$ pro Gesamtkapazität $\sum_y kap_{y,ii^{ZP},s}$ bestimmt. Auf diese Weise wird der extern bezogene Teil von ii^{ZP} herabgesetzt. Ist diese Umverteilung aufgrund des Nichtvorhandenseins externer Bezugsmengen nicht möglich, so wird die Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ um die ungenutzte Kapazität erhöht, insofern die durch das IO-Teilmodell vorgegebene Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel}$ zuvor nicht eingehalten wurde.

$$\begin{aligned}
tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} &= tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} + \min \left(tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} \right. \\
&\quad \cdot \frac{q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s}}{\sum_y kap_{y,ii^{ZP},s}}, \\
&\quad \left. - tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} \right), \\
&\quad \text{falls } \exists jj^{ZP} \text{ sodass } tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} < 0 \\
tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} &= tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} - \min \left(tec_{ii^{ZP},jj^{ZP},s,t} \right. \\
&\quad \cdot \frac{q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s}}{\sum_y kap_{y,ii^{ZP},s}}, \\
&\quad \left. - tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} \right), \\
&\quad \text{falls } \exists jj^{ZP} \text{ sodass } tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} < 0 \\
d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} &= \min \left(d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} - \left(q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} \right), d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel} \right), \\
&\quad \text{falls } d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} < d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel} \\
&\quad \text{und } \forall jj^{ZP} \text{ gilt } tec_{ii^{ZP}+o,jj^{ZP},s,t} \geq 0
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Wird die Technologiematrix gemäß den Gleichungen 5.7 und 5.8 sukzessive angepasst, so ist auch die Einhaltung von Nebenbedingung 5.6 für alle ii^{ZP} gewährleistet. Der vorgestellte iterative Ansatz führt letztlich zu einer relativ schnellen Konvergenz der anzupassenden Variablen, so dass in den Simulationsläufen nicht mehr als sechs Iterationen notwendig sind um eine vernachlässigbare Abweichung zu den Nebenbedingungen ($< 0,1\%$) zu gewährleisten. Abbildung 5.3 verdeutlicht dies für das Beispiel der Sinter- und Koksproduktion eines integrierten Hüttenwerks mit unzureichender Kokerei- und Sinteranlagenkapazität. Zu Beginn des Algorithmus (Iteration 0, vgl. Gleichungen 5.1 und 5.2) werden die insgesamt notwendigen Mengen

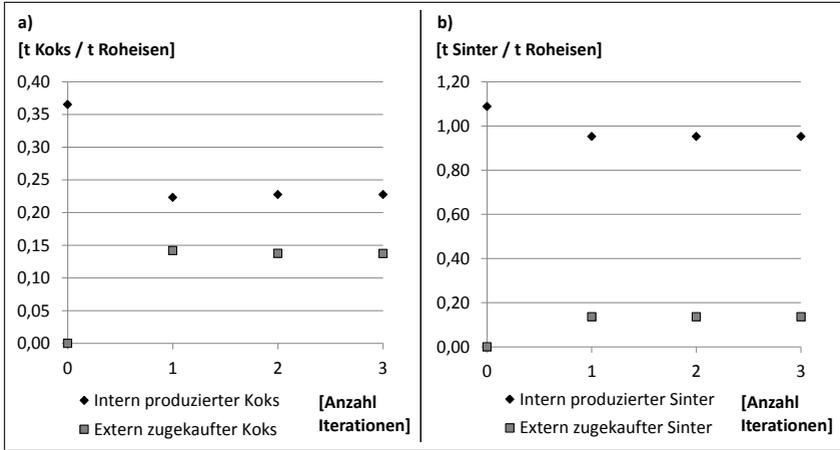


Abbildung 5.3.: Schrittweise Allokation des im Hochofen eingesetzten Kokses a) und Sinters b) zu intern produziertem Koks/Sinter und extern bezogenem Koks/Sinter für ein integriertes Hüttenwerk.⁴

an Koks und Sinter zunächst der internen Produktion zugeordnet, wodurch jedoch die jeweiligen Kapazitäten überschritten werden (Nichteinhaltung Restriktion 5.4). Darauffolgend werden in der ersten Iteration (Gleichung 5.7) beide Produktionsmengen zur Einhaltung der Kapazitätsrestriktionen herabgesetzt, wodurch jedoch der intern bereitgestellte Kokseinsatz etwas mehr als notwendig reduziert wird (Verletzung Restriktion 5.5). Dies liegt darin begründet, dass Koks nicht nur im Hochofen, sondern auch als Input der (nun reduzierten) Sinterproduktion verwendet wird und die insgesamt benötigte Menge an Koks damit gesunken ist. Daraufhin wird das Nichtausnutzen der Kapazität in den Iterationen zwei und drei durch eine schrittweise Erhöhung der internen Koksproduktion und Verringerung der extern zugekauften Menge korrigiert (Gleichung 5.8).

Die so erhaltene Technologiematrix $TEC_{s,t}$ dient als Verbindung der einzelnen Anlagen, welche bedingt durch die Verwendung unterschiedlicher

⁴Informationen zum dargestellten Hüttenwerk: unzureichende Kokerei- und Sinteranlagenkapazität, Kokseinsatz: 0,36 Tonnen pro Tonne Roheisen, Sinterinsatz: 1,09 Tonnen pro Tonne Roheisen.

effizienzsteigernder Technologien auch unterschiedliche Input- und Outputkoeffizienten aufweisen (vgl. Abschnitt 6.2), und integriert diese in das Werk. Mittels Gleichung 5.3 werden somit unter Berücksichtigung etwaiger in den Anlagen erzeugter Kuppelprodukte die jährlichen Netto-Inputs und -Outputs berechnet. In bestimmten Prozessschritten entstandene Prozessgase, anfallende und nutzbare Abwärme (Dampf) oder erzeugte Elektrizität mindern bei dieser Vorgehensweise automatisch die Nachfrage nach Energie in anderen Prozessschritten, wodurch die Gesamteffizienz des Werkes maßgeblich bestimmt wird. Zudem können mittels Gleichung 5.3 auch die gesamten jährlich durch das Werk emittierten Treibhausgase berechnet werden. Insgesamt werden 52 Stoffe unterschieden (vgl. Tabelle A.4 in Anhang A.3), was zu einer Technologiematrix der Dimensionen 104×104 führt. Tabelle 5.1 zeigt beispielhaft einen Auszug einer Technologiematrix für ein integriertes Hüttenwerk, welches einen Teil des benötigten Kokes sowie des benötigten Sinters extern zukauf und nicht die Technologie der Konvertergasrückgewinnung (vgl. Abschnitt 6.2.2) nutzt.

Bezüglich der bisherigen Vorgehensweise wurden zwei wesentliche Faktoren bei der Berechnung der werksinternen Stoff- und Energieflüsse vernachlässigt. Zum einen wurden Industriekraftwerke, welche überschüssige Prozessgase zur Dampf- und Stromerzeugung einsetzen können, noch nicht betrachtet, da sich die Technologiematrix nur auf die zur Herstellung des Endprodukts (Walzstahl bzw. Aluminiumprodukt) notwendigen Prozessschritte bezieht. Zum anderen wurde bisher keine Kompensation von evtl. nicht in ausreichendem Umfang anfallenden Kuppelprodukten berücksichtigt. Beide Faktoren führen daher zu der im Folgenden vorgenommenen Erweiterung der Modellierung werksinterner Stoff- und Energieflüsse.

Zunächst wird mittels Gleichung 5.9 der Gesamtbedarf $\bar{q}_{s,t}^{AKT,oKP}$ ermittelt, wobei das Superskript oKP darauf hindeutet, dass die Entstehung der Kuppelprodukte ii^{KP} , die nach der bisherigen Vorgehensweise im Werk s in unzureichendem Umfang anfallen würden ($q_{ii^{KP},s,t}^{AKT} > 0$), vernachlässigt wird. Somit setzt die Technologiematrix $TEC_{s,t}^{oKP}$ die Erzeugung dieser unzureichenden Kuppelprodukte explizit auf Null. Auf diese Weise wird der Bruttobedarf an Kuppelprodukten, welche anteilig durch alternative Stoffe zu ersetzen sind, bestimmt.

$$\begin{aligned} \bar{q}_{s,t}^{AKT,oKP} &= (TEC_{s,t}^{oKP})^{-1} \cdot \bar{d}_{s,t}^{AKT} \\ \text{mit } tec_{ii^{KP},jj^{ZP},s,t}^{oKP} &= 0, \text{ falls } tec_{ii^{KP},jj^{ZP},s,t} > 0 \\ &\quad \wedge q_{ii^{KP},s,t}^{AKT} > 0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Die eigentliche Substitution wird mittels Gleichung 5.10 realisiert. Dort wird der Anteil nicht ausreichender Kuppelprodukte ii^{KP} an der im Werk s insgesamt benötigten Menge $\frac{q_{ii^{KP},s,t}^{AKT}}{q_{ii^{KP},s,t}^{AKT,oKP}} \leq 1$ durch ein Substitut ii^* ersetzt.

So substituiert bspw. Erdgas einen Teil des Kokereigases im Falle einer unzureichenden Erzeugung von Prozessgas durch die Kokerei KOK . Hierdurch wird auch die Einhaltung der Energiebilanz sichergestellt. Gleichung 5.10 verdeutlicht, dass der die interne Produktion repräsentierende Teil von $TEC_{s,t}$ (ii^{KP}) herabgesetzt wird, während der den externen Bezug repräsentierende Teil ($ii^* + o$) zunimmt.

$$\begin{aligned} tec_{ii,jj^{ZP},s,t} &= tec_{ii,jj^{ZP},s,t} - tec_{ii,jj^{ZP},s,t} \cdot \frac{q_{ii,s,t}^{AKT}}{q_{ii,s,t}^{AKT,oKP}}, \\ &\quad \text{falls } ii = ii^{KP} \wedge tec_{ii^{KP},jj^{ZP},s,t} < 0 \\ &\quad \wedge q_{ii^{KP},s,t}^{AKT} > 0 \\ tec_{ii^*+o,jj^{ZP},s,t} &= tec_{ii^*+o,jj^{ZP},s,t} + tec_{ii,jj^{ZP},s,t} \cdot \frac{q_{ii,s,t}^{AKT}}{q_{ii,s,t}^{AKT,oKP}}, \\ &\quad \text{falls } ii = ii^{KP} \wedge tec_{ii^{KP},jj^{ZP},s,t} < 0 \\ &\quad \wedge q_{ii^{KP},s,t}^{AKT} > 0 \wedge ii^* \text{ ist Substitut zu } ii \\ tec_{ii,jj,s,t} &= tec_{ii,jj,s,t}, \quad \text{sonst} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Im Falle überschüssiger Kuppelprodukte ($q_{ii^{KP},s,t}^{AKT} < 0$), wie bspw. der ungenutzte Anteil des Stroms, der durch eine am Hochofen installierte Gichtgasentspannungsturbine (vgl. Abschnitt 6.2.2) erzeugt wird, können diese gewinnbringend veräußert werden. Überschüssige Prozessgase $ii^{PG} \subset ii^{KP}$,

welche nicht vollständig als Energielieferant für andere Prozessschritte eingesetzt werden können, werden hingegen häufig als Brennstoff in einem nachgeschalteten Kraftwerk verwendet. Dies zeigt Gleichung 5.11, welche die jährlichen in GJ notierenden Inputs überschüssiger Prozessgase $in_{ii^{PG},y,s,t}^{KW}$ gemäß den Vorjahresanteilen von ii^{PG} den einzelnen an einem Standort befindlichen Kraftwerken y zuteilt. Wurde ein Prozessgas zuvor noch nicht eingesetzt ($\sum_y in_{ii^{PG},y,s,t-1}^{KW} = 0$), da z.B. die Technologie zur Rückgewinnung und energetischen Nutzung des Konvertergases (vgl. Abschnitt 6.2.2) erstmals im Jahr t installiert wird, wird dieses Prozessgas den einzelnen Kraftwerken gleich verteilt alloziert. Hierbei bezeichnet nn_s^{KW} die Anzahl der an einem Standort vorhandenen Kraftwerke. Da angenommen wird, dass die Dampf- und Elektrizitätserzeugung der verbundenen Industriekraftwerke konstant ist, werden die Abweichungen in der Energiebilanz durch den Input von Erdgas $ii^{EG} \subset ii^{ext}$ ausgeglichen. Durch diese Annahme wird sichergestellt, dass der Gesamteffekt einer Reduzierung der Menge an entstehenden Prozessgasen korrekt wiedergegeben wird. Ansonsten würde die Reduzierung zwar mit geringeren Kraftwerksemissionen, jedoch auch mit geringeren Mengen an erzeugtem Dampf und Strom einhergehen, die dann für die entsprechenden Abnehmer (Bsp. Haushalte) anderweitig bereitgestellt werden müssten.

$$in_{ii,y,s,t}^{KW} = \left\{ \begin{array}{l} \left| q_{ii,s,t}^{AKT} \cdot \frac{in_{ii,y,s,t-1}^{KW}}{\sum_y in_{ii,y,s,t-1}^{KW}} \right|, \text{ falls } ii = ii^{PG} \\ \quad \wedge q_{ii^{PG},s,t}^{AKT} < 0 \wedge \sum_y in_{ii^{PG},y,s,t-1}^{KW} \neq 0 \\ \left| \frac{q_{ii,s,t}^{AKT}}{nn_s^{KW}} \right|, \text{ falls } ii = ii^{PG} \\ \quad \wedge q_{ii^{PG},s,t}^{AKT} < 0 \wedge \sum_y in_{ii^{PG},y,s,t-1}^{KW} = 0 \\ \max \left(in_{ii,y,s,t-1}^{KW} + \sum_{ii^{PG}} in_{ii^{PG},y,s,t-1}^{KW} \right. \\ \quad \left. - \sum_{ii^{PG}} in_{ii^{PG},y,s,t}^{KW}, 0 \right), \text{ falls } ii = ii^{EG} \\ in_{ii,y,s,t-1}^{KW}, \text{ sonst} \end{array} \right. \quad (5.11)$$

Die jährlichen in GJ bzw. Tonnen notierenden Outputs $out_{ii,y,s,t}^{KW}$ der modellierten Kraftwerke umfassen neben Elektrizität $ii^{El} \subset ii^{KP}$ und Dampf

$ii^{Da} \subset ii^{KP}$, welche beide in den einzelnen Prozessschritten der Metallherzeugung genutzt oder aber verkauft werden können, auch CO₂-Emissionen $ii^{CO2} \subset ii^{ext}$. Erstere werden in Gleichung 5.12 abhängig vom gesamten Brennstoff-Input $ii^{BS} \supset \{ii^{PG}, ii^{EG}\}$ sowie dem Wirkungsgrad der Elektrizitäts- eff^{El} und der Dampferzeugung eff^{Da} berechnet, wobei eff^{Da} die Effizienz der Dampfauskopplung ohne den zur Elektrizitätserzeugung verwendeten Dampf angibt. Die CO₂-Emissionen hingegen hängen direkt vom Kohlenstoffgehalt cge_{iiBS} der einzelnen eingesetzten Brennstoffe ii^{BS} sowie von CO₂ cge_{co2}^{THG} (vgl. Gleichung 4.65 des IO-Teilmodells) ab.

$$out_{ii,y,s,t}^{KW} = \begin{cases} \sum_{iiBS} in_{iiBS,y,s,t}^{KW} \cdot eff^{El}, & \text{falls } ii = ii^{El} \\ \sum_{iiBS} in_{iiBS,y,s,t}^{KW} \cdot eff^{Da}, & \text{falls } ii = ii^{Da} \\ \frac{\sum_{iiBS} in_{iiBS,y,s,t}^{KW} \cdot cge_{iiBS}}{cge_{co2}^{THG}}, & \text{falls } ii = ii^{CO2} \\ out_{ii,y,s,t-1}^{KW}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.12)$$

Nach der Anwendung des Mengenmodells (Gleichung 5.3) auf die aktualisierte Technologiematrix (Gleichung 5.10), werden die so erhaltenen werkspezifischen Gesamtbedarfe $\vec{q}_{s,t}^{AKT}$ um die berechneten Inputs und Outputs der sich im Produktionsverbund befindlichen Kraftwerke gemäß Gleichung 5.13 ergänzt. Dabei wird wiederum zwischen internen (ii) und externen ($ii+o$) Stoff- und Energieflüssen unterschieden. Ist kein Kraftwerk am Standort des Werks s installiert ($nn_s^{KW} = 0$), wird der überschüssige Anteil der Prozessgase $q_{iiPG,s,t}^{AKT} < 0$ abgefackelt, was zu zusätzlichen CO₂-Emissionen ohne der Möglichkeit einer Energierückgewinnung in Form von Dampf oder Elektrizität führt.

$$\begin{aligned}
q_{ii,s,t}^{AKT} &= q_{ii,s,t}^{AKT} + \sum_y in_{ii,y,s,t}^{KW} - \sum_y out_{ii,y,s,t}^{KW}, \\
&\text{falls } ii = ii^{KP} \wedge nn_s^{KW} > 0 \\
q_{ii+o,s,t}^{AKT} &= q_{ii+o,s,t}^{AKT} + \sum_y in_{ii,y,s,t}^{KW} - \sum_y out_{ii,y,s,t}^{KW}, \\
&\text{falls } ii = ii^{ext} \wedge nn_s^{KW} > 0 \\
q_{ii+o,s,t}^{AKT} &= q_{ii+o,s,t}^{AKT} + \frac{\sum_{ii^{PG}} q_{ii^{PG},s,t}^{AKT} \cdot cge_{ii^{PG}}}{cge_{co2}^{THG}} \Big| q_{ii^{PG},s,t}^{AKT} < 0, \\
&\text{falls } ii = ii^{CO2} \wedge nn_s^{KW} = 0 \\
q_{ii,s,t}^{AKT} &= 0, \text{ falls } ii = ii^{PG} \wedge nn_s^{KW} = 0 \wedge q_{ii^{PG},s,t}^{AKT} < 0
\end{aligned} \tag{5.13}$$

Mittels der bisher aufgezeigten Vorgehensweise können sowohl direkte Effekte der Änderung einzelner Anlagenkoeffizienten $ik_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}$ bzw. $ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}$ beziffert werden als auch indirekte Auswirkungen auf andere Anlagen des Produktionsverbunds. Die Koeffizienten können wiederum über die Implementierung verschiedener effizienzsteigernder Technologien beeinflusst werden, was im folgenden Abschnitt 5.1.2 erläutert wird.

5.1.2. Implementierung energieeffizienzsteigernder Technologien

Im Wesentlichen werden drei unterschiedliche Typen typ_{te} von Technologien te , im Folgenden auch Maßnahmen genannt, hinsichtlich ihrer Effekte auf die Input- und Outputkoeffizienten unterschieden. Einmalige Maßnahmen ($typ_{te} = 1$) wirken sich, sobald sie implementiert werden, über vordefinierte positive oder negative Koeffizientenänderungen $\Delta ik_{te,ii,jj}^{tech}$ bzw. $\Delta ok_{te,ii,jj}^{tech}$ auf die jeweiligen Koeffizienten $ik_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}$ bzw. $ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}$ der Anlagen y aus. Dies ist in den Gleichungen 5.14 und 5.15 dargestellt.

$$ik_{ii,y,jj^{ZP},s,t} = \begin{cases} ik_{ii,y,jj^{ZP},s,t-1} + \Delta ik_{te,ii,jj^{ZP}}^{tech}, \\ \text{falls } typ_{te} = 1 \\ \\ ik_{ii,y,jj^{ZP},s,t-1} + \Delta ik_{te,ii,jj^{ZP}}^{tech} \\ \cdot \frac{ik_{ii^{Sub},jj^{ZP}}^{max} - ik_{ii^{Sub},jj^{ZP}}^{min}}{\Delta ik_{te,ii^{Sub},jj^{ZP}}^{tech}} \cdot \frac{1}{st}, \\ \text{falls } typ_{te} = 2 \end{cases} \quad (5.14)$$

Kontinuierliche Maßnahmen ($typ_{te} = 2$) hingegen sind durch die Möglichkeit einer schrittweisen Implementierung charakterisiert. In der Regel handelt es sich dabei um Inputsubstitutionen, wie im Falle der Direkteinblasung von Reduktionsmitteln in den Hochofen *HO*, die einen Teil des eingesetzten Kokes ersetzen können (vgl. Abschnitt 6.2.2). Der Input des Substitutes ii^{Sub} und ggf. von weiteren Hilfsstoffen wird bei einer Implementierung schrittweise erhöht ($\Delta ik_{te,ii^{Sub},jj^{ZP}}^{tech} > 0$), während der Input des substituierten Stoffes schrittweise reduziert wird. Die Schrittweite hängt dabei vom maximalen und minimalen Input des Substituts $ik_{ii^{Sub},jj^{ZP}}^{max}$ und $ik_{ii^{Sub},jj^{ZP}}^{min}$, welche als technische Grenzen vorgegeben werden, sowie einer vordefinierten Anzahl an Implementierungsschritten st ab (Gleichung 5.14).⁵

$$ok_{ii,y,jj^{ZP},s,t} = \begin{cases} ok_{ii,y,jj^{ZP},s,t-1} + \Delta ok_{te,ii,jj^{ZP}}^{tech}, \\ \text{falls } typ_{te} = 1 \\ \\ ok_{ii,y,jj^{ZP},s,t-1} + (a^{reg} + b^{reg} \cdot kap_{y,jj^{ZP},s}) \\ \cdot \frac{3.600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot alf^{GET}}{kap_{y,jj^{ZP},s}}, \\ \text{falls } typ_{te} = 3 \wedge ii = ii^{El} \\ \wedge jj^{ZP} = jj^{Eisen} \end{cases} \quad (5.15)$$

Der letzte wesentliche Technologietyp $typ_{te} = 3$ bezieht sich auf eine bestimmte Technologie, die Gichtgasentspannungsturbinen (GET) zur Er-

⁵Erreicht ein anderer Stoff, bspw. der substituierte Stoff oder ein Hilfsstoff, vor dem Substitut eine technisch einzuhaltende Ober- oder Untergrenze, so wird die Schrittweite entsprechend herabgesetzt. Zur Ableitung der technischen Grenzen vgl. Kapitel 6.

zeugung von Strom unter Nutzung des überschüssigen Drucks am Hochofen *HO*. Diese ist mit den ersten beiden Technologietypen nicht darstellbar, da die Stromerzeugung maßgeblich von der Kapazität des Hochofens $kap_{y,jj^{Eisen},s}$ abhängt (vgl. Abschnitt 6.2.2). Somit werden die auf die in Tonnen notierende Jahreskapazität bezogenen Regressionsparameter a^{reg} (Achsenabschnitt) und b^{reg} (Steigung) in Gleichung 5.15 zur Berechnung der Leistung einer GET in MW verwendet. Um letztlich die Outputkoeffizienten in MJ pro Tonne produziertem Eisen $jj^{Eisen} \subset jj^{ZP}$ auf einer jährlichen Basis zu erhalten, wird die in MW gegebene Leistung umgerechnet und mit einem durchschnittlichen Auslastungsfaktor der GET $alf^{GET} < 1$ multipliziert.

Bezüglich der drei formal in den Gleichungen 5.14 und 5.15 dargestellten Technologietypen existieren einige Sonderfälle, die im Folgenden kurz erläutert werden. So mindern bspw. einige Maßnahmen vom Typ 1 ($typ_{te} = 1$) keine speziellen Brennstoffe ii^{BS} , sondern den Brennstoffeinsatz im allgemeinen. In diesem Fall wird die Reduzierung des Brennstoffeinsatzes $\Delta ik_{te,ii^{BS},jj^{ZP}}^{tech}$ gemäß des energetischen Anteils der einzelnen Brennstoffe $\frac{ik_{ii^{BS},y,jj^{ZP},s,t-1}}}{\sum_{ii^{BS}} ik_{ii^{BS},y,jj^{ZP},s,t-1}}$ auf diese aufgeteilt.

Weiterhin gilt es die durch Technologien ggf. neu entstandenen Stoff- und Energieflüsse zu erfassen, so z.B. bei der Implementierung der Technologie zur Rückgewinnung und energetischen Nutzung des Konvertergases $ii^{Kon} \subset ii^{PG}$. Da letzteres zuvor in $t - 1$ noch nicht genutzt wurde und $ik_{ii^{Kon},y,jj^{ZP},s,t-1} = 0 \forall y$ gilt, wird innerhalb der gegebenen technischen Grenzen ein bestimmter Prozentsatz des zuvor in den einzelnen Anlagen y eingesetzten Erdgases ii^{EG} durch Konvertergas ii^{Kon} ersetzt. Überschüssiges Konvertergas kann wiederum gemäß der bereits vorgestellten Vorgehensweise im Kraftwerk eingesetzt (Gleichung 5.11), unzureichende Mengen durch ein Substitut (hier: Erdgas) ersetzt werden (Gleichung 5.10).

Weiterhin wird für einige Stoffe eine Aufspaltung in Reduktionsmittel (prozessbedingte Emissionen) und Brennstoff (feuerungsbedingte Emissionen) vorgenommen (Bsp.: Schweröl), wodurch diese Stoffe zweimal in den anlagenpezifischen Koeffizienten und der Technologiematrix $TEC_{s,t}$

hinterlegt sind.⁶ Dies gewährleistet, dass eine Energieeffizienzmaßnahme vom Typ 1 lediglich den Brennstoffeinsatz adressiert und keine Auswirkungen auf das eingesetzte Reduktionsmittel hat, welches wiederum durch Input-substituierende Maßnahmen ($typ_{te} = 2$) beeinflusst wird.

Da unter realen Bedingungen eine gegenseitige Beeinflussung einzelner Technologien zu erwarten ist und damit die einzelnen induzierten Effizienzsteigerungen nicht beliebig addiert werden können, werden die Auswirkungen durch technische Restriktionen begrenzt (vgl. Abschnitt 6.2). So ist bspw. eine gewisse Mindestmenge an Koks als Stützgerüst im Hochofen notwendig um einen stabilen Prozess zu ermöglichen. Diese kann, auch bei umfangreicher Verwendung alternativer Reduktionsmittel, nicht unterschritten werden. Somit werden für jeden Stoff ii und jeden das Zwischenprodukt jj^{ZP} herstellenden Anlagentyp technische Obergrenzen $ik_{ii,jj^{ZP}}^{max}$ bzw. $ok_{ii,jj^{ZP}}^{max}$ und Untergrenzen $ik_{ii,jj^{ZP}}^{min}$ bzw. $ok_{ii,jj^{ZP}}^{min}$ definiert. Für deren Einhaltung sorgen die folgenden Gleichungen 5.16 und 5.17.

$$ik_{ii,y,jj^{ZP},s,t} \leq ik_{ii,jj^{ZP}}^{max}, \quad ik_{ii,y,jj^{ZP},s,t} \geq ik_{ii,jj^{ZP}}^{min} \quad (5.16)$$

$$ok_{ii,y,jj^{ZP},s,t} \leq ok_{ii,jj^{ZP}}^{max}, \quad ok_{ii,y,jj^{ZP},s,t} \geq ok_{ii,jj^{ZP}}^{min} \quad (5.17)$$

Während beide Gleichungen vermuten lassen, dass für eine Anlage des gleichen Typs an unterschiedlichen Standorten dieselben Ober- und Untergrenzen gelten, muss von dieser Konvention im Falle des Walzwerks abgewichen werden. Dies liegt darin begründet, dass sich letzteres nicht auf eine große Anlage mit einer bestimmten Kapazität bezieht, sondern eine Vielzahl an unterschiedlichen Prozessen (Bsp.: Blockwalzwerk, Profilstraße, Stabstahlstraße, Warmbandstraße, Kaltwalzwerk [306]) mit unterschiedlichen Kapazitäten unter diesem Anlagentyp subsumiert wird. Dadurch differieren auch die maximalen In- und Outputs an Dampf, Elektrizität oder Brennstoffen des Walzwerks, die somit durch werks- und anlagenspezifische Koeffizienten (Bsp.: $ik_{ii,y,jj^{WS},s}^{min}$) beschrieben werden (vgl. Abschnitt 6.2), wobei $jj^{WS} \subset jj^{ZP}$ das Endprodukt Walzstahl bezeichnet.

Des Weiteren werden einige technische Restriktionen nicht auf einzelne Brennstoffe, sondern den gesamten Brennstoffeinsatz bezogen. Im Falle

⁶Bezüglich des Unterschieds zwischen prozessbedingten und feuerungsbedingten Emissionen vgl. bspw. [159].

einer Unter- oder Überschreitung werden dann die einzelnen Brennstoffe anteilig um denselben Prozentsatz erhöht oder reduziert, sodass die Restriktionen gerade noch eingehalten werden.

Durch die Änderungen der einzelnen Koeffizienten kann es zu Verzerrungen in der Massenbilanz kommen, welche es entsprechend zu korrigieren gilt. So beeinflusst bspw. eine Reduktion des Inputs an Brennstoffen ii^{BS} sowohl die entstehenden CO_2 -Emissionen ii^{CO_2} wie auch die anfallenden Prozessgase ii^{PG} . Daher müssen alle Anlagen y eines Werkes s die Restriktion 5.18, welche die Kohlenstoffbilanz repräsentiert, erfüllen. cge_{ii} bezeichnet dabei den Kohlenstoffgehalt der einzelnen Stoffe ii .

$$\sum_{ii} ik_{ii,y,jj^{ZP},s,t} \cdot cge_{ii} = \sum_{ii} ok_{ii,y,jj^{ZP},s,t} \cdot cge_{ii} \quad (5.18)$$

Die Anpassung der Koeffizienten zur Korrektur der Verzerrungen erfolgt wiederum durch einen iterativen Ansatz. Solange Restriktion 5.18 nicht erfüllt ist, wird Gleichung 5.19 berechnet, die die Outputkoeffizienten $ok_{ii,y,jj^{ZP},s,t}$ derart anpasst, dass die relative Abweichung zwischen den gesamten Kohlenstoffinputs und -outputs einer Anlage y den Outputkoeffizienten zugerechnet wird. Hierbei umfassen letztere alle kohlenstoffhaltigen Stoffe ($cge_{ii} > 0$), die nicht als Zwischenprodukt klassifiziert sind ($ii \neq ii^{ZP}$). Dadurch wird gewährleistet, dass ein geringerer Input an Brennstoffen ii^{BS} nicht mit einer Reduktion der Ausbringungsmengen an kohlenstoffhaltigen Zwischenprodukten (Bsp.: Koks, Roheisen) einhergeht. Dies impliziert, dass, sollten einige Technologien te negative oder positive Effekte auf die Ausbringungsmenge haben, nur die Netto-Effekte in Form von auf die Ausbringungsmenge bezogenen Koeffizientenänderungen $\Delta ik_{te,ii,jj^{ZP}}^{tech}$ bzw. $\Delta ok_{te,ii,jj^{ZP}}^{tech}$ betrachtet werden. Gleichung 5.19 prüft analog zu Gleichung 5.17 die Einhaltung der technischen Grenzen aller anzupassenden Koeffizienten.

$$\begin{aligned}
ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t} &= ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t} \\
&\cdot \left(1 + \frac{\sum_{jj} ik_{jj,y,jj}^{ZP,s,t} \cdot cge_{jj} - \sum_{jj} ok_{jj,y,jj}^{ZP,s,t} \cdot cge_{jj}}{\sum_{jj} ok_{jj,y,jj}^{ZP,s,t} \cdot cge_{jj}} \right) \quad (5.19) \\
\forall ii &\left| cge_{ii} > 0 \wedge ii \neq ii^{ZP} \wedge ok_{ii,jj}^{min,ZP} > ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t} > ok_{ii,jj}^{max,ZP} \right.
\end{aligned}$$

Hinsichtlich der Gesamteffizienz und der Treibhausgasemissionen eines Werkes wird an dieser Stelle nochmals die Wichtigkeit einer integrierten Betrachtung aller Anlagen deutlich. So kann sich bspw. ein geringerer Brennstoffeinsatz zum einen positiv auf die Treibhausgasemissionen der betroffenen Anlage auswirken, jedoch ggf. auch zu geringeren Mengen an entstehenden Prozessgasen führen. Letzteres hat wiederum Auswirkungen auf die anderen Anlagen eines Standortes, deren Nachfrage nach alternativen Brennstoffen zur Substitution der fehlenden Prozessgase beeinflusst wird.

Zusammenfassend zeigt der in diesem Abschnitt dargestellte Ansatz die Effekte auf, welche mit der Implementierung von energieeffizienzsteigernden Technologien einhergehen. Daneben ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Maßnahmen simultan implementiert werden können und sich teilweise gegenseitig ausschließen. Hierzu wird die Möglichkeit eingeräumt, Technologien auszubauen, was über eine Umkehr der Gleichungen 5.14 bis 5.19 durchgeführt wird. Bezüglich der Input-Substitutionen ($typ_{te} = 2$) gilt es zu beachten, dass diese sowohl simultan als auch ersetzend implementiert werden können.

In den Abschnitten 2.3.1 und 5.1.1 wurde bereits dargelegt, dass das Energiemanagement, d.h. die effiziente Verteilung und Nutzung der an einem Standort anfallenden Prozessgase, von besonderem Interesse für die Entstehung der Treibhausgasemissionen ist. Der Fokus der bisherigen Ausführungen lag daher in einer detaillierten Modellierung der werksinternen Stoff- und Energieflüsse sowie deren Beeinflussung durch die Implementierung effizienzsteigernder Technologien unter Berücksichtigung werkspezifischer Gegebenheiten. Somit wurden bisher lediglich die technischen Aspekte der Modellierung näher beleuchtet. Eine Erweiterung

um betriebswirtschaftliche Aspekte, welche maßgeblich die Investitionsentscheidungen einzelner Akteure in der Metallindustrie beeinflussen, wird im folgenden Abschnitt 5.2 vorgenommen.

5.2. Modellierung der Investitionsentscheidung

Während das Werk s in seiner Rolle als Akteur im Abschnitt 5.1 von eher untergeordneter Relevanz war, wird hier das Verhalten der Akteure hinsichtlich zukünftiger Investitionsentscheidungen in den Vordergrund gestellt. Diese reagieren auf verschiedene ökonomische und klimapolitische Einflüsse und beeinflussen damit letztlich die zukünftigen Treibhausgasemissionen der Metallerzeugung. Zunächst wird im folgenden Abschnitt 5.2.1 die Methodik zur Berechnung der Investitionen in effizienzsteigernde Technologien vorgestellt, deren technische Implikationen im vorigen Abschnitt bereits hinreichend erläutert wurden. Darauffolgend befasst sich Abschnitt 5.2.2 mit der Berechnung der gesamten Kosten und Erlöse, von denen die in Abschnitt 5.2.3 dargestellte Investitionsentscheidung maßgeblich abhängt.

5.2.1. Berechnung der Investitionen

Investitionen im Bereich des Großanlagenbaus unterliegen in der Regel einer Größendegression $\kappa < 1$, was bedeutet, dass die Investitionen unterproportional mit der Kapazität ansteigen (vgl. bspw. [6]). Dies ist ebenfalls in Gleichung 5.20 dargestellt, wobei wiederum zwischen den drei Technologietypen typ_{te} aus Abschnitt 5.1.2 unterschieden wird. Die Investitionen für einmalige Maßnahmen ($typ_{te} = 1$) hängen von der gegebenen Referenzinvestition inv_{te}^{Ref} der Technologie te für eine gegebene Referenzkapazität kap_{te}^{Ref} ab. Dabei wird die Höhe der Investition für eine effizienzsteigernde Technologie $inv_{te,y,jj}^{Tech,ZP,s,t}$ über die Kapazität der Anlage $kap_{y,jj}^{ZP,s}$, an der sie eingesetzt wird, bestimmt. Dies impliziert, dass die Referenzkapazitäten in Jahrestonnen des Outputs an Zwischenprodukt jj^{ZP} angegeben sind. Die Investitionen für kontinuierliche (Input-substituierende) Maßnahmen ($typ_{te} = 2$) beziehen sich auf deren Erweiterung vom Jahr $t - 1$ auf das Jahr t , wobei die Erweiterung durch den vermehrten Einsatz des

Substituts ii^{Sub} charakterisiert ist. Somit werden die Referenzkapazitäten des Technologietyps 2 in Tonnen bzw. GJ jährlichem Input des Substituts angegeben. Die Investitionen für eine GET ($typ_{te} = 3$) hängen wiederum von der installierten Leistung in MW ab, wobei auch die Referenzkapazität in MW angegeben ist.

$$inv_{te,y,jj}^{Tech ZP,s,t} = \begin{cases} inv_{te}^{Ref} \cdot \left(\frac{kap_{y,jj}^{ZP,s}}{kap_{te}^{Ref}} \right)^{\kappa_{te}}, & \text{falls } typ_{te} = 1 \\ inv_{te}^{Ref} \cdot \left(\frac{kap_{y,jj}^{ZP,s}}{kap_{te}^{Ref}} \right)^{\kappa_{te}} \\ \cdot \left(\left(\frac{ik_{ii^{Sub},y,jj}^{ZP,s,t}}{1.000} \right)^{\kappa_{te}} \right. \\ \left. - \left(\frac{ik_{ii^{Sub},y,jj}^{ZP,s,t-1}}{1.000} \right)^{\kappa_{te}} \right), & \text{falls } typ_{te} = 2 \\ inv_{te}^{Ref} \cdot \left(\frac{a^{reg} + b^{reg} \cdot kap_{y,jj}^{ZP,s}}{kap_{te}^{Ref}} \right)^{\kappa_{te}}, & \\ \text{falls } typ_{te} = 3 \end{cases} \quad (5.20)$$

Auch bezüglich der Investitionsrechnung existieren neben den aufgezeigten Berechnungsvarianten Sonderfälle. So wurde bereits in Abschnitt 5.1.2 konstatiert, dass unter dem Anlagentyp *Walzwerk* eine Vielzahl an unterschiedlichen Prozessen zusammengefasst wird. Ein Produkt kann somit nur wenige oder aber auch sehr viele Prozessschritte (Bsp.: Warmwalzen, Kaltwalzen, Glühen, Beschichten) durchlaufen, weshalb es zweckmäßig erscheint die Kapazitäten der wesentlichen Energieverbraucher, für die eine Implementierung effizienzsteigernder Maßnahmen in Frage kommt, zu addieren und als Referenzkapazität zu verwenden. In diesem Fall ist die Referenzkapazität $kap_{te,s}^{Ref}$ zusätzlich von den Spezifika des Werks s abhängig.

Zwar ist ebenfalls die Möglichkeit des Ausbaus einzelner Technologien vorgesehen, jedoch wird diesbezüglich ein Restwert von Null angenommen (keine Desinvestition).

5.2.2. Berechnung der Gesamtkosten

Da die eigentliche Investitionsentscheidung auf dem Kapitalwertkriterium basiert (vgl. Abschnitt 5.2.3) und weiterhin die Gewinne als wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Wettbewerbsfähigkeit eines Werkes berechnet werden sollen (vgl. Abschnitte 2.3.1 und 3.5.2), sind neben den Investitionen auch alle relevanten jährlichen Kosten und Erlöse aufzustellen. Tabelle 5.2 liefert hierzu einen Überblick über die im Modell betrachteten Kostenarten und Erlöse, deren Berechnung im Folgenden, angelehnt an Peters et al. [228], genauer erläutert wird.

5.2.2.1. Berechnung der variablen Herstellkosten

Unter den variablen Herstellkosten werden solche Kostenarten zusammengefasst, die von der Ausbringungsmenge abhängen. Eine der bedeutendsten variablen Kostenpositionen pos für energieintensive Industrien stellen die Ausgaben für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe $pos = 1$ dar, welche mittels Gleichung 5.21 berechnet werden können. Hierzu wird der positive, extern bezogene Teil des Gesamtbedarfs $\bar{q}_{s,t}^{AKT}$ mit dem Einkaufspreis \bar{p}_t^{Ein} multipliziert.⁷ Der Gesamtbedarf hängt dabei indirekt von der Technologiematrix und damit auch von den Koeffizienten der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlagen y ab (vgl. Gleichung 5.3), welche wiederum durch die Implementierung von Technologien te beeinflusst werden (vgl. Gleichung 5.14). Diese Abhängigkeit findet sich auch in den Indizes von $k_{1,te,y,jj^{ZP},s,t}$ wieder.

$$k_{1,te,y,jj^{ZP},s,t} = \sum_{ii} q_{ii+o,s,t}^{AKT} \cdot p_{ii,t}^{Ein} \Big| q_{ii+o,s,t}^{AKT} > 0 \quad (5.21)$$

Die Entwicklung der Einkaufspreise wird durch die im IO-Teilmodell simulierten Preise (vgl. Gleichung 4.44) beeinflusst, wodurch die Investitionsentscheidungen der Akteure in konsistente makroökonomische Rahmenbedingungen eingebettet sind. Die Preisänderungen zwischen dem Jahr $t - 1$ und dem Jahr t werden in Gleichung 5.22 direkt auf die Einkaufspreise \bar{p}_t^{Ein} übertragen, wobei $\lambda_{i,ii} \in \Lambda$ einen Binärwert darstellt,

⁷Eine Auflistung der Einkaufspreise findet sich in Tabelle A.4 im Anhang A.3.

Tabelle 5.2.: Im aktorsbasierten Teilmodell betrachtete Kostenarten $k_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ und Erlöse $erl_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ (Zusammenstellung in Anlehnung an Peters et al. [228])

Bezeichnung	Kostenarten und Erlöse	Kostenkategorie	
$k_{1,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe	Variable Herstell- kosten	Herstellkosten
$k_{2,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Personalkosten		
$k_{3,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Reparatur und Instandhaltung		
$k_{4,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Abschreibungen	Fixkosten	Herstellkosten
$k_{5,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Fremdkapitalzinsen		
$k_{6,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Steuern und Versicherung		
$k_{7,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Overhead-Kosten Werk		Gesamtkosten
$k_{8,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Administration	Allgemein- kosten	
$k_{9,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Distribution und Marketing		
$k_{10,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Forschung und Entwicklung		
$k_{11,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Ausgaben für Emissionsberechtigungen	Klima- bezogene Ausgaben ¹	
$k_{12,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Ökosteuern		
$k_{13,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	EEG-Umlage		
$erl_{1,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Verkauf Zwischen- und Endprodukte	Gesamt- erlös	
$erl_{2,te,y,jj}^{ZP,s,t}$	Verkauf Kuppelprodukte		

¹ Formell können die klimabezogenen Ausgaben ebenfalls den variablen Herstellkosten zugeordnet werden. Aufgrund ihrer Bedeutung bezüglich der in dieser Arbeit analysierten Forschungsfragen werden sie jedoch separat ausgewiesen.

der angibt, ob der Stoff ii dem Sektor i zuordenbar ist ($\lambda_{i,ii} = 1$) oder nicht ($\lambda_{i,ii} = 0$). Weiterhin gilt $\sum_i \lambda_{i,ii} = 1 \forall ii$. Ein Überblick über die in dieser Arbeit vorgenommene Zuordnung der betrachteten Stoffe zu den simulierten Sektoren ist in Tabelle A.3 im Anhang A.2 zu finden.

$$p_{ii,t}^{Ein} = p_{ii,t-1}^{Ein} \cdot \sum_i \frac{p_{i,t}}{p_{i,t-1}} \cdot \lambda_{i,ii} \quad (5.22)$$

Da es das Kapitalwertkriterium erfordert neben den aktuellen Preisentwicklungen auch zu erwartende zukünftige Preisänderungen in die Betrachtung mit einzubeziehen, werden exogen vorgegebene Weltmarktpreisänderungen $\Delta\pi_{imp,i,t+\tau}$, wie sie ebenfalls für die importierten Güter im IO-Teilmodell angenommen werden (vgl. Gleichung 4.18), auf die Einkaufspreise übertragen. Dies zeigt Gleichung 5.23 für die Folgejahre τ der Investitionsentscheidung.

$$p_{ii,t+\tau}^{Ein} = p_{ii,t+\tau-1}^{Ein} \cdot \sum_i \Delta\pi_{imp,i,t+\tau} \cdot \lambda_{i,ii} \quad (5.23)$$

Somit wird an dieser Stelle implizit davon ausgegangen, dass die Erwartungen der einzelnen Akteure hinsichtlich zukünftiger Preisentwicklungen mit der Realität übereinstimmen.

Weiterhin zählen die Personalkosten zu den variablen Herstellkosten, zumindest insofern sich diese auf die operativen Arbeiten in der Produktion beziehen. Eine Möglichkeit der Abschätzung anfallender Personalkosten besteht darin, den Personaleinsatz für jeden Prozessschritt unter Beachtung einer Größendegression $\kappa^{Per} < 1$ mit dem Personalkostensatz $pks_{s,t}$ gemäß Gleichung 5.24 zu multiplizieren (vgl. Peters et al. [228]). Der in Stunden pro Tag angegebene Referenzpersonaleinsatz pez^{Ref} bezieht sich darin, ähnlich zur Investitionsrechnung (vgl. Gleichung 5.20), auf die in Tonnen pro Tag notierende Referenzkapazität $kap^{Ref,Per}$ eines Prozessschritts. Der stündliche Personalkostensatz $pks_{s,t}$ für operative Arbeiten wird weiterhin mit zwei zusätzlichen Faktoren beaufschlagt, die das notwendige Aufsichtspersonal fak^{Aufs} und das Personal für Laborarbeiten fak^{Lab} umfassen.

$$k_{2,te,y,jj^{ZP},s,t} = \sum_y \sum_{ii^{ZP}} pez^{Ref} \cdot \left(\frac{kap_{y,ii^{ZP},s}}{365 \cdot kap^{Ref,Per}} \right)^{\kappa^{Per}} \cdot pk_{s,t} \cdot 365 \cdot (1 + fak^{Aufs} + fak^{Lab}) \quad (5.24)$$

Der Personalkostensatz wird wiederum durch die im IO-Teilmodell simulierten Entwicklungen der Arbeitsentgelte ae beeinflusst, wobei $\omega_{s,ii^{EP}} \in \Omega$ in Gleichung 5.25 einen Binärwert darstellt, der angibt, ob das Endprodukt $ii^{EP} \subset ii^{ZP}$ im Werk s hergestellt wird oder nicht ($\sum_{ii^{EP}} \omega_{s,ii^{EP}} = 1 \forall s$). Dadurch wird gewährleistet, dass bspw. die Lohnentwicklungen eines integrierten Hüttenwerks durch den Sektor *Herstellung von Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus* beeinflusst werden, auch wenn die Kokerei, die das Zwischenprodukt Koks herstellt, eigentlich dem Sektor *Kokereierzeugnisse* zuordenbar ist.

$$pk_{s,t} = pk_{s,t-1} \cdot \sum_i \sum_{ii^{EP}} \Delta \pi_{ae,i,t} \cdot \lambda_{i,ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}} \quad (5.25)$$

Neben den Ausgaben für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe und den Personalkosten hängen weiterhin die Kosten für Reparatur und Instandhaltung direkt von der Ausbringungsmenge ab. Sie werden in Gleichung 5.26 als Prozentsatz prs^{Rep} der gesamten Anlageinvestitionen eines Werkes $inv_{s,t}^{Werk}$ ausgedrückt und mit einem Faktor fak^{Bes} , der den Verbrauch an zusätzlichen Betriebsstoffen (Bsp.: Schmieröl) repräsentiert⁸, beaufschlagt.

$$k_{3,te,y,jj^{ZP},s,t} = (inv_{s,t}^{Werk} \cdot prs^{Rep}) \cdot fak^{Bes} \quad (5.26)$$

Auch wenn es sich bei den letzten beiden Kostenpositionen $k_{2,te,y,jj^{ZP},s,t}$ und $k_{3,te,y,jj^{ZP},s,t}$ formell um variable Herstellkosten handelt, so hängt deren Berechnung von kurzfristig fixen Größen wie der Kapazität oder den Anlageinvestitionen ab (vgl. Gleichungen 5.24 und 5.26). Dieser Umstand ist jedoch aufgrund der Tatsache vernachlässigbar, dass metallergehende

⁸Die in der Kostenposition $pos = 1$ enthaltenen Betriebsstoffe umfassen hingegen wertmäßig wichtigere Positionen wie bspw. Elektrizität.

Werke generell unter relativ hoher Auslastung produzieren um die hohen Investitionen zu kompensieren und die Ausbringungsmenge der einzelnen Anlagen in der Regel nicht beliebig variierbar ist.

5.2.2.2. Berechnung der Fixkosten

Fixkosten hängen im Gegensatz zu den variablen Herstellkosten nicht von der Ausbringungsmenge ab und sind somit lediglich langfristig variierbar. Eine wesentliche Kostenposition stellen darin die Abschreibungen $abs_{s,t}^{AKT}$ des Werkes s dar, die Gleichung 5.27 folgend um die Abschreibungen für implementierte effizienzsteigernde Technologien erhöht werden. Es wird eine lineare Abschreibungsform angenommen, wobei ld_{te} die Lebensdauer der implementierten Technologie in Jahren angibt.

$$k_{4,te,y,jj^{ZP},s,t} = abs_{s,t}^{AKT} = abs_{s,t-1}^{AKT} + \frac{inv_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Tech}}{ld_{te}} \quad (5.27)$$

Über die gesamten Abschreibungen $abs_{s,t}^{AKT}$ des Werkes s können unter der Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer der Anlagen ld^{Werk} wiederum die durchschnittlichen Anlageinvestitionen dieses Werks $inv_{s,t}^{Werk}$, wie in Gleichung 5.28 dargestellt, berechnet werden. Letztere werden dabei zur Ableitung weiterer Kostenpositionen (vgl. Gleichung 5.26) benötigt. Während die Änderungen der Abschreibungen aus der Simulation der Investitionsentscheidung hervorgehen, werden die Abschreibungen für das Basisjahr t^{BAS} unter Zuhilfenahme makroökonomischer Daten, wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, berechnet.

$$inv_{s,t}^{Werk} = abs_{s,t}^{AKT} \cdot ld^{Werk} \quad (5.28)$$

Neben den Abschreibungen zählen auch die zu zahlenden Fremdkapitalzinsen $k_{5,te,y,jj^{ZP},s,t}$ sowie die anfallenden Steuern und Versicherungen $k_{6,te,y,jj^{ZP},s,t}$ zu den Fixkosten [228]. Die Berechnung von ersteren erfolgt in Gleichung 5.29 über das durchschnittliche Anlagevermögen $inv_{s,t}^{Werk} \cdot \frac{1}{2}$, die Eigenkapitalquote ekq sowie den Zinssatz prs^{FK} . Die Lokalsteuern und Sachversicherungen hingegen werden in Gleichung 5.30 über die

Prozentsätze prs^{Ste} bzw. prs^{Vers} abhängig von den Anlageinvestitionen $inv_{s,t}^{Werk}$ abgeschätzt.

$$k_{5,te,y,jj}^{ZP,s,t} = inv_{s,t}^{Werk} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - ekq) \cdot prs^{FK} \quad (5.29)$$

$$k_{6,te,y,jj}^{ZP,s,t} = inv_{s,t}^{Werk} \cdot (prs^{Ste} + prs^{Vers}) \quad (5.30)$$

5.2.2.3. Berechnung der Overhead-Kosten

Die bisherigen aufgezeigten Kostenarten ($pos = 1$ bis $pos = 6$) beziehen sich direkt auf die Produktion und damit die eigentliche Leistungserstellung eines produzierenden Unternehmens. Daneben fallen jedoch weitere regelmäßige Ausgaben an, die das Funktionieren des gesamten Werkes sicherstellen und unter dem Begriff Overhead-Kosten zusammengefasst werden [228]. Darin enthalten sind u.a. Maschinen, Equipment oder Gebäude, die nicht direkt für die Produktion benötigt werden, aber dennoch notwendige Dienste innerhalb des Werks erfüllen. Beispiele sind medizinische Einrichtungen oder ein Betriebsrestaurant. Die Berechnung der Overhead-Kosten erfolgt mittels Gleichung 5.31 über einen Prozentsatz prs^{OH} abhängig von den Personalkosten $k_{2,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ sowie von den Kosten für Reparatur und Instandhaltung $k_{3,te,y,jj}^{ZP,s,t}$. Dies impliziert, dass die Overhead-Kosten maßgeblich von der Personalstärke beeinflusst werden.

$$k_{7,te,y,jj}^{ZP,s,t} = (k_{2,te,y,jj}^{ZP,s,t} + k_{3,te,y,jj}^{ZP,s,t}) \cdot prs^{OH} \quad (5.31)$$

Die in einem Werk anfallenden Herstellkosten lassen sich durch Addition der einzelnen bisher aufgezeigten Kostenpositionen ($\sum_{pos=1}^7 k_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t}$) auf einer jährlichen Basis beziffern. Die Gesamtkosten umfassen weiterhin die im Folgenden erläuterten Allgemeynkosten sowie die klimabezogenen Ausgaben.

5.2.2.4. Berechnung der Allgemeinkosten

Die Allgemeinkosten, welche sich nicht direkt auf die Produktion beziehen, beinhalten Ausgaben für die Administration $k_{8,te,y,jj}^{ZP,s,t}$, die Distribution und das Marketing $k_{9,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ sowie die Forschung und Entwicklung $k_{10,te,y,jj}^{ZP,s,t}$. Erstere berücksichtigen u.a. die Löhne und Gehälter für verwaltende Tätigkeiten, Sekretariate oder die IT-Unterstützung, wobei auch das damit einhergehende Equipment und die dafür notwendigen Gebäude unter der Kostenposition zusammengefasst werden. Da ein Großteil der administrativen Kosten personalbedingt ist, werden diese in Gleichung 5.32 abhängig von den Ausgaben für das operative Personal (abzüglich der Aufschläge für Aufsichtspersonal $fa k^{Aufs}$ und Laborarbeiten $fa k^{Lab}$) und einem vorgegebenen Prozentsatz $pr s^{Adm}$ berechnet.

$$k_{8,te,y,jj}^{ZP,s,t} = k_{2,te,y,jj}^{ZP,s,t} \cdot \frac{1}{fa k^{Aufs} + fa k^{Lab}} \cdot pr s^{Adm} \quad (5.32)$$

Die Kosten für Distribution und Marketing beinhalten u.a. Löhne und Gehälter für den Vertrieb sowie Werbekosten. Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung hingegen umfassen u.a. Löhne und Gehälter für Forschungstätigkeiten sowie das dafür notwendige Equipment. Beide Kostenpositionen können abhängig von den Gesamtkosten abgeschätzt werden (vgl. Peters et al. [228]). Da letztere jedoch noch nicht vorliegen, werden in den Gleichungen 5.33 und 5.34 die entsprechenden Prozentsätze $pr s^{Dis}$ und $pr s^{FuE}$ auf die bereits berechneten Herstellkosten bezogen. Auch hier werden die Änderungen der Arbeitsentgelte aus dem IO-Teilmodell auf die beiden vornehmlich personalbedingten Kostenarten übertragen (vgl. Gleichung 5.25), wobei wiederum die Änderungen des Sektors maßgeblich sind, dem das Endprodukt ii^{EP} des Werkes s zuordenbar ist.

$$k_{9,te,y,jj}^{ZP,s,t} = \sum_{pos=1}^7 k_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t} \cdot pr s^{Dis} \cdot \sum_i \sum_{ii^{EP}} \Delta \pi_{ae,i,t} \cdot \lambda_{i,ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned}
 k_{10,te,y,jj^{ZP},s,t} &= \sum_{pos=1}^7 k_{pos,te,y,jj^{ZP},s,t} \cdot prs^{FuE} \\
 &\cdot \sum_i \sum_{ii^{EP}} \Delta\pi_{ae,i,t} \cdot \lambda_{i,ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}}
 \end{aligned} \tag{5.34}$$

5.2.2.5. Berechnung der klimabezogenen Ausgaben

Während die bisherige Berechnung der einzelnen Kostenpositionen an die Ausführungen von Peters et al. [228] angelehnt ist, stützt sich die Berechnung der klimabezogenen Ausgaben⁹ auf die aktuelle Gesetzeslage hinsichtlich TEHG [285], StromStG [279], EnergieStG [113] und EEG [107]. Sie wird an dieser Stelle, analog zum IO-Teilmodell (vgl. Abschnitt 4.2.1), deutlich detaillierter wiedergegeben, um eine fundierte Abschätzung der durch klimapolitische Instrumente induzierten Effekte zu ermöglichen. Eine Erläuterung der einzelnen Instrumente findet sich in den Abschnitten 2.2.3, 2.2.4 sowie 2.2.5.

Während die kostenlos zugewiesenen Emissionsberechtigungen im IO-Teilmodell exogen vorgegeben werden (vgl. Gleichung 4.25), werden diese im aktorsbasierten Teilmodell auf Basis der vorhandenen werkspezifischen technischen Daten endogen berechnet. Hierfür sind zunächst die maßgeblichen Aktivitätsraten $mar_{jj^{ZP},s}$ (vgl. Abschnitt 2.2.3) der zur Produktion von jj^{ZP} verwendeten Anlagentypen eines Werkes s nach Gleichung 5.35 zu bestimmen. Maßgeblich ist nach der Zuteilungsverordnung [338] der Median aus den Produktionsmengen der Jahre 2005 bis 2008.¹⁰

$$mar_{jj^{ZP},s} = Median \left(q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT} \right) \Big| t \in \{2005, 2006, 2007, 2008\} \tag{5.35}$$

Die in Gleichung 5.36 dargestellte Modellierung der Zuteilungsregeln folgt der aktuellen dritten Handelsperiode. Für die ersten beiden Handelsperioden, welche ebenfalls in den durch das Modell abgedeckten Zeitraum

⁹Als klimabezogene Ausgaben werden in dieser Arbeit alle Kostenpositionen verstanden, die durch klimapolitische Instrumente bestimmt werden.

¹⁰Da das Basisjahr t^{BAS} des vorgestellten Modells 2006 ist (vgl. Kapitel 6), geht das Jahr 2005 modellseitig nicht in die Bestimmung der Aktivitätsrate ein.

fallen, wird angenommen, dass die in Tonnen notierende jährliche Zuteilungsmenge $\sum_{jj^{ZP}} zut_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}$ den tatsächlichen Treibhausgasemissionen eines Werkes s entspricht. Dies ist kongruent mit der Tatsache, dass den energieintensiven Industrien in den ersten beiden Handelsperioden zu viele kostenlose Emissionsberechtigungen (Grandfathering) zugeteilt wurden [140]. Die Zuteilung in der dritten Handelsperiode erfolgt auf Basis des in Abschnitt 2.2.3 dargestellten Fall-back-Ansatzes. Liegt ein Produkt-Emissionswert $bm_{jj^{ZP},t}^{Prod}$ für ein Zwischenprodukt jj^{ZP} vor, so wird dieser mit der maßgeblichen Aktivitätsrate $mar_{jj^{ZP},s}$ und einem Carbon-Leakage-Faktor $clf_{jj^{ZP},t} \leq 1$, der die Intensität des internationalen Wettbewerbs widerspiegelt, multipliziert. Bei erhöhtem internationalem Wettbewerb und damit erhöhtem Risiko einer Verlagerung von Emissionen ins Ausland wird $clf_{jj^{ZP},t} = 1$ gesetzt. Liegt kein Produkt-Emissionswert vor, wird der Brennstoff-Emissionswert bm_t^{Brenn} angesetzt.¹¹ Letzterer notiert in Tonnen CO₂ pro TJ und wird mit den zur Herstellung von jj^{ZP} eingesetzten Brennstoffen ii^{BS} , dem Carbon-Leakage-Faktor sowie der maßgeblichen Aktivitätsrate multipliziert.

$$zut_{jj^{ZP},s,t}^{AKT} = \begin{cases} mar_{jj^{ZP},s} \cdot bm_{jj^{ZP},t}^{Prod} \cdot clf_{jj^{ZP},t}, \\ \text{falls } bm_{jj^{ZP},t}^{Prod} \neq 0 \wedge t \geq 2013 \\ \\ mar_{jj^{ZP},s} \cdot \sum_{ii^{BS}} |tec_{ii^{BS},jj^{ZP},s,t}| \cdot \frac{bm_t^{Brenn}}{1.000} \\ \cdot clf_{jj^{ZP},t} \Big|_{tec_{ii^{BS},jj^{ZP},s,t} < 0}, \\ \text{falls } bm_{jj^{ZP},t}^{Prod} = 0 \wedge t \geq 2013 \end{cases} \quad (5.36)$$

Daneben gilt es zu beachten, dass Kleinemittenten, welche unter einer vorgegebenen jährlichen Emissionsgrenze (derzeit: 25.000 t CO₂-Äq. [285]) liegen, nicht unter das TEHG fallen. Für diese Anlagen wird modellseitig wiederum die kostenlose Zuteilungsmenge den tatsächlichen Emissionen angeglichen.

Bezüglich der Industriekraftwerke als Teil des Anlagenverbundes sind die Zuteilungsregeln bei anlagenübergreifenden Wärmeströmen (vgl. [299]) zu

¹¹ Gemäß dem Fall-back-Ansatz würde bei Fehlen eines Produkt-Emissionswertes eigentlich der Wärme-Emissionswert angesetzt werden. Da jedoch die Wärmeerzeugung durch das vorliegende aktorsbasierte Teilmodell nicht explizit berechnet wird, wird hier der Brennstoff-Emissionswert verwendet.

beachten. Grundsätzlich gilt, dass die Zuteilung beim Wärmeverbraucher und nicht beim Wärmeerzeuger erfolgt. Im Produkt-Emissionswert sind die Emissionen aus der Wärmeerzeugung bereits enthalten, womit Gleichung 5.36 unberührt von den folgenden Betrachtungen bleibt. Ein Wärmeerzeuger hat nur dann einen Anspruch auf kostenlose Zuteilung, wenn die Wärme an einen Abnehmer außerhalb des ETS abgegeben wird (vgl. Umweltbundesamt [299]). Da angenommen wird, dass die überschüssige Wärme (Dampf) der modellierten Kraftwerke in das Fernwärmenetz eingespeist wird und somit Haushalte als Nicht-ETS-Einrichtungen die Abnehmer darstellen, wird eine kostenlose Zuteilung gemäß Gleichung 5.37 berücksichtigt. Die erzeugte Elektrizität hingegen ist in der dritten Handelsphase generell nicht zuteilungsfähig.

$$zut_{s,t}^{AKT,KW} = \left| q_{ii^{Da},s,t}^{AKT} \right| \cdot \frac{bm_t^{Wärme}}{1.000} \cdot clf_t^{Wärme} \cdot lkf_t \quad (5.37)$$

Die Berechnung der kostenlosen Zuteilungsmenge $zut_{s,t}^{AKT,KW}$ berücksichtigt die in GJ notierende ausgekoppelte Wärme, welche mittels Dampf ii^{Da} übertragen wird, den Wärme-Benchmark $bm_t^{Wärme}$, einen für die Wärmeauskopplung geltenden Carbon-Leakage-Faktor $clf_t^{Wärme}$ sowie einen auf Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung anzuwendenden linearen Kürzungsfaktor $lkf_t \leq 1$, welcher unabhängig des Carbon-Leakage-Faktors Bestand hat (vgl. [298]).¹²

Die Ergebnisse der auf diese Weise detailliert berechneten kostenlosen Zuteilungsmengen werden für die im aktorsbasierten Teilmodell betrachteten Sektoren j^{AKT} gemäß Gleichung 5.38 an das IO-Teilmodell weitergegeben (vgl. Abschnitt 4.2.1). Hierzu werden erneut die Binärmatrizen Λ und Ω verwendet, mit Hilfe derer eine Zuordnung der Stoffe ii zu den Sektoren i ermöglicht wird. Maßgeblich für die Zuordnung ist dabei wiederum das Endprodukt ii^{EP} eines jeden Werkes s .

¹²Im Bereich der Bestandsanlagen wird der lineare Kürzungsfaktor nur auf die Stromerzeuger angewendet, im Bereich der Neuanlagen auf alle Anlagentypen (vgl. [301]).

$$\begin{aligned}
z_{ut,jAKT,t} = \sum_s \left(\left(\sum_{jj^{ZP}} z_{ut,jj^{ZP},s,t}^{AKT} + z_{ut,s,t}^{AKT,KW} \right) \right. \\
\left. \cdot \sum_{ii^{EP}} \lambda_{jAKT,ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}} \right)
\end{aligned} \tag{5.38}$$

Die für Emissionsberechtigungen im Jahr t durch das Werk s zu entrichtenden Ausgaben $k_{11,te,y,jj^{ZP},s,t}$ berechnen sich letztlich mittels Gleichung 5.39. In dieser werden die emittierten Treibhausgase $ii^{THG} \subset ii^{ext}$ mit deren Treibhauswirksamkeiten $trw_{ii^{THG}}$ multipliziert, wobei der Index ii^{THG} aus dem aktorsbasierten Teilmodell mit dem Index b , welcher die Treibhausgase im IO-Teilmodell bezeichnet, gleichgesetzt werden kann. Da bei der Metallerzeugung lediglich die unter das ETS fallenden Treibhausgase CO₂ und PFC relevant sind, gilt ferner $ii^{THG} \hat{=} b^{ETS}$. Für die nach Abzug der kostenlos zugeteilten Zertifikate verbleibenden Emissionsmengen müssen zusätzliche Zertifikate käuflich zu einem Preis von $p_t^{CO_2}$ erworben werden. Übrige Zertifikate hingegen werden verkauft ($k_{11,te,y,jj^{ZP},s,t} < 0$) und erhöhen somit den Gewinn.

$$\begin{aligned}
k_{11,te,y,jj^{ZP},s,t} = \left(\sum_{ii^{THG}} \left| q_{ii^{THG}+o,s,t}^{AKT} \right| \cdot trw_{ii^{THG}} \right. \\
\left. - \left(\sum_{ii^{ZP}} z_{ut,ii^{ZP},s,t}^{AKT} + z_{ut,s,t}^{AKT,KW} \right) \right) \cdot p_t^{CO_2}
\end{aligned} \tag{5.39}$$

Im Gegensatz zum IO-Teilmodell erfolgt die Berechnung der Ausgaben zur Begleichung der Ökosteur $k_{12,te,y,jj^{ZP},s,t}$ weniger differenziert, da davon ausgegangen werden kann, dass lediglich die vergünstigten Steuersätze $ost_{iET,t}^{INT}$ für energieintensive Industrien Anwendung finden (vgl. Abschnitte 2.2.4 und 4.2.1), zu denen sowohl die Eisen- und Stahl- als auch die Aluminiumindustrie gezählt werden können. Gleichung 5.40 gibt die hierfür anzuwendende Formel an. Darin werden die eingesetzten Energieträger $ii^{ET} \subset ii$ mit deren, in GJ pro t angegebenem Energiegehalt

$eng_{ii^{ET}}$ sowie dem Energieträger-spezifischen Steuersatz multipliziert. Dabei gilt es zu beachten, dass die Energieträger ii^{ET} nicht nur die Brennstoffe ii^{BS} umfassen, sondern auch die stofflich (Bsp.: Kohle) oder als Reduktionsmittel (Bsp: Koks) genutzten Stoffe beinhalten. Für die bereits in GJ notierenden Brennstoffe gilt $eng_{ii^{ET}} = 1$. Nach §26, 37, 44 und 47 EnergieStG [113] (Herstellerprivileg) sind die Netto-Bezugsmengen $q_{ii^{ET}+o,s,t}^{AKT} > 0$ (ohne Eigenverbrauch) zur Berechnung der Ökosteuern maßgeblich. $\lambda_{i^{ET},ii^{ET}} \in \Lambda$ stellt wiederum einen Binärwert dar, der angibt, ob der Energieträger ii^{ET} dem Sektor i^{ET} zuordenbar ist ($\lambda_{i^{ET},ii^{ET}} = 1$) oder nicht ($\lambda_{i^{ET},ii^{ET}} = 0$).

$$k_{12,te,y,jj^{ZP},s,t} = \sum_{ii^{ET}} \left(q_{ii^{ET}+o,s,t}^{AKT} \cdot eng_{ii^{ET}} \cdot \sum_{i^{ET}} ost_{i^{ET},t}^{INT} \cdot \lambda_{i^{ET},ii^{ET}} \right) \Big| q_{ii^{ET}+o,s,t}^{AKT} > 0 \quad (5.40)$$

Bezüglich des Sektors *Mineralölverarbeitung* wird eine genauere Untergliederung vorgenommen, da sich die Steuersätze für Benzin, Heizöl, etc., die allesamt diesem Sektor zugeordnet werden können, teilweise deutlich unterscheiden (vgl. Tabelle 2.4 in Abschnitt 2.2.4). Dieselbe Differenzierung wird auch im IO-Teilmodell vorgenommen.

Die Berechnung der letzten klimabezogenen Ausgabeposition, der EEG-Umlage, erfolgt weitestgehend analog zum IO-Teilmodell, wobei Stahl und Aluminium produzierende Werke nach dem aktuellen EEG [107] jeweils der Branchenliste 1 angehören (vgl. Abschnitte 2.2.5 und 4.2.1). Darüber hinaus gilt es zu prüfen, ob die Bedingungen aus Gleichung 5.41 (analog zu Gleichung 4.34) erfüllt sind, sodass die betroffenen Werke für eine Begünstigung ($s^{Lis1} \subset s$) in Frage kommen. Diese wird gewährt insofern der Stromverbrauch größer als 1 GWh (3.600 GJ) ist und die Stromkostenintensität, welche das Verhältnis der Stromkosten zur Bruttowertschöpfung bezeichnet, mindestens den Wert ski_t^{Lis1} beträgt. Zur Berechnung der Bruttowertschöpfung werden die Personalkosten, die Abschreibungen sowie der vorläufige Gewinn $gew_{te,y,jj^{ZP},s,t}$ (vgl. Gleichung 5.50) des Werkes s im Jahr t herangezogen.

$$s \begin{cases} = s^{Lis1}, & \text{falls } q_{ii^{El},s,t}^{AKT} > 3.600 \text{ und} \\ & \frac{q_{ii^{El},s,t}^{AKT} \cdot p_{ii^{El},t}^{Ein}}{\sum_{pos \in \{2,4\}} k_{pos,te,y,jj^{ZP},s,t} + gew_{te,y,jj^{ZP},s,t}} \geq ski_t^{Lis1} \\ \neq s^{Lis1}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.41)$$

Wird mindestens eine der obigen Bedingungen nicht erfüllt, so ist die reguläre EEG-Umlage eeu_t , welche in € pro bezogenem GJ Strom angegeben ist, zu entrichten. Dies zeigt Gleichung 5.42.

$$k_{13,te,y,jj^{ZP},s,t} = q_{ii^{El},s,t}^{AKT} \cdot eeu_t, \quad \text{falls } s \neq s^{Lis1} \quad (5.42)$$

Werden beide Bedingungen eingehalten, so erfolgt eine Begrenzung der EEG-Umlage, die den Gleichungen 5.43 bis 5.46 folgend berechnet werden kann (vgl. hierzu ebenfalls die Gleichungen 4.35 bis 4.39 des IO-Teilmodells). Die Notation wird dabei dem IO-Teilmodell entnommen, wobei der Index j^{Lis1} , welcher die begünstigten Sektoren der Branchenliste 1 umfasst, durch den Index s^{Lis1} , welcher die begünstigten Werke umfasst, ersetzt wird. Innerhalb der Begrenzungen $eeg_{s^{Lis1},t}^{max}$ und $eeg_{s^{Lis1},t}^{min}$ (Gleichung 5.43) ergibt sich die EEG-Umlage für begünstigte Werke $eeg_{s^{Lis1},t}^{Lis1}$ durch die erste voll (regulär) zu bezahlende GWh zuzüglich eines festgelegten Anteils $eeu_t^{BWS,Lis1}$ an der Bruttowertschöpfung dieses Werkes (Gleichung 5.44). Die Begrenzungen errechnen sich wiederum aus der ersten voll zu bezahlenden GWh sowie dem verbleibenden Stromverbrauch, welcher im Falle der Obergrenze mit einem vorgegebenen Anteil beg_t^{max} an der regulären Umlage eeu_t (Gleichung 5.45) und im Falle der Untergrenze mit einer absoluten Begrenzung beg_t^{min} (€ pro GJ) multipliziert wird (Gleichung 5.46).

$$k_{13,te,y,jj^{ZP},s,t} = \max \left(\min \left(eeg_{s^{Lis1},t}^{Lis1}, eeg_{s^{Lis1},t}^{max} \right), eeg_{s^{Lis1},t}^{min} \right), \quad (5.43)$$

falls $s = s^{Lis1}$

$$eeg_{s^{Lis1},t}^{Lis1} = 3.600 \cdot eeu_t + eeu_t^{BWS,Lis1} \cdot \left(\sum_{pos \in \{2,4\}} k_{pos,te,y,jj^{ZP},s^{Lis1},t} + gew_{te,y,jj^{ZP},s^{Lis1},t} \right) \quad (5.44)$$

$$eeg_{s^{Lis1},t}^{max} = \left(3.600 + \left(q_{ii^{El},s^{Lis1},t}^{AKT} - 3.600 \right) \cdot beg_t^{max} \right) \cdot eeu_t \quad (5.45)$$

$$eeg_{s^{Lis1},t}^{min} = \left(3.600 \cdot eeu_t + \left(q_{ii^{El},s^{Lis1},t}^{AKT} - 3.600 \right) \cdot beg_t^{min} \right) \quad (5.46)$$

Für Werke der besonders stromintensiven Nicht-Eisen-Metallindustrie $s^{NEM} \subset s^{Lis1}$ gelten im Gegensatz zu Gleichung 5.46 gesonderte minimale Begrenzungen $beg_t^{min,NEM}$, was in Gleichung 5.47 dargestellt ist.

$$eeg_{s^{NEM},t}^{min} = \left(3.600 \cdot eeu_t + \left(q_{ii^{El},s^{NEM},t}^{AKT} - 3.600 \right) \cdot beg_t^{min,NEM} \right) \quad (5.47)$$

Die Vorläufer des aktuellen EEG aus den Jahren 2009 [105] und 2012 [106] basieren auf anderen Ansätzen zur Bestimmung der EEG-Umlage. Die hierzu notwendigen Gleichungen sind für die entsprechenden Jahre ebenfalls im Modell hinterlegt, werden jedoch an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

Bei Betrachtung der einzelnen Kostenpositionen $k_{pos,te,y,jj^{ZP},s,t}$ fällt auf, dass nicht alle direkt von den dargestellten Indizes te , y und jj^{ZP} abhängen. Letztere verdeutlichen jedoch, dass durch die Implementierung einer Technologie te an der Anlage y zur Herstellung von jj^{ZP} die Kosten über

geänderte Technologiematrizen $TEC_{s,t}$, geänderte Gesamtbedarfe $\vec{q}_{s,t}^{AKT}$ und geänderte Abschreibungen $abs_{s,t}^{AKT}$ bzw. Anlageinvestitionen $inv_{s,t}^{Werk}$ indirekt beeinflusst werden. Lediglich die Berechnung der (operativen) Personalkosten $k_{2,te,y,jj^{ZP},s,t}$ sowie der Ausgaben für die Administration $k_{8,te,y,jj^{ZP},s,t}$ erfolgt gänzlich unabhängig von der Implementierung effizienzsteigernder Technologien. Jedoch werden auch diese Kostenpositionen aus Gründen der Darstellbarkeit mit denselben Indizes angegeben.

Die Gesamtkosten eines Werkes s im Jahr t berechnen sich letztlich durch Addition aller dargestellten Kostenarten ($\sum_{pos=1}^{13} k_{pos,te,y,jj^{ZP},s,t}$).

5.2.2.6. Berechnung der Erlöse

Der Hauptteil der Erlöse wird durch den Verkauf von Zwischen- und Endprodukten generiert, was durch Gleichung 5.48 wiedergegeben wird.

$$erl_{1,te,y,jj^{ZP},s,t} = \sum_{ii^{ZP}} d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \cdot p_{ii^{ZP},t}^{Ver} \quad (5.48)$$

Die Verkaufspreise \vec{p}_t^{Ver} stimmen dabei nicht notwendigerweise mit den Einkaufspreisen \vec{p}_t^{Ein} überein, was sich z.B. im Bezug und Verkauf von Elektrizität niederschlägt. So existieren für besonders stromintensive Prozesse wie die Aluminiumelektrolyse in der Regel gesonderte Abnahmeverträge mit relativ günstigen Konditionen¹³, während der Verkauf von in einem Industriekraftwerk erzeugten Strom dem Marktpreis unterliegt. Auch die Verkaufspreise werden analog zu Gleichung 5.22 abhängig von den im IO-Teilmodell simulierten Entwicklungen jährlich angepasst. Die Berechnung der Erlöse aus dem Verkauf von Kuppelprodukten zeigt Gleichung 5.49.

$$erl_{2,te,y,jj^{ZP},s,t} = \sum_{ii^{KP}} \left| q_{ii^{KP},s,t}^{AKT} \right| \cdot p_{ii^{KP},t}^{Ver} + \sum_{ii} \left| q_{ii^{ext}+o,s,t}^{AKT} \right| \cdot p_{ii^{ext},t}^{Ver} \left| q_{ii^{KP},s,t}^{AKT} < 0 \wedge q_{ii^{ext}+o,s,t}^{AKT} < 0 \right. \quad (5.49)$$

¹³Ab einem Strombezug von 100.000 MWh pro Jahr durch ein Industrieunternehmen ist typischerweise die Einstufung in einen individuellen Sondervertrag sinnvoll (vgl. BMWi [32]).

Neben den überschüssigen Kuppelprodukten ii^{KP} (v.a. Elektrizität und Dampf), welche teilweise im Werk selbst genutzt werden, existieren weitere verkäufliche Erzeugnisse (Bsp.: in der Kokerei entstandenes Benzol oder Teer), welche keinen Einsatz in den Anlagen eines metallherzeugenden Werkes erfahren (ii^{ext}). Bei der Berechnung der durch Kuppelprodukte erzielten Erlöse gilt es zu beachten, dass ein negativer Gesamtbedarf $q_{ii,s,t}^{AKT} < 0$ den jährlichen Netto-Output eines Stoffes ii , angegeben in Tonnen oder GJ, bezeichnet.

Der sich durch die Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y ergebende Gewinn $gew_{te,y,jj^{ZP},s,t}$ berechnet sich aus den gesamten Erlösen abzüglich der Gesamtkosten (Gleichung 5.50). Weiterhin fließt er in die Bestimmung der Bruttowertschöpfung zur Berechnung der EEG-Umlage ein (vgl. Gleichungen 5.41 und 5.44), wobei die klimabezogenen Ausgaben, welche wiederum durch die EEG-Umlage bestimmt werden, hierfür nicht als Kostenposition betrachtet werden (vorläufiger Gewinn).

$$gew_{te,y,jj^{ZP},s,t} = \sum_{pos=1}^2 erl_{pos,te,y,jj^{ZP},s,t} - \sum_{pos=1}^{13} k_{pos,te,y,jj^{ZP},s,t} \quad (5.50)$$

5.2.3. Durchführung der Investitionsentscheidung

Das Kapitalwertkriterium stellt das gängigste Verfahren zur Beurteilung von Investitionsprojekten dar (vgl. Wöhe und Döring [327]). Mit diesem dynamischen Verfahren kann unter der Annahme eines Zinssatzes zi , der die Renditeerwartungen des Investors widerspiegelt, die relative Vorteilhaftigkeit einer Investition beurteilt werden. Hierzu sind zunächst die jährlichen mit der Investition einhergehenden Cashflows $caf_{te,y,jj^{ZP},s,t+\tau}$ gemäß Gleichung 5.51 aufzustellen. Diese berechnen sich über den Gewinn nach Steuern zuzüglich der Abschreibungen im Jahr $t+\tau$ [228], wobei t das Jahr der Investitionsentscheidung und kst die Höhe der Körperschaftssteuer angeben.

$$caf_{te,y,jj^{ZP},s,t+\tau} = gew_{te,y,jj^{ZP},s,t+\tau} \cdot (1 - kst) + k_{4,te,y,jj^{ZP},s,t+\tau} \quad (5.51)$$

Zur Berechnung des Kapitalwerts $kw_{te,y,jj^{ZP},s,t}$ werden die Cashflows $caf_{te,y,jj^{ZP},s,t+\tau}$ über die Lebensdauer ld_{te} der Technologie te gemäß Gleichung 5.52 abgezinst, wobei ebenfalls die im Jahr t anfallenden Investitionen $inv_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Tech}$ berücksichtigt werden. Da die Differenz der beiden Cashflows $caf_{te,y,jj^{ZP},s,t+\tau}$ und $caf_{s,t+\tau}^{oTe}$ betrachtet wird, wobei letzterer den Cashflow ohne zusätzliche Investitionen angibt, beschreibt der Kapitalwert $kw_{te,y,jj^{ZP},s,t}$ den Netto-Effekt der getätigten Investition.

$$kw_{te,y,jj^{ZP},s,t} = - inv_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Tech} + \sum_{\tau=1}^{ld_{te}} \frac{caf_{te,y,jj^{ZP},s,t+\tau} - caf_{s,t+\tau}^{oTe}}{(1+zi)^\tau} \quad (5.52)$$

Durch diese Vorgehensweise wird die Wirtschaftlichkeit aller Alternativen te , welche potenziell an den Anlagen y installiert werden können, quantifiziert. Die Kombination aus Technologie te und Anlage y , die mit dem höchsten Kapitalwert einhergeht, stellt dabei die Alternative dar, die ein rational handelnder Akteur (homo oeconomicus) realisieren würde. Sind alle Kapitalwerte negativ, so würde aus wirtschaftlichen Gründen keine Investition getätigt werden ($caf_{s,t+\tau}^{oTe}$). Da angenommen wird, dass die Entscheidungen der sich in einem verschärften internationalen Wettbewerb befindenden Metallindustrie vornehmlich durch wirtschaftliche Kriterien geprägt sind, stellt der Kapitalwert das maßgebliche Entscheidungskriterium des aktorsbasierten Teilmodells dar. Daneben wird jedoch untersucht, welche Entscheidungen ein Akteur treffen würde, für den die Minimierung der durch die Metallproduktion bedingten Auswirkungen auf das Klima oberste Priorität hat. Dies bedeutet eine Entscheidung zugunsten der Technologie te , welche die größten Treibhausgasemissionseinsparungen $e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{AKT,Min}$ (in Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr) verspricht. Ähnlich zur Berechnung des Kapitalwerts zeigt Gleichung 5.53 die Berechnung der Einsparungen aus der Differenz der Emissionen $q_{ii^{THG}+o,s,t}^{AKT}$ bei Implementierung der Technologie te und der Emissionen $q_{ii^{THG}+o,s,t}^{AKT,oTe}$ ohne zusätzliche Investitionen. Die jährliche Maximierung der Emissionseinsparungen lässt dabei auch auf das technisch mögliche Minderungspotenzial der einzelnen Werke s schließen.

$$e_{te,y,jj}^{AKT,Mind,ZP,s,t} = \sum_{ii^{THG}} \left(\left| q_{ii^{THG}+o,s,t}^{AKT} \right| - \left| q_{ii^{THG}+o,s,t}^{AKT,oTe} \right| \right) \cdot trw_{ii^{THG}} \quad (5.53)$$

Der Ablauf der Investitionsentscheidung im aktorsbasierten Teilmodell stellt sich zusammengefasst folgendermaßen dar (vgl. hierzu auch Abbildung 5.1). Um alle Alternativen vergleichen zu können, werden mittels der Gleichungen 5.14 bis 5.19 die Anpassungen der Koeffizienten für jede mögliche Kombination von Technologie te und Anlage y eines Werkes s für das Jahr t berechnet. Daraufhin werden die Änderungen an den einzelnen Anlagen durch die Gleichungen 5.1 bis 5.13 für jede Kombination in das gesamte Werk integriert. Es wird angenommen, dass die durch die Implementierung der Technologie te induzierten Auswirkungen direkt in t wirksam werden. Während die Investitionen für jede Kombination aus Technologie te und Anlage y mittels Gleichung 5.20 einmalig für das Jahr t bestimmt werden, werden die Gleichungen 5.21 bis 5.51 zur Berechnung der Kosten und Erlöse auch für die von der Investition beeinflussten Folgejahre $t + \tau$ berechnet. Pro Jahr kann in jedem Werk s maximal eine Technologie te implementiert oder erweitert werden, wobei die Entscheidung für eine Technologie entweder unter Zuhilfenahme von Gleichung 5.52 (Kapitalwert) oder von Gleichung 5.53 (Maximierung Emissionseinsparungen) durch die jeweiligen Akteure getroffen wird.¹⁴ Ist eine Technologie ausgewählt, so werden die gemäß der Gleichungen 5.1 bis 5.19 berechneten Anpassungen für das Jahr t wirksam. Die Kosten, Erlöse und Gewinne (Gleichungen 5.21 bis 5.51) werden darüber hinaus, unabhängig davon, ob eine Investition getätigt wird oder nicht, jährlich für jedes Werk s berechnet. Weiterhin werden der Gesamtbedarf sowie die Technologiematrix auf Basis der Gleichungen 5.1 bis 5.13 jährlich bestimmt, da beide nicht nur durch das Implementieren einer Technologie, sondern auch durch die Endnachfrage nach Metallprodukten beeinflusst werden. Die Endnachfrage wird dabei auf einer jährlichen Basis durch das makroökonomische Teilmodell vorgegeben. Diese und weitere wichtige Schnittstellen beider Teilmodelle stellt der folgende Abschnitt 5.3 genauer dar.

¹⁴Neben der Maximierung der direkt im Werk realisierten Emissionseinsparungen können auch die gesamten Einsparungen im Sinne eines *Carbon Footprints* maximiert werden (vgl. $e_{te,y,jj}^{Mind,ges,ZP,s,t}$ bzw. $e_{te,y,jj}^{Welt,Mind,ges,ZP,s,t}$ in Abschnitt 5.3.2).

5.3. Schnittstellen zum makroökonomischen Teilmodell

Einige zentrale Schnittstellen zwischen den beiden vorgestellten Teilmodellen wurden bereits in den Abschnitten 4.2.1, 5.1.1 und 5.2.2 aufgezeigt. So gibt bspw. Gleichung 5.22 die im IO-Teilmodell simulierten Preisänderungen an das aktorsbasierte Teilmodell weiter ($p_{ii,t}^{Ein}$, $p_{ii,t}^{Ver}$), während Gleichung 5.25 die simulierten Lohnänderungen überträgt ($pk_{s,t}$). Umgekehrt werden mittels Gleichung 5.38 die detailliert berechneten Zuteilungsmengen für Emissionsberechtigungen in der Metallherzeugung an die entsprechenden Sektoren des IO-Teilmodells weitergegeben ($zut_{jAKT,t+1}$). Tabelle 5.3 zeigt einen Überblick über alle implementierten Schnittstellen, welche im Folgenden genauer erläutert werden. Den drei aufwändigsten Schnittstellen, welche die Berücksichtigung der Technologiediffusion im IO-Teilmodell, die Berechnung der indirekten Emissionen eines Werkes sowie die Aufteilung der nachgefragten Mengen auf die einzelnen Werke umfassen, werden dabei separate Abschnitte 5.3.1 bis 5.3.3 gewidmet.

Zwar werden die Ausgaben für Ökosteuern und die EEG-Umlage bereits im IO-Teilmodell für alle Sektoren berechnet (vgl. Gleichungen 4.28 bis 4.40), jedoch wird vereinfachend angenommen, dass der Input an Energieträgern gleich verteilt über alle Unternehmen eines Sektors ist. Durch den werkspezifischen Ansatz des aktorsbasierten Teilmodells kann diese Annahme zumindest für die Sektoren der Metallherzeugung aufgehoben werden. Dies zeigen Gleichungen 5.54 und 5.55, welche die detailliert berechneten Werte für Ökosteuer $k_{12,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ und EEG-Umlage $k_{13,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ an die entsprechenden Sektoren j^{AKT} weitergeben. Maßgeblich für die Zuordnung eines Werkes s zu einem Sektor j^{AKT} ist wiederum das Endprodukt ii^{EP} .

$$oek_{jAKT,t+1} = \sum_s \sum_{ii^{EP}} k_{12,te,y,jj}^{ZP,s,t} \cdot \lambda_{jAKT,ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}} \quad (5.54)$$

$$eeg_{jAKT,t+1} = \sum_s \sum_{ii^{EP}} k_{13,te,y,jj}^{ZP,s,t} \cdot \lambda_{jAKT,ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}} \quad (5.55)$$

Tabelle 5.3.: Überblick über die Schnittstellen beider Teilmodelle

Input-Output-Teilmodell		Akteursbasiertes Teilmodell
Preisänderungen $\frac{p_{i,t}}{p_{i,t-1}}$	\Rightarrow	Preise $p_{ii,t}^{Ein}, p_{ii,t}^{Ver}$
Lohnänderungen $\Delta\pi_{ae,i,t}$	\Rightarrow	Personalkostensatz $pks_{s,t}$
Zuteilungsmengen $zut_{jAKT,t+1}$	\Leftarrow	Zuteilungsmengen $zut_{jjZP,s,t}^{AKT}$, $zut_{s,t}^{AKT,KW}$
Ausgaben für Ökosteuern $oek_{jAKT,t+1}$	\Leftarrow	Ausgaben für Ökosteuern $k_{12,te,y,jjZP,s,t}$
Ausgaben für EEG-Umlage $eej_{jAKT,t+1}$	\Leftarrow	Ausgaben für EEG-Umlage $k_{13,te,y,jjZP,s,t}$
Änderungsrate der Abschreibungen $\Delta u_{abs,jAKT,t+1}$	\Leftarrow	Abschreibungen $abs_{s,t}^{AKT}$
Koeffizientenänderungen $\Delta c_{i,jAKT,t+1}$	\Leftarrow	Technologiematrix $TEC_{s,t}$, Kraftwerkinputs $in_{iBS,y,s,t}^{KW}$
Carbon Footprint $ef_{i,b,t}^{ind}$	\Rightarrow	Indirekte Emissionen $e_{jAKT,s,t}^{ind,Min}$, $e_{s,t}^{ind,Sub}$
Mengenänderungen $\frac{q_{iAKT,t}}{q_{iAKT,t-1}}$	\Rightarrow	Verkaufsmenge $d_{iiZP,s,t}^{AKT,Ziel,ges}$
Zusätzliche Importe $imz_{jAKT,t+1}$	\Leftarrow	freie Kapazität $kap_{iiZP,s,t}^{frei}$, Verkaufsmenge $d_{iiZP,t}^{AKT,Ziel,ges}$

Auch bezüglich der Abschreibungen (vgl. Gleichung 4.21) kann die Detailtiefe des IO-Teilmodells für die metallergezeugenden Sektoren verfeinert werden. In Gleichung 5.56 werden daher die Änderungen der Abschreibungen, welche durch die Investitionen der Werke s in effizienzsteigernde Technologien te beeinflusst werden (vgl. Gleichung 5.27), auf die Sektoren j^{AKT} übertragen.

$$\Delta u_{abs,j^{AKT},t+1} = \frac{\sum_s \sum_{ii^{EP}} abs_{s,t}^{AKT} \cdot \lambda_{j^{AKT},ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}}}{\sum_s \sum_{ii^{EP}} abs_{s,t-1}^{AKT} \cdot \lambda_{j^{AKT},ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}}} \quad (5.56)$$

5.3.1. Berücksichtigung der Technologiediffusion in den Koeffizienten des makroökonomischen Teilmodells

Um weiterhin die im aktorsbasierten Teilmodell endogen simulierte Technologiediffusion auf das makroökonomische Teilmodell zu übertragen, wird zunächst die durchschnittliche Technologiematrix TEC_t^{avg} (*avg* : *average*) mittels Gleichung 5.57 berechnet. Letztere repräsentiert die über die produzierten Mengen $q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}$ der einzelnen Werke s gemittelte Produktionstechnologie und wird somit auch durch die Investitionen in effizienzsteigernde Technologien beeinflusst. Die extern bezogenen und intern produzierten Stoffe ii bzw. $ii + o$ werden hierfür zusammengefasst, da die technischen Koeffizienten $c_{i,j^{AKT},t}$ der Sektoren j^{AKT} aus dem IO-Teilmodell diesbezüglich keine Unterscheidung vornehmen.¹⁵

$$tec_{ii,jj^{ZP},t}^{avg} = \frac{\sum_s (tec_{ii,jj^{ZP},s,t} + tec_{ii+o,jj^{ZP},s,t}) \cdot q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}}{\sum_s q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}} \quad (5.57)$$

Für eine Übertragung der durchschnittlichen Technologiematrix TEC_t^{avg} auf die technischen Koeffizienten $c_{i,j^{AKT},t}$ der Sektoren j^{AKT} müssen die einzelnen Stoffe ii und jj^{ZP} den Sektoren i und j^{AKT} zugeordnet werden, was mittels der Gleichungen 5.58 und 5.59 erfolgt.

¹⁵Zwar werden im IO-Teilmodell auch importierte Güter betrachtet, diese werden jedoch in einer separaten Zeile der Primärinputs $g = imp$ (vgl. Abschnitt 4.1.1) ausgewiesen, so dass die Matrix der technischen Koeffizienten C_t die importierten und im Inland bereitgestellten Vorleistungen zusammenfasst und somit den gesamten physischen Direktbedarf pro Output eines Sektors wiedergibt.

$$tec_{i,j^{AKT},t}^{PB,PB} = \frac{\sum_{ii} tec_{ii,j^{AKT},t}^{Stoff,PB} \cdot p_{ii,t^{BAS}}^{Ein} \cdot \lambda_{i,ii}}{\sum_{ii} p_{ii,t^{BAS}}^{Ein} \cdot \lambda_{i,ii}} \quad (5.59)$$

Da die Änderungen der technischen Koeffizienten $\Delta c_{i,j^{AKT},t+1}$ (vgl. Gleichung 4.15) auf fiktiven physischen Einheiten basieren, werden letztlich die relativen Änderungen der Matrix $tec_{i,j^{AKT},t}^{PB,PB}$ mittels Gleichung 5.60 an das makroökonomische Teilmodell weitergegeben.

$$\Delta c_{i,j^{AKT},t+1} = \frac{tec_{i,j^{AKT},t}^{PB,PB}}{tec_{i,j^{AKT},t-1}^{PB,PB}} \quad (5.60)$$

Die Koeffizientenänderungen der Industriekraftwerke sind nicht Bestandteil der Technologiematrix und werden daher separat berücksichtigt. Da nur ein kleiner Teil des gesamten Kraftwerksparks in Deutschland durch die Simulation abgedeckt ist, werden zunächst mittels der Gleichungen 5.61 und 5.62 die Anteile der in den Industriekraftwerken eingesetzten Energieträger $Ant_{i^{ET}}^{KW,El}$ bzw. $Ant_{i^{ET}}^{KW,FW}$ am gesamten energetischen Input für den Elektrizitätssektor j^{El} und den Fernwärmesektor $j^{FW} \subset j$ berechnet. Die Energieträgermatrix ENT_t , welche den sektoralen Energieträgermix wiedergibt, wird hierzu in GJ umgerechnet. Der Anteil an zur Elektrizitäts- bzw. Fernwärmeerzeugung eingesetzter Energieträger bestimmt sich über das jeweilige Verhältnis der Wirkungsgrade eff^{El} bzw. eff^{Da} .

$$Ant_{i^{ET}}^{KW,El} = \frac{\sum_{ii^{BS}} \sum_s \sum_y in_{ii^{BS},y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{i^{ET},ii^{BS}} \cdot \frac{eff^{El}}{eff^{El}+eff^{Da}}}{ent_{i^{ET},j^{El},t} \cdot 1.000} \quad (5.61)$$

$$Ant_{i^{ET}}^{KW,FW} = \frac{\sum_{ii^{BS}} \sum_s \sum_y in_{ii^{BS},y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{i^{ET},ii^{BS}} \cdot \frac{eff^{Da}}{eff^{El}+eff^{Da}}}{ent_{i^{ET},j^{FW},t} \cdot 1.000} \quad (5.62)$$

Während die Änderungen der Energieträgerinputs für die nicht durch die Simulation abgedeckten Kraftwerke exogen durch $\Delta c_{i^{ET},j^{El},t+1}$ bzw. $\Delta c_{i^{ET},j^{FW},t+1}$ vorgegeben werden, werden in den Gleichungen 5.63 und 5.64 weiterhin die endogen berechneten relativen Änderungen in der Inputstruktur der Industriekraftwerke an das IO-Teilmodell weitergegeben.

$$\begin{aligned} \Delta C_{iET,j^{El},t+1} &= \Delta C_{iET,j^{El},t+1} \cdot \left(1 - Ant_{iET}^{KW,El}\right) \\ &+ \frac{\sum_{ii^{BS}} \sum_s \sum_y in_{ii^{BS},y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{iET,ii^{BS}}}{\sum_{ii^{BS}} \sum_s \sum_y in_{ii^{BS},y,s,t-1}^{KW} \cdot \lambda_{iET,ii^{BS}}} \quad (5.63) \\ &\cdot Ant_{iET}^{KW,El} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_{iET,j^{FW},t+1} &= \Delta C_{iET,j^{FW},t+1} \cdot \left(1 - Ant_{iET}^{KW,FW}\right) \\ &+ \frac{\sum_{ii^{BS}} \sum_s \sum_y in_{ii^{BS},y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{iET,ii^{BS}}}{\sum_{ii^{BS}} \sum_s \sum_y in_{ii^{BS},y,s,t-1}^{KW} \cdot \lambda_{iET,ii^{BS}}} \quad (5.64) \\ &\cdot Ant_{iET}^{KW,FW} \end{aligned}$$

5.3.2. Ableitung der indirekten Emissionen eines Werkes

In Abschnitt 5.2.3 wurden bisher lediglich die direkten durch einzelne Technologien te induzierten Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{AKT,Mind}$ eines Werkes s berechnet, jedoch sämtliche indirekten Emissionen, welche bspw. durch die Bereitstellung von außerhalb des Werkes s erzeugten Vorprodukten generiert werden, vernachlässigt. Um diese Lücke zu schließen und eine ganzheitliche Bewertung einzelner effizienzsteigernder Technologien zu ermöglichen, werden die Treibhausgasemissionen aus dem aktorsbasierten Teilmodell um die im IO-Teilmodell berechneten ergänzt. Zunächst wird hierzu die durchschnittliche Technologiematrix $tec_{ii,jj^{ZP},s,t}^{avg,Tech}$ mittels Gleichung 5.65 aufgestellt, wobei das Superskript $Tech$ darauf hindeutet, dass die Effekte einer zusätzlich im Werk s implementierten Technologie te berücksichtigt werden, wohingegen die Matrix $tec_{ii,jj^{ZP},t}^{avg}$ die durchschnittliche Technologiematrix vor einer etwaigen Investitionsentscheidung darstellt. Analog zu Gleichung 5.57 werden die Einträge der Matrix $TEC_{s,t}^{Tech}$, welche die durch eine Technologie te geänderte Technologiematrix eines Werkes s repräsentiert, mit der Produktionsmenge dieses Werkes gewichtet. Gleiches gilt für die Technologiematrix vor der Investitionsentscheidung $TEC_{s,t}$. Somit wird durch Gleichung 5.65 die durchschnittliche Technologiematrix $tec_{ii,jj^{ZP},t}^{avg}$ lediglich um die abweichenden Koeffizienten eines Werkes s , in welchem eine zusätzliche Technologie te implementiert wird, geändert, weshalb $tec_{ii,jj^{ZP},t}^{avg}$ in der Regel nur geringfügig von $tec_{ii,jj^{ZP},s,t}^{avg,Tech}$ abweicht.

Dieses Vorgehen ist notwendig, um den Effekt einer bestimmten Technologie te auf den *Carbon Footprint* eines bestimmten Werkes s isoliert quantifizieren zu können, was im Folgenden aufgezeigt wird.

$$\begin{aligned}
 tec_{ii,jj^{ZP},s,t}^{avg,Tech} = & tec_{ii,jj^{ZP},t}^{avg} \\
 & + \frac{\left(tec_{ii,jj^{ZP},s,t}^{Tech} + tec_{ii+o,jj^{ZP},s,t}^{Tech}\right) \cdot q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}}{\sum_s q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}} \\
 & - \frac{\left(tec_{ii,jj^{ZP},s,t} + tec_{ii+o,jj^{ZP},s,t}\right) \cdot q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}}{\sum_s q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}}
 \end{aligned} \quad (5.65)$$

Die durch das Implementieren einer Technologie am Werk s induzierten Änderungen der technischen Koeffizienten $\Delta c_{i,j^{AKT},s,t}^{Tech}$ werden in Gleichung 5.66 analog zu Gleichung 5.60 berechnet. Die Matrix $TEC_{s,t}^{PB,PB,Tech}$ wird dabei aus $TEC_{s,t}^{avg,Tech}$ abgeleitet und entspricht der sektoralen Struktur des IO-Teilmodells, wobei wiederum die Gleichungen 5.58 und 5.59 verwendet werden. Auch hier zeigen sich nur kleine Abweichungen, so dass $\Delta c_{i,j^{AKT},s,t}^{Tech} \approx 1$. Dies liegt darin begründet, dass der Einfluss des zusätzlichen Implementierens von nur einer Technologie an einem Werk s lediglich sehr geringe Einflüsse auf die Inputstruktur eines gesamten Sektors hat. Die dadurch hervorgerufenen Änderungen der Treibhausgasemissionen liegen jedoch im Bezug auf das analysierte Werk s in einer nicht zu vernachlässigenden Größenordnung (vgl. hierzu auch die Ergebnisse in Kapitel 7).

$$\Delta c_{i,j^{AKT},s,t}^{Tech} = \frac{tec_{i,j^{AKT},s,t}^{PB,PB,Tech}}{tec_{i,j^{AKT},t}^{PB,PB}} \quad (5.66)$$

Zur Berechnung des Einflusses etwaiger Industriekraftwerke, welche nicht durch die Technologiematrix repräsentiert werden, wird zunächst analog zu den Gleichungen 5.61 und 5.62 der Anteil der an einem bestimmten Werk s in den Industriekraftwerken eingesetzten Energieträger $Ant_{iET,s}^{KW,El,Werk}$ bzw. $Ant_{iET,s}^{KW,FW,Werk}$ am gesamten Input des Elektrizitäts- bzw. Fernwärmesektors bestimmt (Gleichungen 5.67 und 5.68).

$$Ant_{iET,s}^{KW,El,Werk} = \frac{\sum_{iiBS} \sum_y in_{iiBS,y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{iET,iiBS} \cdot \frac{eff^{El}}{eff^{El}+eff^{Da}}}{ent_{iET,jEl,t} \cdot 1.000} \quad (5.67)$$

$$Ant_{iET,s}^{KW,FW,Werk} = \frac{\sum_{iiBS} \sum_y in_{iiBS,y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{iET,iiBS} \cdot \frac{eff^{Da}}{eff^{El}+eff^{Da}}}{ent_{iET,jFW,t} \cdot 1.000} \quad (5.68)$$

Die durch das Implementieren einer Technologie hervorgerufenen Änderungen der Inputstruktur $\Delta C_{iET,jEl,s,t}^{Tech}$ bzw. $\Delta C_{iET,jFW,s,t}^{Tech}$ in den beiden Sektoren j^{El} bzw. j^{FW} werden durch die Gleichungen 5.69 und 5.70 wiedergegeben. In Analogie zu den Gleichungen 5.63 und 5.64 gewichten diese die Änderungen der Inputstruktur in einem Kraftwerk mit dem Anteil dieses Kraftwerks am Energieträgerinput des gesamten Sektors $Ant_{iET,s}^{KW,El,Werk}$ bzw. $Ant_{iET,s}^{KW,FW,Werk}$, wobei die restlichen Inputs konstant gehalten werden, um den Netto-Effekt einer implementierten Maßnahme quantifizieren zu können. $in_{ii,y,s,t}^{KW,Tech}$ stellt somit die jährlichen Inputs eines Kraftwerks y nach Implementierung einer Maßnahme dar, während $in_{ii,y,s,t}^{KW}$ die Inputs vor der Investitionsentscheidung bezeichnet.

$$\begin{aligned} \Delta C_{iET,jEl,s,t}^{Tech} &= 1 \cdot \left(1 - Ant_{iET,s}^{KW,El,Werk} \right) \\ &+ \frac{\sum_{iiBS} \sum_y in_{iiBS,y,s,t}^{KW,Tech} \cdot \lambda_{iET,iiBS}}{\sum_{iiBS} \sum_y in_{iiBS,y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{iET,iiBS}} \\ &\cdot Ant_{iET,s}^{KW,El,Werk} \end{aligned} \quad (5.69)$$

$$\begin{aligned} \Delta C_{iET,jFW,s,t}^{Tech} &= 1 \cdot \left(1 - Ant_{iET,s}^{KW,FW,Werk} \right) \\ &+ \frac{\sum_{iiBS} \sum_y in_{iiBS,y,s,t}^{KW,Tech} \cdot \lambda_{iET,iiBS}}{\sum_{iiBS} \sum_y in_{iiBS,y,s,t}^{KW} \cdot \lambda_{iET,iiBS}} \\ &\cdot Ant_{iET,s}^{KW,FW,Werk} \end{aligned} \quad (5.70)$$

Die nach Implementierung einer Technologie am Werk s angepasste physische Direktbedarfsmatrix $C_{s,t}^{Tech}$ ergibt sich schließlich aus der ursprünglichen Direktbedarfsmatrix C_t durch Berücksichtigung der Änderungen

gemäß Gleichung 5.71. Dabei wird $\Delta c_{i,j,s,t}^{Tech} = 1$ für alle nicht durch die Technologie adressierten Sektoren und Produkte gesetzt.

$$c_{i,j,s,t}^{Tech} = c_{i,j,t} \cdot \Delta c_{i,j,s,t}^{Tech} \quad (5.71)$$

Um auch die Auswirkungen auf den *Carbon Footprint* durch aus dem Ausland bezogene Vorprodukte quantifizieren zu können, wird in Gleichung 5.72 die inländische Matrix um den importierten Anteil erweitert. Wie im Falle des IO-Teilmodells (vgl. Gleichung 4.74 in Abschnitt 4.2.3) geschieht dies unter der Annahme, dass im Ausland dieselbe Produktionstechnologie wie im Inland eingesetzt wird (*domestic technology assumption*), wobei die durch eine einzelne Technologie hervorgerufenen Änderungen im Inland nicht auf die globale Ebene hochskaliert werden.

$$c_{i,j,s,t}^{Welt,Tech} = c_{i,j,s,t}^{Tech} + c_{i,j,t} \cdot \frac{u_{imp,j,t}}{1 - u_{imp,j,t}} \quad (5.72)$$

Über die Leontief-Inversen der beiden abgeleiteten physischen Direktbedarfsmatrizen $C_{s,t}^{Tech}$ und $C_{s,t}^{Welt,Tech}$ sowie die in Tonnen CO₂-Äquivalente pro physischer Einheit notierenden Emissionsfaktoren $ef_{i,b,t}$ aller Treibhausgase b , kann nun der durch das Herstellen einer physischen Einheit von i im Jahr t erzeugte *Carbon Footprint* berechnet werden (vgl. hierzu die Gleichungen 4.72 und 4.78 in Abschnitt 4.2.3). Dabei bezeichnet $ef_{i,b,s,t}^{ind,Tech}$ den im Inland durch das Treibhausgas b erzeugten *Carbon Footprint* unter Berücksichtigung einer zusätzlich implementierten Technologie, während $ef_{i,b,s,t}^{Welt,ind,Tech}$ den weltweit erzeugten *Carbon Footprint* angibt.

Bevor jedoch mittels Gleichung 5.74 die durch eine Änderung der Vorleistungsstruktur indirekt induzierten Emissionseinsparungen berechnet werden, werden zunächst die direkten durch den IO-Ansatz quantifizierten Einsparungen berechnet. Letztere können gemäß Gleichung 5.53 detaillierter auf der Prozessebene des aktorsbasierten Teilmodells bestimmt werden ($e_{te,y,jjZP,s,t}^{AKT, Mind}$) und müssen daher vom gesamtem *Carbon Footprint*, welcher sowohl direkte als auch indirekt induzierte Treibhausgasemissionen berücksichtigt, abgezogen werden.

$$\begin{aligned}
e_{j^{AKT},s,t}^{dir, Mind} &= \sum_{i^{AKT}} \left(C_{i^{AKT},j^{AKT},t}^{Inverse} - C_{i^{AKT},j^{AKT},s,t}^{Inverse,Tech} \right) \\
&\cdot \sum_b e f_{i^{AKT},b,t} \cdot q_{j^{AKT},t} \\
&\cdot \sum_{jj^{EP}} \lambda_{j^{AKT},jj^{EP}} \cdot \omega_{s,jj^{EP}} \tag{5.73} \\
\text{mit } C_t^{Inverse} &= (I - C_t)^{-1} \\
\text{und } C_{s,t}^{Inverse,Tech} &= (I - C_{s,t}^{Tech})^{-1}
\end{aligned}$$

Aus diesem Grund berechnet Gleichung 5.73 die Differenz der *Carbon Footprints* für alle dem Sektor j^{AKT} zuliefernden Sektoren i^{AKT} , welche durch das aktorsbasierte Teilmodell bereits abgedeckt sind.¹⁶ Die Differenz beinhaltet somit die direkten am jeweiligen Standort generierten Emissionsminderungen $e_{j^{AKT},s,t}^{dir, Mind}$ der einzelnen Werke s , induziert durch das Implementieren einer bestimmten Technologie. Die Emissionsminderungen werden wiederum dem Sektor j^{AKT} zugeordnet, welcher das Endprodukt jj^{EP} des Werkes s enthält.

Die indirekt im Inland eingesparten Treibhausgasemissionen $e_{j^{AKT},s,t}^{ind, Mind}$ lassen sich schließlich durch Gleichung 5.74 berechnen. Hierzu wird die Differenz der direkt und indirekt durch den Sektor j^{AKT} emittierten Treibhausgase mit und ohne zusätzlich implementierter Technologie bestimmt und die direkt dem Sektor j^{AKT} zuordenbaren Emissionsminderungen abgezogen. Letztere werden über $e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{AKT, Mind}$ detaillierter im aktorsbasierten Teilmodell quantifiziert.

¹⁶So wird z.B. der Sektor *Kokereierzeugnisse*, welcher Vorleistungen an den Sektor *Herstellung von Roheisen, Stahl, Rohre und Halbzeug daraus* liefert, vom aktorsbasierten Teilmodell abgedeckt (Anlagentyp: Kokerei). Etwaige Reduktionen der Koke-remissionen werden daher detailliert im aktorsbasierten Teilmodell berücksichtigt und dürfen zur Vermeidung von Doppelzählungen nicht zusätzlich im IO-Teilmodell berechnet werden.

$$e_{jAKT,s,t}^{ind,Mind} = \left(\sum_b \left(e_{jAKT,b,t}^{find} - e_{jAKT,b,s,t}^{ind,Tech} \right) \right) \cdot q_{jAKT,t} - e_{jAKT,s,t}^{dir,Mind} \quad (5.74)$$

Dieselben Betrachtungen werden ebenfalls für die global eingesparten indirekten Emissionen durchgeführt, wofür analog zu den Gleichungen 5.73 und 5.74 $e_{jAKT,s,t}^{Welt,dir,Mind}$ und $e_{jAKT,s,t}^{Welt,ind,Mind}$ zu bestimmen sind.

Die bisherigen Ausführungen erlauben die Berechnung der durch einzelne Technologien te induzierten, aus einer geänderten Vorleistungsstruktur resultierenden, jährlichen Einsparungen indirekter Treibhausgasemissionen. Auch etwaige Steigerungen indirekter Emissionen, generiert durch den Einsatz zusätzlicher Vorprodukte, können auf diese Weise berechnet werden. Damit sind jedoch noch nicht die durch eine Änderung der Outputstruktur entstehenden Einsparpotenziale abgedeckt. So können anfallende Kuppelprodukte entsprechende Produkte aus primären Produktionsrouten substituieren, was zu indirekten Emissionsminderungen $e_{s,t}^{ind,Sub}$ in anderen Sektoren führt. Dies gibt Gleichung 5.75 wieder.

Da sich die betrachteten energieeffizienzsteigernden Technologien vornehmlich auf energetische Größen auswirken, umfassen die zusätzlich entstehenden Kuppelprodukte vor allem Elektrizität ii^{El} und Dampf ii^{Da} (Wärme). Während die durch eine Reduktion des Einsatzes dieser Stoffe generierten Emissionsminderungen im Elektrizitäts- und Fernwärmesektor i^{El} bzw. i^{FW} bereits durch $e_{jAKT,s,t}^{ind,Mind}$ abgedeckt sind, wurden die Auswirkungen zusätzlicher Mengen an Kuppelprodukten ($tec_{ii^{KP},jj^{ZP},s,t}^{Tech} > 0 \wedge tec_{ii^{KP},jj^{ZP},s,t}^{Tech} > tec_{ii^{KP},jj^{ZP},s,t}$) bisher vernachlässigt (vgl. Gleichung 5.58). Aus diesem Grund berechnet Gleichung 5.75 den *Carbon Footprint* der beiden Sektoren und gewichtet diesen mit den jeweiligen Anteilen der durch Technologie te zusätzlich erzeugten Kuppelprodukte ($\Delta ok_{te,ii^{KP},jj^{ZP}}^{tech} > 0$) am gesamten sektoralen Output, welcher dadurch letztlich reduziert werden kann. Die zusätzlich erzeugten Kuppelprodukte ergeben sich dabei aus der Differenz der Technologiematrizen mit und ohne implementierter Technologie te , während sich der sektorale Output über die Zeilensummen der Energieträgermatrix ENT_t bestimmt. Der Faktor

1.000 berücksichtigt die in GJ pro Tonne notierenden Technologiematrizen sowie die in TJ notierende Energieträgermatrix. Änderungen in der Outputstruktur des Kraftwerks müssen hingegen nicht separat betrachtet werden, da eine konstante Strom- und Dampferzeugung angenommen wird (vgl. Gleichung 5.11).

$$\begin{aligned}
e_{s,t}^{ind,Sub} &= \sum_b e_{i^{El},b,t}^{ind} \cdot q_{i^{El},t} \cdot \\
&\left(1 - \frac{\sum_j ent_{i^{El},j,t} - \frac{(tec_{ii^{El},jj^{ZP},s,t}^{Tech} - tec_{ii^{El},jj^{ZP},s,t}) \cdot q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}}{1.000}}{\sum_j ent_{i^{El},j,t}} \right) \\
&+ \sum_b e_{i^{FW},b,t}^{ind} \cdot q_{i^{FW},t} \cdot \\
&\left(1 - \frac{\sum_j ent_{i^{FW},j,t} - \frac{(tec_{ii^{Da},jj^{ZP},s,t}^{Tech} - tec_{ii^{Da},jj^{ZP},s,t}) \cdot q_{jj^{ZP},s,t}^{AKT}}{1.000}}{\sum_j ent_{i^{FW},j,t}} \right), \tag{5.75} \\
&\text{falls } \left(\Delta ok_{te,ii^{El},jj^{ZP}}^{tech} > 0 \wedge tec_{ii^{El},jj^{ZP},s,t}^{Tech} > 0 \right) \\
&\vee \left(\Delta ok_{te,ii^{Da},jj^{ZP}}^{tech} > 0 \wedge tec_{ii^{Da},jj^{ZP},s,t}^{Tech} > 0 \right)
\end{aligned}$$

Die gesamte durch eine an der Anlage y des Werkes s implementierte Technologie te direkt und indirekt induzierte Emissionsminderung $e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Mind,ges}$ bzw. $e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Welt,Mind,ges}$ ergibt sich gemäß Gleichung 5.76 für die inländischen Treibhausgasemissionen und gemäß Gleichung 5.77 für den internationalen Fall. Sie besteht aus den direkt am Standort vermiedenen Emissionen, den indirekten Einsparungen aufgrund des geringeren Einsatzes an Vorprodukten und Substitutionseffekten basierend auf der Entstehung zusätzlicher Kuppelprodukte. Dabei ist anzumerken, dass $e_{j^{AKT},s,t}^{ind,Mind}$ bzw. $e_{j^{AKT},s,t}^{Welt,ind,Mind}$ nur für einen Sektor j^{AKT} ungleich Null ist, nämlich für den Sektor, welcher dem Endprodukt ii^{EP} des Werkes s entspricht (vgl. Gleichung 5.73).

$$e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Mind,ges} = e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{AKT,Mind} + \sum_{j^{AKT}} e_{j^{AKT},s,t}^{ind,Mind} + e_{s,t}^{ind,Sub} \quad (5.76)$$

$$e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Welt,Mind,ges} = e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{AKT,Mind} + \sum_{j^{AKT}} e_{j^{AKT},s,t}^{Welt,ind,Mind} + e_{s,t}^{ind,Sub} \quad (5.77)$$

5.3.3. Aufteilung der nachgefragten Mengen auf die einzelnen Werke

Allgemein liefert das IO-Teilmodell die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, denen sich die im aktorsbasierten Teilmodell simulierte metall-erzeugenden Werke gegenübersehen. So werden auch die nachgefragten physischen Mengen, der Gesamtbedarf \vec{q}_t , im IO-Teilmodell abhängig von der Endnachfrage bestimmt. Die in den Sektoren i^{AKT} des aktorsbasierten Teilmodells zu produzierenden Mengen werden aus diesem Gesamtbedarf gemäß Gleichung 5.78 abgeleitet. Dabei werden nur relative Änderungen weitergegeben, da es sich bei den physischen Mengen des IO-Teilmodells um fiktive physische Einheiten handelt (vgl. Abschnitt 4.2.1), während die jährlich insgesamt nachgefragte Menge $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges}$ eines Zwischenprodukts ii^{ZP} in Tonnen angegeben ist. Ein Sektor i^{AKT} kann mehrere Zwischenprodukte ii^{ZP} umfassen, weshalb für einige Zwischenprodukte dieselben prozentualen Änderungen in der Nachfrage maßgeblich sind.

$$d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} = \sum_s d_{ii^{ZP},s,t-1}^{AKT} \cdot \sum_{i^{AKT}} \frac{q_{i^{AKT},t}}{q_{i^{AKT},t-1}} \cdot \lambda_{i^{AKT},ii^{ZP}} \quad (5.78)$$

Die insgesamt nachgefragte Menge $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges}$ an Stahl- und Aluminiumprodukten sowie an für deren Produktion notwendigen Zwischenprodukten ist nun auf die einzelnen Werke s aufzuteilen. Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass die Produktionsmengen der Werke gleichermaßen erhöht oder erniedrigt werden. Verschiebungen von Produktionsmengen, induziert durch Wettbewerbseffekte, werden somit vernachlässigt. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass sich die in den einzelnen Werken hergestellten

Produkte sowie deren Eigenschaften teilweise erheblich unterscheiden, wodurch die einzelnen Produkte nicht ohne Weiteres substituierbar sind. Da die Produktionsmengen aufgrund der zur Verfügung stehenden Kapazitäten nicht beliebig angepasst werden können, wird ein iterativer Ansatz verfolgt, der die noch nicht genutzte Kapazität $kap_{ii^{ZP},s,t}^{frei}$ eines Werkes s zur Produktion des Zwischenprodukts ii^{ZP} berücksichtigt. Die ungenutzte Kapazität berechnet sich in Gleichung 5.79 aus der Jahreskapazität aller zur Produktion von ii^{ZP} einsetzbaren Anlagen y abzüglich der bereits genutzten Kapazität zur Herstellung des Zwischenprodukts.

$$kap_{ii^{ZP},s,t}^{frei} = \sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} - q_{ii^{ZP},s,t-1}^{AKT} \quad (5.79)$$

Die durch den im Folgenden vorgestellten iterativen Ansatz schrittweise generierte Lösung muss der Bedingung 5.80 genügen. Letztere gewährleistet, dass die in allen simulierten Werken s zum Verkauf hergestellten Mengen des Zwischenprodukts ii^{ZP} der insgesamt nachgefragten Menge entsprechen.

$$d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} = \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \quad (5.80)$$

Gilt $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} > \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ für ein ii^{ZP} , so ist Gleichung 5.81 zur Berechnung der vorzugebenden Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel}$ des Werkes s maßgeblich. Diese erhöht die Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ eines Werkes s um die insgesamt fehlende Menge zur Befriedigung des Bedarfs $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges}$, gewichtet mit dem Anteil der noch freien Kapazität des Werkes s an der gesamten zur Produktion von ii^{ZP} zur Verfügung stehenden freien Kapazität.

$$d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel} = d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} + \left(d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} - \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \right) \cdot \frac{kap_{ii^{ZP},s,t}^{frei}}{\sum_s kap_{ii^{ZP},s,t}^{frei}} \quad (5.81)$$

Die auf diese Weise neu kalkulierte vorzugebende Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel}$ fließt in die Berechnung der Technologiematrizen und der tatsächlichen Verkaufsmengen $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ ein (vgl. Gleichungen 5.1 bis 5.8). Kann die Zielverkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel}$ aufgrund der Kapazitätsrestriktion nicht eingehalten werden, so wird $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} < d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel}$ gesetzt (vgl. Gleichung 5.7) und die freie Kapazität gemäß Gleichung 5.79 mit den aktualisierten Produktionsmengen $q_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ neu berechnet.

Gilt hingegen $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} < \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ für ein ii^{ZP} , so ist Gleichung 5.82 zur Berechnung der Zielverkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel}$ des Werkes s maßgeblich. Die gesamte überschüssige Verkaufsmenge wird hierbei von der ursprünglichen Verkaufsmenge eines Werkes s abgezogen, wobei eine Gewichtung erfolgt, die den Anteil der Verkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ dieses Werkes an der insgesamt durch die Werke verkauften Menge wiedergibt.

$$d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel} = d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} + \left(d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} - \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \right) \cdot \frac{d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}}{\sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}} \quad (5.82)$$

Daran anschließend werden wiederum die Technologiematrizen und tatsächlichen Verkaufsmengen $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ der Werke neu berechnet (Gleichungen 5.1 bis 5.8) sowie die freien Kapazitäten zur Produktion von ii^{ZP} neu bestimmt (Gleichung 5.79).

Nachdem die Schritte 5.81 bzw. 5.82 für alle ii^{ZP} , die Bedingung 5.80 nicht einhalten, sowie für alle Werke, welche ii^{ZP} herstellen, ausgeführt wurden, wird weiterhin folgende Bedingung 5.83 geprüft. Diese gibt Aufschluss darüber, ob die insgesamt nachgefragte Menge $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges}$ überhaupt durch die Werke eines Sektors bereitgestellt werden kann.

$$d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} > \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \wedge \sum_s kap_{ii^{ZP},s,t}^{frei} = 0 \quad (5.83)$$

Ist Bedingung 5.83 erfüllt, so sind die Kapazitäten zur inländischen Produktion von ii^{ZP} nicht ausreichend und Gleichung 5.84 wird berechnet. Letztere gibt die zusätzlich notwendigen Importe $imz_{j^{AKT},t}$ als Verhältnis zu den im Inland produzierten und verkauften Mengen an. Dabei gilt zu beachten, dass die fehlende und zu importierende Menge $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} - \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ nur für Zwischenprodukte mit bereits erschöpfter Kapazität ($\sum_s kap_{ii^{ZP},s,t}^{frei} = 0$) berechnet wird, während in die Bestimmung der im Inland produzierten und verkauften Menge alle Zwischenprodukte jj^{ZP} einfließen, die dem gleichen Sektor j^{AKT} zugeordnet werden können. Auf diese Weise können die zusätzlich notwendigen Importe in Gleichung 4.19 des IO-Teilmodells in das Verhältnis zu den im Inland produzierten Mengen gesetzt werden.

$$imz_{j^{AKT},t} = \frac{\sum_{ii^{ZP}} \left(d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} - \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \right) \cdot \lambda_{j^{AKT},ii^{ZP}}}{\sum_{jj^{ZP}} \sum_s d_{jj^{ZP},s,t-1}^{AKT} \cdot \lambda_{j^{AKT},jj^{ZP}}} \quad (5.84)$$

| für ii^{ZP} gilt $\sum_s kap_{ii^{ZP},s,t}^{frei} = 0$

Für die Zwischenprodukte ii^{ZP} , für die der Importanteil erhöht wurde, wird darüber hinaus $d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} = \sum_s d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT}$ gesetzt, wodurch Bedingung 5.80 erfüllt ist.

Zusammengefasst können mit den durch die Schnittstellen zum IO-Teilmodell jährlich angepassten Parametern die Investitionsentscheidungen des aktorsbasierten Teilmodells in einem konsistenten wirtschaftlichen Rahmen getroffen werden. Die Parameter, welche die Investitionsentscheidung beeinflussen, umfassen dabei die aktualisierten Preise $\bar{p}^{Ein,t}$ bzw. $\bar{p}^{Ver,t}$, den aktualisierten Personalkostensatz $pks_{s,t}$, die berechneten indirekten Emissionen $e_{j^{AKT},s,t}^{ind,Mind}$, $e_{j^{AKT},s,t}^{Welt,ind,Mind}$ bzw. $e_{s,t}^{ind,Sub}$ sowie die aktualisierte Zielverkaufsmenge $d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel,ges}$.

5.4. Zusammenfassung und kritische Würdigung des technisch-betriebswirtschaftlichen Teilmodells

Das in diesem Kapitel entwickelte aktorsbasierte Teilmodell stellt die Investitionsentscheidungen einzelner Werke bezüglich energieeffizienzsteigernder Technologien in den Vordergrund. Auf diese Weise kann die Technologiediffusion sowie deren Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen und die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Werke abhängig von verschiedenen klimapolitischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen simuliert werden.

Ein wesentlicher Vorteil des gewählten produktionstheoretischen Ansatzes, welcher um verfahrenstechnische Aspekte wie Kohlenstoff- und Energiebilanzen erweitert wurde, liegt in der technisch fundierten Modellierung der Produktionsprozesse auf Werks- bzw. Prozessebene. Gleichzeitig erlaubt dieser Ansatz die nahezu vollständige Abdeckung aller relevanten anthropogenen Emissionsquellen der Metallerzeugung in Deutschland und ist nicht auf einzelne Prozesse oder Werke beschränkt.

Die aufgezeigten Schnittstellen geben den hohen Endogenisierungsgrad der beiden Teilmodelle wieder. Während das IO-Teilmodell die makroökonomischen Rahmenbedingungen schafft, welchen sich alle Sektoren gegenübersehen, bildet das aktorsbasierte Teilmodell die technische und wirtschaftliche Entwicklung der metallerzeugenden Sektoren vergleichsweise detailliert ab. Somit können zumindest für die im aktorsbasierten Teilmodell repräsentierten Sektoren die simulierten technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen in das IO-Teilmodell übernommen werden, wohingegen die Entwicklung der verbleibenden Sektoren durch exogene Vorgaben simuliert wird.

Weiterhin zeigen sich jedoch auch einige Nachteile des in diesem Kapitel dargestellten Ansatzes. Analog zum IO-Teilmodell lassen sich auch beim aktorsbasierten Teilmodell zeitliche Inkonsistenzen hinsichtlich der Modellierung feststellen, was sich in den dargestellten Schnittstellen (Abschnitt 5.3) äußert. So werden zwar die aktualisierten Parameter aus dem IO-Teilmodell für die Investitionsentscheidung übernommen. Letztere wirkt sich jedoch erst mit einem Jahr Verzögerung auf das IO-Teilmodell

aus, so dass bspw. die Indizes t bzw. $t + 1$ der Gleichungen 5.54 bis 5.56 nicht kongruent sind. Aufgrund des vergleichsweise langen zeitlichen Horizonts, der für eine Bewertung klimapolitischer Instrumente betrachtet wird, erscheinen die dadurch entstehenden Verzögerungen der Effekte jedoch vernachlässigbar. Eine simultane Berücksichtigung aller simulierten Effekte und Rückkopplungen würde zudem einen geringeren Detaillierungsgrad der Modellierung erfordern, wodurch dieser Vorteil aufgegeben würde.

Eine Vereinfachung des vorgestellten Ansatzes ist die Annahme rational handelnder Akteure. Somit werden Entscheidungen, die durch ein gesteigertes Umweltbewusstsein motiviert sind, weitestgehend vernachlässigt. Diese Vereinfachung erscheint jedoch hinnehmbar, da sich die Metallindustrie einem verschärften internationalen Wettbewerb gegenüber sieht und daher ökonomische Kriterien bei einer Investitionsentscheidung im Vordergrund stehen. Weiterhin sind die betrachteten Sektoren eher durch eine Endkunden-ferne Massenproduktion gekennzeichnet, wodurch weniger Druck seitens der Endabnehmer im Bezug auf klimapolitische Vorgaben besteht. Letztlich wird dem vernachlässigten umweltbewussten Handeln modellseitig dadurch Rechnung getragen, dass auch Szenarios betrachtet werden, in denen alle Akteure das technisch mögliche Minderungspotenzial ausnutzen, wodurch die Spannweite möglicher Investitionsstrategien aufgezeigt wird.

6. Datenbasis beider Teilmodelle

Die zahlreichen exogen vorgegebenen Parameter und modellierten Variablen der in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Teilmodelle erfordern eine umfassende und konsistente Datenbasis. Da jedoch nicht alle für das Simulationsmodell erforderlichen Daten per se verfügbar sind oder nicht in der benötigten Granularität vorliegen, müssen diese häufig aus anderen Daten abgeleitet oder um weitere Daten ergänzt werden. Dies wird im Folgenden sowohl für das makroökonomische Teilmodell (Abschnitt 6.1) als auch für das technisch-betriebswirtschaftliche Teilmodell der Metallherzeugung (Abschnitt 6.2) erläutert. Einige Parameter gehen dabei als vollständige Zeitreihe in das Modell ein, andere sind nur für das Basisjahr t^{BAS} vorgegeben und werden durch das Modell fortgeschrieben. Als Basisjahr wird 2006 gewählt, da dieses nicht durch die im Jahr 2007 beginnende Finanz- und Wirtschaftskrise beeinflusst wurde und somit stabile, unverzerrte Daten liefert. Weiterhin kann der Zeitraum ab 2006 bis 2014 als Validierungsphase genutzt werden, um die durch das Modell generierten Daten mit empirisch erhobenen abzugleichen.

6.1. Datenbasis des makroökonomischen Teilmodells

Einen wesentlichen Input des makroökonomischen Teilmodells stellen die Input-Output-Tabellen dar, welche in der Simulation dynamisch fortgeschrieben werden. Diese müssen daher, wie im folgenden Abschnitt 6.1.1 erläutert, zunächst für das Basisjahr der Simulation aufbereitet werden. Abschnitt 6.1.2 nimmt daran anschließend auf die weiteren im IO-Teilmodell verwendeten Daten Bezug.

6.1.1. Ableitung der verwendeten Input-Output-Tabellen

Wie bereits im Kapitel 4 spezifiziert, sind drei unterschiedliche IO-Tabellen für die Modellierung notwendig, die klassische monetäre IO-Tabelle Z_t , die Energieträgermatrix ENT_t sowie die Kohlenstoff-IO-Tabelle CZ_t .

6.1.1.1. Die monetäre Input-Output-Tabelle

Die monetäre IO-Tabelle Deutschlands [65] wird jährlich etwa vier Jahre nach Ablauf des betrachteten Kalenderjahres vom statistischen Bundesamt herausgegeben. Da 2006 als das Basisjahr definiert wurde, unterliegen die Produktionsbereiche der entsprechenden IO-Tabelle noch der statistischen Güterklassifikation von 2002 [62] und nicht der neueren Güterklassifikation von 2009. Die Tabelle ist in 71 Produktionsbereiche gegliedert und beinhaltet die bereits in Abschnitt 4.1.1 spezifizierten Primärinputs und Endnachfragebereiche.

Die 71 Produktionsbereiche sind dabei teilweise relativ stark aggregiert. So ist bspw. die Aluminiumindustrie im Sektor *Herstellung von NE-Metallen und Halbzeug daraus* enthalten, während die Elektrizitäts- und Fernwärmeerzeugung sowie die Kokerei- und Mineralölerzeugnisse jeweils zusammen ausgewiesen werden. Da jedoch eine hinreichend genaue Übereinstimmung der im aktorsbasierten Teilmodell betrachteten Industrien mit den Sektoren der IO-Tabelle notwendig ist um eine direkte Kopplung beider Teilmodelle zu ermöglichen, wird eine Disaggregation der deutschen IO-Tabelle vorgenommen. Dies betrifft auch die Sektoren, welche die fossilen Energieträger beinhalten, da sich letztere durch unterschiedliche Kohlenstoffgehalte auszeichnen und damit in unterschiedlichem Umfang zu den CO₂-Emissionen der Energieträger beziehenden Sektoren beitragen.

Um eine Disaggregation vorzunehmen, sind sowohl die entsprechenden Spalten als auch die entsprechenden Zeilen unter Zuhilfenahme zusätzlicher Daten aufzuteilen. Hierzu wird analog zu [159] die in TJ notierende Energieträgerrechnung des Statistischen Bundesamtes [61] herangezogen. Diese unterscheidet den Einsatz von 34 Energieträgern in 120 Produktionsbereichen und ist damit tiefer als die monetäre IO-Tabelle gegliedert. Um die Unterschiede der Aggregationsniveaus in den Indizes sichtbar zu machen, werden für die ursprüngliche Energieträgerrechnung das Superskript (') und

für die ursprüngliche IO-Tabelle das Superskript (") verwendet, während die abgeleitete und im makroökonomischen Teilmodell eingesetzte IO-Tabelle ohne Superskript dargestellt wird. Da die Energieträgerrechnung weniger aggregiert als die eingesetzte IO-Tabelle ist, gilt $i' \subset i$, während für die stärker aggregierte ursprüngliche IO-Tabelle $i'' \supset i$ zugrunde gelegt wird.

Zunächst wird die zeilenweise tiefe Gliederung der Energieträgermatrix $ent'_{iET',j',tBAS}$ genutzt, um die entsprechenden Zeilen der ursprünglichen IO-Tabelle $z''_{iET'',j'',tBAS}$ zu ersetzen. Hierzu werden in Gleichung 6.1 die in TJ angegebenen Absolutwerte mit den Preisen auf Energieträger $p_{iET',tBAS}^{ET}$ ohne Berücksichtigung von Steuern (Herstellungspreise, vgl. Abschnitt 4.1.1) multipliziert. Die Preise für das Basisjahr 2006 werden dabei [32, 71, 270, 331] entnommen. Da die Energieträgerrechnung in einigen Bereichen tiefer als notwendig gegliedert ist, werden darüber hinaus die entsprechenden Energieträger und Produktionsbereiche wieder zusammengefasst.

$$z_{iET,j,tBAS}^{vorl} = \sum_{iET' \subset iET} \sum_{j' \subset j} ent'_{iET',j',tBAS} \cdot p_{iET',tBAS}^{ET} \quad (6.1)$$

Die so erhaltene vorläufige IO-Tabelle $z_{iET,j,tBAS}^{vorl}$ muss jedoch weiterhin normiert werden, da durch die zusätzlich verwendeten Daten und Diskrepanzen in den einzelnen Statistiken die Zeilen- und Spaltensummen nicht notwendigerweise mit der ursprünglichen IO-Tabelle übereinstimmen. Dies wird durch Gleichung 6.2 realisiert. Darin werden zeilenweise die ursprünglichen Werte der IO-Tabelle $z''_{iET'',j'',tBAS}$, welche mehrere Zeilen i^{ET} der neu generierten vorläufigen IO-Tabelle umfassen, mit dem jeweiligen errechneten wertmäßigen Anteil der Energieträger i^{ET} an allen dem Sektor $i^{ET''}$ zuordenbaren Energieträgern multipliziert. Umfasst bei der Betrachtung der Spalten ein Sektor j'' mehrere Sektoren j ($j'' \supset j$), so erfolgt die Normierung über alle j .

$$z_{iET,j,tBAS} = z''_{iET'',j'',tBAS} \cdot \frac{z_{iET,j,tBAS}^{vorl}}{\sum_{iET' \subset iET''} z_{iET',j,tBAS}^{vorl}} \quad (6.2)$$

Durch die bisherige Vorgehensweise werden zum einen die Zeilen der Sektoren $i^{ET''}$ disaggregiert, welche die Energieträger beinhalten. Zum anderen erfolgt durch die detailliertere Untergliederung der Spalten in der Energieträgerrechnung (120 Produktionsbereiche) eine spaltenweise Disaggregation von j'' , zumindest für den sektoralen Input an Energieträgern. Darüber hinaus ist jedoch auch eine spaltenweise Disaggregation für alle weiteren Vorleistungen $i'' \neq i^{ET''}$ vorzunehmen, was Gleichung 6.3 zeigt. Da keine weiteren Informationen über die Aufteilung der Vorleistungen vorhanden sind, wird angenommen, dass die Vorleistungen aus den Sektoren $i'' \neq i^{ET''}$ abhängig vom Produktionswert $pw_{j,tBAS}$ des Sektors j aufgeteilt werden. Letzterer wird dabei der Datenbank des Statistischen Bundesamtes entnommen [70].

$$z_{i \neq i^{ET}, j, tBAS} = z_{i'' = i \neq i^{ET}, j'' \supset j, tBAS} \cdot \frac{pw_{j, tBAS}}{\sum_{j \subset j''} pw_{j \subset j'', tBAS}} \quad (6.3)$$

Die auf diese Weise abgeleitete und im makroökonomischen Teilmodell eingesetzte IO-Tabelle Z_{tBAS} beinhaltet 79 Produktionsbereiche. Die Aufteilung der Sektoren im Vergleich zur ursprünglichen IO-Tabelle ist in Tabelle A.3 im Anhang A.2 dargestellt. Bezüglich der zeilenweisen Aufteilung der Endnachfragebereiche F_{tBAS} sowie der spaltenweisen Aufteilung der Primärinputs W_{tBAS} wird ähnlich wie in den Gleichungen 6.2 bzw. 6.3 verfahren, wobei für die Importe $g = imp$ und Exporte $h = exp$ Daten aus den Außenhandelsstatistiken [69] herangezogen werden.

6.1.1.2. Die Energieträgermatrix

Da die Energieträgerrechnung ENT'_{tBAS} bereits in einem hinreichend detaillierten Aggregationsniveau vorliegt, wird diese lediglich gemäß Gleichung 6.4 zusammengefasst, um den Sektoren der IO-Tabelle Z_{tBAS} zu entsprechen.

$$ent_{i^{ET}, j, tBAS} = \sum_{i^{ET'} \subset i^{ET}} \sum_{j' \subset j} ent'_{i^{ET'}, j', tBAS} \quad (6.4)$$

Die Energieträgermatrix ENT_{tBAS} differenziert zeilenweise neun Energieträger und spaltenweise 79 Produktionsbereiche, wobei bezüglich des

Sektors *Mineralölverarbeitung* eine weitere Unterteilung der entsprechenden Zeile in sieben Mineralölprodukte vorgenommen werden kann. Dies ist bei der Berechnung der Energiesteuern vonnöten, da die einzelnen Mineralölprodukte durch stark differierende Steuersätze geprägt sind (vgl. Tabelle 2.4 in Abschnitt 2.2.4).

6.1.1.3. Die Kohlenstoff-Input-Output-Tabelle

Für die Erstellung der KIO-Tabelle werden dieselbe Sektor-Klassifizierung wie in Abschnitt 4.2.2 und dieselben Annahmen bezüglich der Kohlenstoffflüsse innerhalb einer Wertschöpfungskette vorausgesetzt. Zunächst werden daher zeilenweise die Kohlenstoffflüsse der Energieträger i^{ET} in die Sektoren j unter Zuhilfenahme der Energieträgerrechnung gemäß Gleichung 6.5 aufgestellt. Dabei werden die in TJ notierenden Energieflüsse über die in MJ pro kg angegebenen Heizwerte $hw_{i^{ET}}$ in Massenströme umgerechnet und mit dem Kohlenstoffgehalt $cge_{i^{ET}}$ multipliziert. Die Heizwerte und Kohlenstoffgehalte entstammen überwiegend Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) [3] sowie des Umweltbundesamtes [297].¹

$$Cz_{i^{ET},j,t^{BAS}} = \sum_{i^{ET'} \subset i^{ET}} \sum_{j' \subset j} \frac{ent'_{i^{ET'},j',t^{BAS}} \cdot 1.000}{hw_{i^{ET'}}} \cdot cge_{i^{ET'}} \quad (6.5)$$

Die rohstoffnahen Industrien j^{HZ} verarbeiten einen Teil der Energieträger i^{ET} stofflich in deren Halbzeugen (Bsp.: Kunststoffe). Dieser Teil findet sich zeilenweise in den Kohlenstoffflüssen $Cz_{j^{HZ},j,t^{BAS}}$ der KIO-Tabelle wieder. Um den stofflich in den Halbzeugen gebundenen Kohlenstoff zu ermitteln, werden Daten der umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) des Statistischen Bundesamtes [63] herangezogen. Der gesamte in einem Halbzeug j^{HZ} jährlich gebundene Kohlenstoff $Cz_{j^{HZ},t^{BAS}}^{ges}$ berechnet sich in Gleichung 6.6 aus der insgesamt verwendeten Energie $ev_{i^{ET},j^{HZ},t^{BAS}}^{Verw}$

¹Zur Vermeidung von Doppelzählungen werden weiterhin die Inputs von Kokereigas in den Sektor *Kokereierzeugnisse* und von Gichtgas in den Sektor *Herstellung von Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus* der Matrix $ENT'_{t^{BAS}}$ auf Null gesetzt, da diese Kuppelgase aus den eingesetzten Brennstoffen entstehen und deren Kohlenstoffeintrag in die jeweiligen Sektoren somit bereits berücksichtigt ist.

abzüglich des emissionsrelevanten Energieverbrauchs $ev_{iET,j}^{Verb}$. Diese in TJ notierenden Angaben werden wiederum über die jeweiligen Heizwerte hw_{iET} und den jeweiligen Kohlenstoffgehalt cge_{iET}^{ET} in Tonnen Kohlenstoff umgerechnet. Dabei unterliegen die Tabellen der UGR wiederum einem anderen Aggregationsniveau und weichen teilweise von der IO-Tabelle und der Energieträgerrechnung ab. Daher werden auch hier Disaggregationen bezüglich der Produktionsbereiche (Zeilen) unter der Zuhilfenahme zusätzlicher Daten wie auch bezüglich der Energieträger (Spalten) analog zu den obigen Ausführungen vorgenommen.

$$cz_{j^{HZ},t^{BAS}}^{ges} = \sum_{iET} \left(\frac{ev_{iET,j^{HZ},t^{BAS}}^{Verw} - ev_{iET,j^{HZ},t^{BAS}}^{Verb}}{hw_{iET}} \cdot 1.000 \cdot cge_{iET}^{ET} \right) \quad (6.6)$$

Die Aufteilung des gesamten in einem Halbzeug j^{HZ} jährlich gebundenen Kohlenstoffs $cz_{j^{HZ},t^{BAS}}^{ges}$ auf die einzelnen Produktionsbereiche i erfolgt in Gleichung 6.7 unter der Verwendung der Anteile der monetären Güterströme $z_{j^{HZ},i,t^{BAS}}$. Da letztere auch die importierten Güter umfassen, $cz_{j^{HZ},t^{BAS}}^{ges}$ sich jedoch nur auf die im Inland hergestellten Halbzeuge bezieht, wird $cz_{j^{HZ},t^{BAS}}^{ges}$ um den monetären Anteil der Importe am Produktionswert $pw_{j^{HZ},t^{BAS}}$ von j^{HZ} ergänzt. Der Produktionswert gibt den gesamten jährlichen monetären Input eines Sektors inklusive Primärinputs wieder, wobei keine Importe berücksichtigt werden ($pw_{j^{HZ},t^{BAS}} = \sum_i z_{i,j^{HZ},t^{BAS}} + \sum_g w_{g \neq imp,j^{HZ},t^{BAS}}$). Da der im Halbzeug gebundene Kohlenstoff nicht nur in andere Sektoren i eingeht, sondern ebenfalls in den privaten Konsum $h = pri$ übergeht oder exportiert $h = exp$ wird, werden ebenfalls die Endnachfragebereiche $f_{j^{HZ},h,t^{BAS}}$ zur Berechnung des Anteils der monetären Güterströme herangezogen.²

²Weiterhin werden ebenfalls die Vorratsveränderungen $h = vor$ betrachtet. Da in der Simulation jedoch angenommen wird, dass zukünftig keine Produktion auf Vorrat stattfindet, wird dies hier nicht genauer ausgeführt.

$$\begin{aligned}
 CZ_{j^{HZ},i,t^{BAS}} = & CZ_{j^{HZ},t^{BAS}}^{ges} \cdot \left(1 + \frac{w_{imp,j^{HZ},t^{BAS}}}{pw_{j^{HZ},t^{BAS}}} \right) \\
 & \cdot \frac{z_{j^{HZ},i,t^{BAS}}}{\sum_i z_{j^{HZ},i,t^{BAS}} + \sum_{h \in \{pri,exp\}} f_{j^{HZ},h,t^{BAS}}}
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

Die Halbzeuge j^{HZ} werden wiederum in den Endprodukten j^{EP} verbaut, wodurch der Kohlenstoffgehalt von letzteren beeinflusst wird. Dies wirkt sich wie in Gleichung 6.8 dargestellt auf die Kohlenstoffflüsse der Endprodukte $CZ_{j^{EP},i,t^{BAS}}$ aus. Der aufsummierte Input an Kohlenstoff aus Halbzeugen wird darin analog zu Gleichung 6.7 unter Zuhilfenahme der Anteile der monetären Güterströme auf die einzelnen Produktionsbereiche i aufgeteilt. Auch hier werden neben den inländischen die importierten kohlenstoffhaltigen Endprodukte berücksichtigt. Implizit wird davon ausgegangen, dass importierte Güter denselben Kohlenstoffgehalt aufweisen wie im Inland produzierte.

$$\begin{aligned}
 CZ_{j^{EP},i,t^{BAS}} = & \sum_{j^{HZ}} CZ_{j^{HZ},j^{EP},t^{BAS}} \left(1 + \frac{w_{imp,j^{EP},t^{BAS}}}{pw_{j^{EP},t^{BAS}}} \right) \\
 & \cdot \frac{z_{j^{EP},i,t^{BAS}}}{\sum_i z_{j^{EP},i,t^{BAS}} + \sum_{h \in \{pri,exp\}} f_{j^{EP},h,t^{BAS}}}
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

Für die Kohlenstoffflüsse der Dienstleistungen und Sektoren, welche den ersten drei Klassen nicht direkt zuordenbar sind, gilt $CZ_{j^{DL},i,t^{BAS}} = 0$, womit sämtliche Kohlenstoffflüsse der Matrix $CZ_{t^{BAS}}$ nun spezifiziert sind. Letztere enthält im Gegensatz zu der monetären IO-Tabelle $Z_{t^{BAS}}$ ebenfalls den privaten Konsum, dessen Kohlenstoffinputs analog zu den Gleichungen 6.5 bis 6.8 bestimmt werden.

Bezüglich des exportierten Kohlenstoffs $cf_{i,t^{BAS}}^{EXP}$ in der letzten Verwendung der KIO-Tabelle werden ebenfalls die monetären Güterströme herangezogen um diesen für jeden Sektor i zu bestimmen. Hierfür wird wiederum ein analoges Vorgehen, wie durch die Gleichungen 6.7 und 6.8 beschrieben, angewendet. Gleiches gilt darüber hinaus für den importierten Kohlenstoff $cw_{i,t^{BAS}}^{IMP}$, welcher abhängig von $w_{imp,i,t^{BAS}}$ bestimmt wird.

Die CO₂- und CH₄-Emissionen als weitere Endnachfragebereiche $cf_{i,t}^{CO_2}$ bzw. $cf_{i,t}^{CH_4}$ können direkt aus der UGR [64] entnommen und mit dem Kohlenstoffgehalt der Treibhausgase cge_b^{THG} multipliziert werden. Für einige Sektoren erfolgt dabei eine Disaggregation der Treibhausgasemissionen, wobei hierfür die theoretischen Emissionen der disaggregierten Sektoren unter Zuhilfenahme der detaillierteren Energieträgermatrix sowie der bundeseinheitlichen Liste der CO₂-Emissionsfaktoren [27] berechnet werden.

Die Umweltentnahmen $cw_{iET,t}^{UMW}$ erfolgen in der dargestellten KIO-Tabelle nur durch die Sektoren, welche die Energieträger i^{ET} repräsentieren, und errechnen sich gemäß Gleichung 6.9 als Resultierende aus der gesamten Verwendung abzüglich des importierten Kohlenstoffs. Somit wird davon ausgegangen, dass der gesamte in Form von Energieträgern bereitgestellte Kohlenstoff entweder importiert oder aus der Umwelt durch Abbau entnommen wird.³

$$\begin{aligned}
 cw_{iET,t}^{UMW} = & \sum_j z_{iET,j,t} + cf_{iET,t}^{CO_2} + cf_{iET,t}^{CH_4} \\
 & + cf_{iET,t}^{EXP} - cw_{iET,t}^{IMP}
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Um den Annahmen des makroökonomischen Teilmodells auch bei der Ableitung der Datenbasis zu entsprechen, wird die für das Basisjahr t^{BAS} ermittelte physische KIO-Tabelle im Folgenden auf dieselbe Weise zum Ausgleich gebracht. Gleichung 6.10 entspricht daher weitestgehend Gleichung 4.67 und gibt die Differenz $dif_{i,t}^{BAS}$ des gesamten Aufkommens und der gesamten Verwendung von Kohlenstoff für jeden Sektor i wieder.

³Daneben wird der Eintrag an CaCO₃, der eine wesentliche Emissionsquelle im Zementsektor darstellt, separat für den Sektor *Gewinnung von Steinen und Erden und sonstigen Bergbauerzeugnissen*, welcher nicht unter die Energieträger i^{ET} fällt, bestimmt. Hierzu werden physische Daten der Produktions- sowie der Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes verwendet.

$$\begin{aligned}
dif_{i,t}^{BAS} = & \sum_j CZ_{i,j,t}^{BAS} + cf_{i,t}^{CO2} + cf_{i,t}^{CH4} + cf_{i,t}^{EXP} \\
& - \sum_j CZ_{j,i,t}^{BAS} - cw_{i,t}^{IMP} - cw_{i,t}^{UMW}
\end{aligned} \tag{6.10}$$

Analog zu Gleichung 4.68 wird in Gleichung 6.11 eine positive Differenz $dif_{i,t}^{BAS} > 0$ als Bestandsabnahme und eine negative Differenz $dif_{i,t}^{BAS} < 0$ als Bestandszunahme interpretiert (vgl. Abschnitt 4.2.2).

$$\begin{aligned}
cf_{i,t}^{BES} = 0, \quad cw_{i,t}^{BES} = dif_{i,t}^{BAS}, \quad \text{falls } dif_{i,t}^{BAS} > 0 \\
cf_{i,t}^{BES} = 0, \quad cw_{i,t}^{BES} = -dif_{i,t}^{BAS}, \quad \text{falls } dif_{i,t}^{BAS} < 0
\end{aligned} \tag{6.11}$$

Die so abgeleiteten Bestandsänderungen der anthropogenen Kohlenstoffflüsse einer Volkswirtschaft können folgendermaßen plausibilisiert werden. Es zeigt sich, dass in nahezu allen Sektoren eine Bestandszunahme erfolgt. Dieser Bestand repräsentiert bspw. Endprodukte in deren Nutzungsphase oder die Entsorgung von Produkten nach ihrer Gebrauchsphase. Eine Bestandszunahme ist somit eine natürliche Folge des beobachtbaren steigenden Konsums⁴. Des Weiteren zeigt sich für nur wenige Sektoren eine Bestandsabnahme. Diese kann, wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, auch als Recyclingaktivität aufgefasst werden. Da die beiden Sektoren mit der größten Bestandsabnahme die *Herstellung von Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus* sowie die *Abwasser-, Abfallbeseitigung und sonstige Entsorgungsleistungen* umfassen, welches beide Branchen mit zahlreichen Recyclingprozessen darstellen, erscheint diese Interpretation plausibel.

6.1.2. Ableitung weiterer makroökonomischer Daten

Neben den verwendeten IO-Tabellen liegen dem makroökonomischen Teilmodell weitere zentrale Daten zugrunde. Im Folgenden werden zunächst die Daten erläutert, welche im Simulationslauf als unveränderliche Parameter

⁴Vgl. z.B. den in den IO-Tabellen von 2005 und 2006 ausgewiesenen privaten Konsum.

eingehen, d.h. die keinen Index t besitzen, und solche, die lediglich für das Basisjahr t^{BAS} vorgegeben und modellseitig endogen fortgeschrieben werden. Alle weiteren exogen für die einzelnen Jahre t vorgegebenen Daten werden hingegen im Kapitel 7 spezifiziert, da diese innerhalb von Szenarios variiert werden.

Zwei wesentliche zu bestimmende Größen bei der Berechnung der Konsumausgaben im LES sind die Parameter μ_v , der Mindestkonsum des Verwendungszwecks v , sowie α_v , der variable Konsum des Verwendungszwecks v (vgl. Gleichung 4.23). Beide werden mittels einer Regressionsanalyse gemäß Gleichung 6.12 spezifiziert. Hierzu werden die aufsummierten quadratischen Abweichungen des in der Vergangenheit beobachteten Konsums $kon_{v,t}^{soll}$ zu dem mittels des LES berechneten Konsum minimiert. Die verwendeten Daten entstammen den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen [72], die die Konsumausgaben der privaten Haushalte von 1991 bis 2008 für die einzelnen Verwendungszwecke v in den jeweiligen Preisen ausweisen sowie den preisbereinigten Konsum mittels eines Kettenindex wiedergeben. Aus diesen beiden Informationen lassen sich die normierten Preise $p_{v,t}^{norm}$ ableiten, wobei $p_{v,t^{BAS}}^{norm} = 1,0$ gesetzt wird (vgl. Abschnitt 4.2.1). Das Einkommen vek_t , welches in der Vergangenheit für Konsumzwecke zur Verfügung gestanden hat, wird dabei aus dem beobachteten Konsum bestimmt ($vek_t = \sum_v kon_{v,t}^{soll}$).

$$\min_{\mu, \alpha} \sum_v \sum_{t=1991}^{2008} \left(kon_{v,t}^{soll} - \left(p_{v,t}^{norm} \cdot \mu_v + \alpha_v \cdot \left(vek_t - \sum_r p_{r,t}^{norm} \cdot \mu_r \right) \right) \right)^2 \quad (6.12)$$

Auch die Abhängigkeit der Abschreibungen von den erreichten Energieeinsparungen in Gleichung 4.21 wird durch eine Regressionsanalyse quantifiziert. Hierzu wird unter der Verwendung von in der Vergangenheit beobachteten Daten der jährliche Zuwachs der Abschreibungen (entspricht $\Delta u_{abs,j,t} - 1$ im Modell) der jährlichen Reduktion des Endenergieverbrauchs (entspricht $1 - \widehat{\Delta c_{iET,j,t+1}}$ im Modell) gegenübergestellt. Datenquellen stellen die inflationsbereinigten Abschreibungen aus der volkswirtschaftlichen

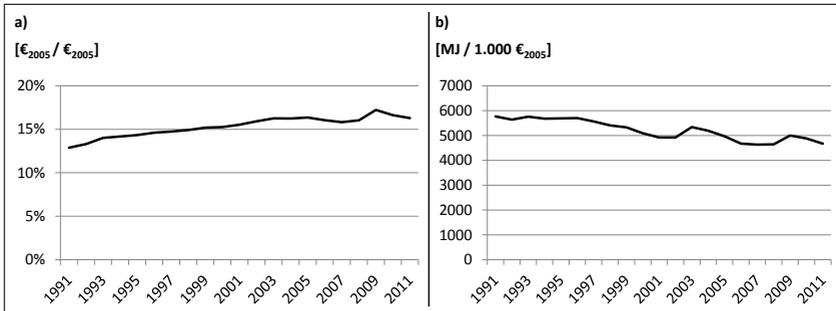


Abbildung 6.1.: Auf die Bruttowertschöpfung bezogene Abschreibungen aller Wirtschaftszweige a) und Endenergieverbrauch der Industrie je 1.000 Euro Bruttowertschöpfung b) (Datengrundlage: [34, 75]).

Gesamtrechnung [75], welche auf die Bruttowertschöpfung [34] bezogen werden, sowie der ebenfalls inflationsbereinigte Endenergieverbrauch je 1.000 Euro Bruttowertschöpfung der Industrie aus den Energiedaten des BMWi [34] dar. Als Ergebnis der Regression zeigt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,80, was für die Annahme einer Abhängigkeit der Abschreibungen von den erreichten Energieeinsparungen spricht. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Investitionen in energieeffizienzsteigernde Technologien zu einer Senkung des Endenergieverbrauchs und gleichzeitig zu einem Anstieg der Abschreibungen führen. Abbildung 6.1 verdeutlicht die identifizierte Korrelation graphisch.

Gemittelt über die analysierten Jahre ergibt sich für die Quote, mit der sich die Abschreibungen, bezogen auf die Änderung der Energieeinsparungen, ändern, $abq = 1,22$. Diese relativ starke Vereinfachung des Zusammenhangs zwischen Investitionen und Energieeffizienz wird für die Metallerzeugung deutlich detaillierter aufgelöst. Bevor jedoch die Datenbasis des aktorsbasierten Teilmodells in Abschnitt 6.2 vorgestellt wird, weist Tabelle 6.1 die weiteren im makroökonomischen Teilmodell verwendeten Daten zusammen mit den Datenquellen aus. Die zeitabhängigen und in Szenarios variierten Daten sind hingegen Gegenstand von Kapitel 7.

Tabelle 6.1.: Weitere im makroökonomischen Teilmodell verwendete und im Simulationslauf konstant gehaltene Daten

Bezeichnung	Notation	Quelle
Quote Nettolohn bezogen auf Brutto-Arbeitsentgelt	$nlq = 0,54$	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen [72]
Quote Masseneinkommen bezogen auf Nettolohn	$meq = 1,46$	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen [72]
Sparquote	$spq = 0,11$	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen [72]
Konsumverflechtungstabelle	KVT	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen [66], Disaggregation gemäß monetärer IO-Tabelle (privater Konsum)
Steuern (Verhältnis Anschaffungspreise zu Herstellungspreisen)	ste_j	Verwendungstabelle zu Anschaffungspreisen und IO-Tabelle zu Herstellungspreisen [65]
Anzahl Unternehmen	anz_j^U	Statistisches Bundesamt [70]
Fixe Gütersteuern	fix_j	Errechnet aus Daten für Basisjahr ($w_{gst,j,t^{BAS}} \cdot 10^6 - oek_{j,t^{BAS}} - eeg_{j,t^{BAS}}$)
N ₂ O-, PFC-, HFC- und SF ₆ -Emissionen im Basisjahr	$e_{j,n2o,t^{BAS}},$ $e_{j,pfc,t^{BAS}},$ $e_{j,hfc,t^{BAS}},$ $e_{j,sf6,t^{BAS}}$	UGR [64, 67], Disaggregation gemäß monetärer IO-Tabelle (Produktionswert)
Treibhauswirksamkeit	trw_b	vgl. Tabelle 2.1

6.2. Datenbasis des technisch-betriebswirtschaftlichen Teilmodells der Metallerzeugung

Der vorliegende Abschnitt erläutert die im aktorsbasierten Teilmodell verwendeten Daten. Auch hier liegt der Fokus auf Daten, welche im Simulationslauf als unveränderliche Parameter eingehen bzw. lediglich für das Basisjahr t^{BAS} vorgegeben werden. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um werkspezifische Informationen, weshalb an dieser Stelle zunächst der Begriff *Werk* genauer spezifiziert werden soll. In den Erläuterungen zum aktorsbasierten Teilmodell (Kapitel 5) wurde bisher implizit davon ausgegangen, dass ein Werk mit einem Standort gleichzusetzen ist. Somit wird als Werk die Summe der Anlagen bezeichnet, welche sich an einem Standort befinden und die Möglichkeit zur Implementierung anlagenübergreifender Effizienzmaßnahmen bieten (Bsp.: Austausch von Prozessgasen, Wärmeströmen oder Elektrizität). Dabei werden keine Differenzierungen hinsichtlich unterschiedlicher Betreiber vorgenommen, so dass lediglich der Standort einzelner Anlagen für die Zugehörigkeit zu einem Werk maßgeblich ist. Dies ist auch bei der Analyse der werkspezifischen Daten zu beachten, welche häufig betreiberspezifisch ausgewiesen werden.

In Abschnitt 5.1.1 wurde bereits konstatiert, dass die anlagenspezifischen Koeffizienten von zentraler Bedeutung für die Beurteilung der Energieeffizienz eines Werkes sind, da sie sowohl die spezifischen energetischen Inputs als auch die spezifischen Treibhausgasemissionen repräsentieren. Deshalb wird der Status quo der anlagenspezifischen Koeffizienten für das Basisjahr t^{BAS} durch ein separates Modell ermittelt, welches in Abschnitt 6.2.1 erläutert wird. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 6.2.2 die Technologiedatenbank entwickelt, welche mögliche Maßnahmen für eine zukünftige Beeinflussung der werkspezifischen Energieeffizienz beinhaltet. Abschnitt 6.2.3 gibt hingegen die weiteren im aktorsbasierten Teilmodell eingesetzten Parameter wieder.

Tabelle 6.2.: Masse an Kohlenstoff bezogen auf den Energiegehalt verschiedener Prozessgase sowie Erdgas (Datengrundlage: [230])

(Prozess-) Gas	Kohlenstoffgehalt
Erdgas	0,020 kg C/MJ
Hochofengas	0,071 kg C/MJ
Kokereigas	0,010 kg C/MJ
Konvertergas	0,051 kg C/MJ

6.2.1. Ableitung der anlagenspezifischen Koeffizienten durch ein nichtlineares Optimierungsmodell

Da für die in der aktorsbasierten Simulation verwendeten Koeffizienten $ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,tBAS}$ bzw. $ik_{ii,y,jj}^{ZP,s,tBAS}$ in der Regel keine öffentlich verfügbaren Informationen vorliegen, werden diese unter der Zuhilfenahme vorhandener Daten abgeschätzt. Um eine Verbindung zwischen den vorhandenen und zu schätzenden Daten herzustellen bietet sich eine Kohlenstoffbilanz an. Letztere trägt der Tatsache Rechnung, dass der größte Teil der werksinternen Stoffflüsse kohlenstoffhaltig ist und die CO_2 -Emissionen, welche die bedeutendsten Treibhausgasemissionen der Metallerzeugung darstellen⁵, direkt von den im eingesetzten Brennstoff oder im Reduktionsmittel gebundenen Kohlenstoff abhängen. Weiterhin zeigen die unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte der Prozessgase die Notwendigkeit dieser Vorgehensweise auf (vgl. Tabelle 6.2). So geht bspw. die Verbrennung von Kokereigas zur Bereitstellung einer bestimmten Menge an Energie mit nur etwa einem Siebtel der CO_2 -Emissionen verglichen mit Hochofengas (Gichtgas) einher.

Öffentlich verfügbare werkspezifische Daten, die für eine Rückrechnung auf die zu schätzenden Koeffizienten herangezogen werden können, sind:

- die CO_2 -Emissionen, welche im PRTR [104] (vgl. Abschnitt 2.2.6) jährlich durch die Unternehmen berichtet werden müssen,

⁵Gemäß UGR [78] repräsentieren die CO_2 -Emissionen 99% der Treibhausgasemissionen der Roheisen- und Stahlerzeugung sowie 91% der NE-Metallerzeugung in 2012.

- die Kapazitäten und Technologien der einzelnen Anlagen, welche für die Eisen- und Stahlindustrie der Datenbank PLANTFACTS [306] entnommen werden können,
- die Produktionsmengen der Werke, welche bspw. in statistischen Jahrbüchern [331] oder Geschäftsberichten ausgewiesen werden, sowie
- technische Ober- und Untergrenzen einzelner Stoff- und Energieströme, wie sie bspw. in den BVT-Merkblättern (vgl. Abschnitt 2.2.6) zu den einzelnen Industrien [95, 100, 101] spezifiziert sind.

Die Integration aller öffentlich verfügbaren und zu schätzenden Daten durch eine Kohlenstoffbilanz erfolgt in dem folgend erläuterten Optimierungsmodell, das in einigen Nebenbedingungen nichtlinear ist (NLP). Die Notation orientiert sich an der des aktorsbasierten Teilmodells, wobei einige zusätzliche Variablen und Parameter definiert werden. So weist Tabelle 6.3 nicht nur die zu schätzenden anlagenspezifischen Koeffizienten als Entscheidungsvariablen aus, sondern weiterhin die Stoffumwandlungskoeffizienten (SUK), welche die Produktion der Zwischenprodukte widerspiegeln und damit die Aktivitätsraten der Anlagen eines Standortes beeinflussen. Diese SUK ersetzen die Modellierung einer Inversen, da über sie ebenfalls die indirekten Auswirkungen der Produktionsmengen einzelner Anlagen auf die Produktionsmengen anderer Anlagen abgebildet werden können. Die Unterschiede zwischen den einzelnen in Tabelle 6.3 definierten SUK werden im weiteren Verlauf der Modellbeschreibung erläutert.

Während im aktorsbasierten Teilmodell nur bezüglich der Technologiematrix zwischen intern produzierten (*ii*) und extern bezogenen (*ii + o*) Stoffen unterschieden wird, wird im NLP diese Unterscheidung bereits bei den Koeffizienten vorgenommen (Superskripte *int*, *ext*), da keine Technologiematrix aufgestellt wird. Darüber hinaus wird auch eine Differenzierung hinsichtlich des Bezugssystems berücksichtigt. So können In- und Outputs einzelner Anlagen wie im aktorsbasierten Teilmodell auf den Output des Zwischenprodukts jj^{ZP} dieser Anlagen bezogen werden, wie auch auf den Output des Referenzprodukts $jj^{Ref} \subset jj^{ZP}$ des gesamten Werkes (Superskript *Werk*), was durch den gemeinsamen Nenner die Bilanzierung der werksinternen Flüsse ermöglicht. Das Referenzprodukt definiert sich dabei über die Anlage, welche Haupttreiber der vorgelagerten Prozesse ist. So gilt für das Beispiel eines integrierten Hüttenwerkes, dass nicht

Tabelle 6.3.: Entscheidungsvariablen des NLPs zur Abschätzung der anlagenspezifischen Koeffizienten

Bezeichnung	Entscheidungsvariable	Einheit
Werksinterner Stoffumwandlungskoeffizient	$suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s}^{int}$	$\frac{t}{t} \frac{ii^{ZP}}{jj^{ZP}}$
Anlagenspezifischer werksinterner Stoffumwandlungskoeffizient	$suk_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{int,Anlage}$	$\frac{t}{t} \frac{ii^{ZP}}{jj^{ZP}}$
Technischer Stoffumwandlungskoeffizient	$suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s}$	$\frac{t}{t} \frac{ii^{ZP}}{jj^{ZP}}$
Anlagenspezifische In-/Outputkoeffizienten	$ik_{ii,y,jj^{ZP},s}, ok_{ii,y,jj^{ZP},s}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ } ii}{t \cdot jj^{ZP}}$
In-/Outputkoeffizienten (gemeinsames Bezugssystem), differenziert nach werksinternen und externen Stoffflüssen	$ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk}, ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk},$ $ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext}, ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext},$ $ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,int}, ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,int}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ } ii}{t \cdot jj^{Ref}}$

das Endprodukt Walzstahl (jj^{EP}), sondern der im Konverter entstehende Rohstahl als Referenzprodukt jj^{Ref} herangezogen wird. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass das Walzwerk an einigen Standorten deutlich kleiner dimensioniert ist als der Konverter und somit ein Großteil des Rohstahls ohne eine weitergehende Verarbeitung verkauft wird.

Alle Variablen und Parameter des NLP beziehen sich auf das Basisjahr t^{BAS} .⁶ Aus Gründen der Lesbarkeit wird dieser Index jedoch in Tabelle 6.3 und bei den folgenden Ausführungen nicht mitgeführt.

Die ersten notwendigen Nebenbedingungen ergeben sich direkt aus der Festlegung der Entscheidungsvariablen. So gewährleisten Nebenbedingungen 6.13 und 6.14, dass sich der gesamte In- bzw. Output des Stoffes ii

⁶Da die PRTR-Datenbank keine Werte für das Basisjahr 2006, sondern nur für 2004 und 2007 ausweist, werden die Werte von 2007 zur Ermittlung der Koeffizienten herangezogen.

einer Anlage y , welche das Zwischenprodukt jj^{ZP} herstellt, aus werksinternen und die Werksgrenzen überschreitenden Stoff- und Energieflüssen zusammensetzt.

$$ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk} = ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,int} + ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} \quad \forall ii, y, jj^{ZP}, s \quad (6.13)$$

$$ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk} = ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,int} + ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} \quad \forall ii, y, jj^{ZP}, s \quad (6.14)$$

Nebenbedingungen 6.15 und 6.16 stellen sicher, dass die anlagenspezifischen In- und Outputkoeffizienten mittels der werksinternen SUK auf das gleiche Bezugssystem, ausgedrückt pro Tonne des im Werk produzierten Referenzprodukts jj^{Ref} , umgerechnet werden. Hier wird auch der nichtlineare Charakter des Modells deutlich, der sich daraus ergibt, dass weder die SUK noch die In- und Outputkoeffizienten bekannt und somit entscheidungsrelevant sind.

$$ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk} = ik_{ii,y,jj^{ZP},s} \cdot suk_{jj^{ZP},y,jj^{Ref},s}^{int,Anlage} \quad \forall ii, y, jj^{ZP}, s \quad (6.15)$$

$$ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk} = ok_{ii,y,jj^{ZP},s} \cdot suk_{jj^{ZP},y,jj^{Ref},s}^{int,Anlage} \quad \forall ii, y, jj^{ZP}, s \quad (6.16)$$

Nebenbedingung 6.17 zeigt auf, dass sich die werksinternen SUK auf die anlagenspezifischen SUK aufteilen, da mehrere Anlagen des gleichen Typs an einem Standort dasselbe Zwischenprodukt ii^{ZP} herstellen können.

$$suk_{ii^{ZP},jj^{Ref},s}^{int} = \sum_y suk_{ii^{ZP},y,jj^{Ref},s}^{int,Anlage} \quad \forall ii^{ZP}, s \quad (6.17)$$

Die Einhaltung technischer Restriktionen stellt einen wichtigen Aspekt der aktorsbasierten Simulation dar (vgl. Gleichungen 5.16 sowie 5.17). Um auch für das Basisjahr t^{BAS} eine realistische, technisch mögliche Ausgangskonfiguration der einzelnen Werke zu generieren, werden diese Restriktionen im NLP analog zur aktorsbasierten Simulation durch die Gleichungen 6.18 und 6.19 beschrieben.

$$ik_{ii,y,jj}^{ZP,s} \leq ik_{ii,jj}^{max,ZP}, ik_{ii,y,jj}^{ZP,s} \geq ik_{ii,jj}^{min,ZP} \quad \forall ii, y, jj^{ZP}, s \quad (6.18)$$

$$ok_{ii,y,jj}^{ZP,s} \leq ok_{ii,jj}^{max,ZP}, ok_{ii,y,jj}^{ZP,s} \geq ok_{ii,jj}^{min,ZP} \quad \forall ii, y, jj^{ZP}, s \quad (6.19)$$

Im Falle der Eisen- und Stahlindustrie liefern die BVT-Merkblätter [95,100] bereits ausreichend Informationen, um die technischen Ober- und Untergrenzen aller relevanten Stoffe zu definieren⁷. Das BVT-Merkblatt der Aluminiumindustrie [101] hingegen enthält hierfür unzureichende Informationen, so dass dieses um weitere Daten aus verschiedenen Studien [91,93,103,154] ergänzt wird. Tabelle 6.4 zeigt die mittels der genannten Quellen erhaltenen technischen Ober- und Untergrenzen am Beispiel einer Kokerei auf. Diese Restriktionen werden im NLP lediglich für die kohlenstoffhaltigen Stoffströme sowie die Zwischenprodukte definiert, da die Kohlenstoffbilanz alle weiteren Stoff- und Energieströme (Bsp.: Dampf, Elektrizität) nicht beeinflusst. In der aktorsbasierten Simulation hingegen werden die technischen Restriktionen für alle betrachteten In- und Outputs aufgestellt (Gleichungen 5.16 und 5.17). Insofern sich, wie im Falle der Kokerei, die Restriktionen auf den gesamten Brennstoffeinsatz beziehen⁸, werden die jeweiligen Inputkoeffizienten addiert ($\sum_{ii^{BS}} ik_{ii^{BS},y,jj}^{ZP,s}$).

In Abschnitt 5.1.2 wurde bereits erläutert, dass das Walzwerk durch eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse gekennzeichnet ist und dadurch werks- und anlagenspezifische Restriktionen (Bsp.: $ik_{ii,y,jj}^{min,ws,s}$) mit einem zusätzlichen Index s zur Beschreibung dieses Anlagentyps notwendig sind. Die Datenbank PLANTFACTS [306] weist für die Eisen- und Stahlindustrie insgesamt 21 verschiedene Prozesse aus, die unter dem Anlagentyp Walzwerk zusammengefasst werden können. Dazu gehören neben Brammenwalzwerk, Profilstraße oder Reversier-Kaltwalzwerk bspw. auch Glüh- oder Beschichtungslinien. Mit Hilfe des BVT-Merkblatts zu den weiterverarbeitenden Prozessen [95] lassen sich die Ober- und Untergrenzen

⁷Die in den BVT-Merkblättern enthaltenen Ober- und Untergrenzen der einzelnen In- und Outputs gründen auf einer Analyse verschiedener Anlagen mit Standorten in der EU und zeigen damit die Bandbreiten aktueller Anlagen auf. Für einige Stoffe werden weiterhin technisch mögliche Minima oder Maxima angegeben.

⁸In Tabelle 6.4 werden die Brennstoffe Hochofen- und Kokereigas gemeinsam ausgewiesen. Die im Pyrolyse-Verfahren hauptsächlich stofflich zur Erzeugung von Koks genutzte Kohle ist dabei nicht als Brennstoff klassifiziert und durch separate Ober- und Untergrenzen charakterisiert.

Tabelle 6.4.: Technische Ober- und Untergrenzen kohlenstoffhaltiger Stoffe am Beispiel einer Kokerei

Input	Untergrenze	Obergrenze	Einheit
Kohle	1220	1350	kg/t Koks
Hochofen-/ Kokereigas	3200	3900	MJ/t Koks
Output	Untergrenze	Obergrenze	Einheit
Kokereigas	6540	9410	MJ/t Koks
CO-Emissionen	0,2	4,5	kg/t Koks
CO ₂ -Emissionen	160	860	kg/t Koks
Benzol	5	14	kg/t Koks
Leichtöl	9	14	kg/t Koks
Teer	26	48	kg/t Koks

des Energieeinsatzes für die jeweiligen Prozesse bestimmen und mittels der in PLANTFACTS enthaltenen Auslegekapazitäten für jedes Walzwerk y des Werkes s gewichten. Damit wird implizit davon ausgegangen, dass innerhalb eines bestimmten Walzwerkes die einzelnen Prozesse jeweils gleichermaßen ausgelastet sind. Der so ermittelte maximale Input an Brennstoffen $\sum_{iiBS} ik_{iiBS,y,jj^{WS},s}^{max}$ erstreckt sich je nach Walzwerk y von 920 MJ pro Tonne Walzstahl bis hin zu 4480 MJ, während sich der minimale Input $\sum_{iiBS} ik_{iiBS,y,jj^{WS},s}^{min}$ zwischen 490 MJ pro Tonne Walzstahl und 2230 MJ bewegt. Dies wird auch in Abbildung 6.2 deutlich, welche die großen Unterschiede zwischen einigen Walzwerken nochmals hervorhebt.

Nebenbedingung 6.20 verdeutlicht den Unterschied der werksinternen SUK $suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s}^{int}$ und der technischen SUK $suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s}$. Der werksinterne SUK bezieht nur die im Werk s hergestellte Menge des Zwischenprodukts ii^{ZP} auf den Output des Zwischenprodukts jj^{ZP} . ii^{ZP} kann dabei sowohl in anderen Anlagen weiterverarbeitet als auch verkauft werden. Der technische SUK $suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s}$ hingegen gibt die zur Produktion von einer Einheit jj^{ZP} benötigte Menge an ii^{ZP} im Sinne eines Inputkoeffizienten an, wobei keine Differenzierung hinsichtlich der im Werk hergestellten oder bezogenen Mengen an ii^{ZP} erfolgt. Der werksinterne SUK kann somit verwendet werden, um die Aktivitätsraten der einzelnen Anlagen an einem Standort korrekt wiederzugeben. Um diesen aus dem technischen SUK abzuleiten, wird in Nebenbedingung 6.20 letzterer um die externen

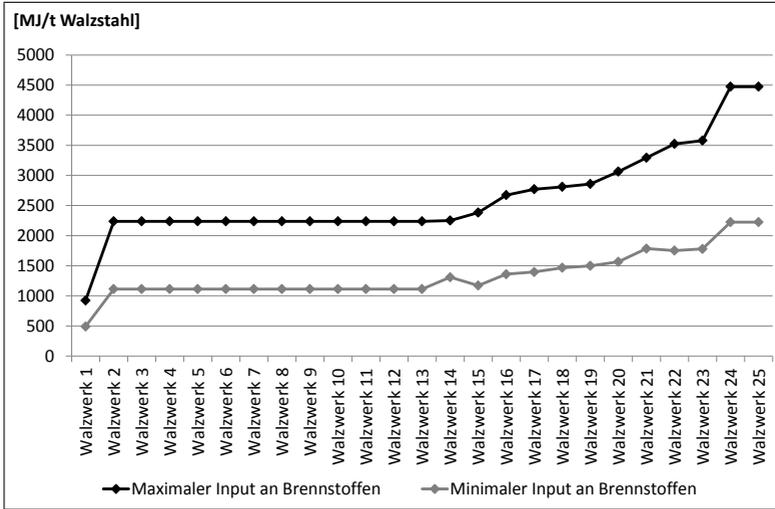


Abbildung 6.2.: Technische Ober- und Untergrenzen des Brennstoffeinsatzes für verschiedene Walzwerke der deutschen Eisen- und Stahlindustrie (Datengrundlage: [95, 306]).

Stoffflüsse bereinigt, so dass die tatsächlichen Produktionsmengen der einzelnen Anlagen zueinander in Beziehung gesetzt werden.⁹ Dabei gilt zu beachten, dass sich $ik_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext}$ bzw. $ok_{ii^{ZP},y,ii^{ZP},s}^{Werk,ext}$ bereits auf das Referenzprodukt jj^{Ref} beziehen.

$$\begin{aligned}
 suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s}^{int} \cdot suk_{jj^{ZP},jj^{Ref},s}^{int} &= suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s} \cdot suk_{jj^{ZP},jj^{Ref},s}^{int} \\
 + \sum_y \frac{-ik_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} + ok_{ii^{ZP},y,ii^{ZP},s}^{Werk,ext}}{1.000} &\quad \forall ii^{ZP}, jj^{ZP}, s \quad (6.20)
 \end{aligned}$$

⁹Bei der Berechnung von $suk_{ii^{WS},jj^{Stahl},s}^{int}$ für ein integriertes Hüttenwerk ist, abweichend von Nebenbedingung 6.20, auf die Vorzeichenänderung bei den externen In- und Outputs zu achten, da der Bezugspunkt durch eine Tonne Rohstahl $jj^{Stahl} \subset jj^{ZP}$, nicht durch eine Tonne Walzstahl ii^{WS} , gegeben ist.

Der technische SUK kann direkt aus den Inputkoeffizienten gemäß Gleichung 6.21 abgeleitet werden. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass gleiche Anlagentypen am selben Standort durch dieselben Inputs an Zwischenprodukten ii^{ZP} gekennzeichnet sind.

$$suk_{ii^{ZP},jj^{ZP},s} = \frac{ik_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}}{1.000} \quad \forall ii^{ZP},y,jj^{ZP},s \quad (6.21)$$

Einige der zu berechnenden werksinternen SUK können ex-ante angegeben werden. So beinhalten die statistischen Jahrbücher der Stahlindustrie [331] wie auch diverse Geschäftsberichte und Umwelterklärungen der Aluminiumindustrie (z.B. [8, 153, 290]) bereits Angaben zu den Produktionsmengen einzelner Zwischenprodukte, bspw. für Roheisen, Rohstahl, Walzstahl, Aluminiumoxid, Rohaluminium oder Aluminiumband. Diese Angaben können direkt zur Berechnung der werksinternen SUK herangezogen werden, was Nebenbedingung 6.22 für das Beispiel der an einem Standort hergestellten Roheisenmenge $ii^{Eisen} \subset ii^{ZP}$ bezogen auf die ebenfalls am Standort hergestellte Menge an Rohstahl jj^{Stahl} zeigt.

$$suk_{ii^{Eisen},jj^{Stahl},s}^{int} = \frac{q_{ii^{Eisen},s}^{AKT}}{q_{jj^{Stahl},s}^{AKT}} \quad \forall s \quad (6.22)$$

Wie bereits erläutert, ersetzen die werksinternen SUK das Modellieren einer Inversen, da die Anlagenstruktur mit allen direkten und indirekten Abhängigkeiten explizit über die SUK formuliert werden kann. Dies erfolgt für alle identifizierten Abhängigkeiten, wie in Nebenbedingung 6.23 für das Beispiel des Kokseinsatzes in einem integrierten Hüttenwerk dargestellt. Da Koks zum einen direkt als Reduktionsmittel im Hochofen und zum anderen indirekt bei der Vorbereitung des ebenfalls in den Hochofen aufgegebenen Eisenerzes in der Sinteranlage eingesetzt wird, sind beide Pfade explizit zu berücksichtigen (vgl. hierzu auch Abbildung 2.8 in Abschnitt 2.3.1).

$$\begin{aligned} suk_{ii^{Koks},jj^{Stahl},s}^{int} &= suk_{ii^{Koks},jj^{Eisen},s}^{int} \cdot suk_{jj^{Eisen},jj^{Stahl},s}^{int} \\ &+ suk_{ii^{Koks},jj^{Sinter},s}^{int} \cdot suk_{jj^{Sinter},jj^{Eisen},s}^{int} \\ &\cdot suk_{jj^{Eisen},jj^{Stahl},s}^{int} \quad \forall s \end{aligned} \quad (6.23)$$

Da im vorliegenden NLP keine Kostengrößen berechnet werden und die Abschätzung der Koeffizienten lediglich auf technischen Restriktionen gründet, sind weiterhin die folgenden Nebenbedingungen einzuhalten um eine realistische Ausgangskonfiguration für das Basisjahr zu erhalten. So gewährleistet Nebenbedingung 6.24, dass ein Zwischenprodukt ii^{ZP} nicht gleichzeitig zugekauft und veräußert werden kann, während Nebenbedingung 6.25 sicherstellt, dass Prozessgase ii^{PG} prinzipiell nicht über die Systemgrenzen eines Werkes hinaus zugekauft oder veräußert werden.

$$\sum_y \sum_{jj^{ZP}} ik_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} \cdot \sum_y \sum_{jj^{ZP}} ok_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} = 0 \quad \forall ii^{ZP},s \quad (6.24)$$

$$ik_{ii^{PG},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} = 0, \quad ok_{ii^{PG},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} = 0 \quad \forall ii^{PG},y,jj^{ZP},s \quad (6.25)$$

Für die Zwischenprodukte ii^{ZP} gilt weiterhin, dass ein Zukauf nur erfolgen kann, insofern die Kapazitäten der internen Produktion erschöpft sind, was die Analogie zur aktorsbasierten Simulation verdeutlicht (vgl. Restriktion 5.5). Der erste, in Klammern gesetzte Teil des Terms in Gleichung 6.26 ergibt sich daher nur genau dann zu Null, wenn die am Standort hergestellte und dort weiterverarbeitete Menge des Zwischenprodukts ii^{ZP} der Kapazität zur Herstellung von ii^{ZP} , welche durch den Faktor 1.000 von Tonnen auf kg umgerechnet wird, entspricht (Beide werden dabei auf das Referenzprodukt jj^{Ref} bezogen). Ist dies nicht der Fall, so gilt zwangsläufig $ik_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} = 0$.

$$\left(\frac{\sum_y kap_{y,ii^{ZP},s} \cdot 1.000}{q_{jj^{Ref},s}^{AKT}} - \sum_y \sum_{jj^{ZP}} ik_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{Werk,int} \right) \cdot \sum_y \sum_{jj^{ZP}} ik_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s}^{Werk,ext} = 0 \quad \forall ii^{ZP},s \quad (6.26)$$

Nebenbedingung 6.27 stellt analog zu Nebenbedingung 5.4 die Kapazitätsrestriktion dar und verhindert, dass der Output einer Anlage y

deren Kapazität, bezogen auf das Referenzprodukt jj^{Ref} , übersteigt. Die (Auslege-)Kapazitäten $kap_{y,ii^{ZP},s}$ der einzelnen in Deutschland vorhandenen Anlagen y können für die Eisen- und Stahlindustrie der PLANTFACTS-Datenbank [306] entnommen werden, während für die Aluminiumindustrie wiederum verschiedene Datenquellen wie Geschäftsberichte oder Umwelterklärungen (z.B. [8, 153, 290]) herangezogen werden.

$$ok_{ii^{ZP},y,ii^{ZP},s}^{Werk} \leq \frac{kap_{y,ii^{ZP},s} \cdot 1.000}{q_{jj^{Ref},s}^{AKT}} \quad \forall ii^{ZP},y,s \quad (6.27)$$

In Gleichung 6.28 finden die im PRTR [104] berichteten CO₂-Emissionen Eingang in das Modell, indem die entsprechenden Outputkoeffizienten $ok_{ii^{CO_2},y,jj^{ZP},s}^{Werk}$, multipliziert mit dem Output des Referenzprodukts jj^{Ref} , den für das Basisjahr berichteten Werten gleichgesetzt werden. Letztere werden dabei nicht standort-, sondern betreiberspezifisch ausgewiesen, sodass die von einem Unternehmen für ein Werk s berichteten CO₂-Emissionen $geg_{em,s}^{CO_2}$ ggf. nur einen Teil der Anlagen y dieses Werkes adressieren. Aus diesem Grund werden die CO₂-Emissionen eines Werkes s ggf. durch mehrere berichtete Werte (Index em) beschrieben, weshalb der Binärwert $bin_{em,y,jj^{ZP},s}^{CO_2}$ angibt, ob sich der berichtete Wert $geg_{em,s}^{CO_2}$ auf die das Zwischenprodukt jj^{ZP} herstellende Anlagen y bezieht ($bin_{em,y,jj^{ZP},s}^{CO_2} = 1$) oder nicht ($bin_{em,y,jj^{ZP},s}^{CO_2} = 0$). Um herauszufinden, welche Betreiber bzw. Unternehmen sich am gleichen Standort befinden, können die Standortinformationen des PRTR, wie Adressen oder Längen- und Breitengrade, herangezogen werden. Weiterhin ist zu beachten, dass einzelne Anlagen innerhalb der PRTR-Datenbank unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen (*Annex I Activity Codes*) zugeordnet sein können. So gehören bspw. Hochöfen dem Tätigkeitsbereich 2.(b) (*Installations for the production of pig iron or steel (primary or secondary melting) including continuous casting*) an, während Kokereien unter den Bereich 1.(d) (*Coke ovens*) fallen.

$$\sum_y \sum_{jj^{ZP}} \frac{ok_{ii^{CO_2},y,jj^{ZP},s}^{Werk}}{1.000} \cdot q_{jj^{Ref},s}^{AKT} \cdot bin_{em,y,jj^{ZP},s}^{CO_2} = geg_{em,s}^{CO_2} \quad \forall em,s \quad (6.28)$$

Die eigentliche Kohlenstoffbilanz wird durch Nebenbedingung 6.29 realisiert, die gewährleistet, dass der Input an Kohlenstoff einer Anlage y deren Output an Kohlenstoff entspricht (Massenbilanz).

$$\sum_{ii} ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk} \cdot cge_{ii} = \sum_{ii} ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk} \cdot cge_{ii} \quad \forall y, jj^{ZP}, s \quad (6.29)$$

Weiterhin ist eine anlagenübergreifende Bilanz vonnöten, um die Quellen und Senken der Kuppelprodukte, welche im Wesentlichen die Prozessgase umfassen¹⁰, zu verbinden. Dies zeigt Gleichung 6.30, welche darüber hinaus die Wichtigkeit eines gemeinsamen Bezugssystems (Referenzprodukt jj^{Ref}) verdeutlicht, das eine anlagenübergreifende Bilanz überhaupt erst ermöglicht.

$$\sum_y \sum_{jj^{ZP}} ik_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,int} = \sum_y \sum_{jj^{ZP}} ok_{ii,y,jj^{ZP},s}^{Werk,int} \quad \forall ii, s \quad (6.30)$$

Bisher wurden lediglich die Anlagen y explizit in der Modellierung betrachtet, welche die Prozessschritte der Stahl- und Aluminiumherstellung umfassen (Zwischenprodukte jj^{ZP}). Die in der aktorsbasierten Simulation separat modellierten Industriekraftwerke hingegen blieben in den bisherigen Ausführungen unberücksichtigt, wodurch jedoch die Kohlenstoffbilanz eines Standortes nicht vollständig wiedergegeben wird. Aus diesem Grund ist die Indexmenge jj^{ZP} für die Gleichungen 6.28 bis 6.30 um das Kraftwerk zu erweitern, wobei auch die Input- und Outputkoeffizienten des Kraftwerks auf das Referenzprodukt jj^{Ref} bezogen werden. Die modellierten Koeffizienten umfassen den Input an Brennstoffen $ii^{BS} \supset \{ii^{PG}, ii^{EG}\}$ sowie die CO₂-Emissionen ii^{CO_2} , während alle weiteren Koeffizienten gleich Null gesetzt werden. Für erstere werden keine technischen Ober- und Untergrenzen vorgegeben. Vielmehr stellt das Kraftwerk, ähnlich dem aktorsbasierten Simulationsmodell, eine Senke für die überschüssigen Prozessgase dar, was

¹⁰Neben den Prozessgasen fällt in einem integrierten Hüttenwerk bspw. eisenhaltiger Hochofenstaub an (werksinterner Output), welcher innerhalb der Sinteranlage recycelt werden kann (werksinterner Input). Elektrizität und Wärme als weitere zentrale Kuppelprodukte sind nicht kohlenstoffhaltig und werden daher nicht durch das NLP abgedeckt.

Nebenbedingung 6.31 verdeutlicht. Darin werden die Inputs an Prozessgasen $in_{ii^{PG},y,s}^{KW}$ eines Kraftwerks auf das Referenzprodukt jj^{Ref} bezogen und über die Differenz der an einem Standort entstehenden und in den einzelnen Prozessschritten eingesetzten Prozessgasen ii^{PG} bestimmt.

$$\sum_y \frac{in_{ii^{PG},y,s}^{KW} \cdot 1.000}{q_{jj^{Ref},s}^{AKT}} = \sum_y \sum_{jj^{ZP}} ok_{ii^{PG},y,jj^{ZP},s}^{Werk,int} - \sum_y \sum_{jj^{ZP}} ik_{ii^{PG},y,jj^{ZP},s}^{Werk,int} \quad \forall ii^{PG},s \quad (6.31)$$

Die vorgestellten Nebenbedingungen 6.13 bis 6.31 spannen den Lösungsraum auf, der durch die Fixierung weiterer Variablen zusätzlich eingeschränkt wird. Da nicht an jedem Standort alle der modellierten Anlagen betrieben werden und deshalb einige Zwischenprodukte ausschließlich zugekauft werden, müssen $ik_{ii,y,jj^{ZP},s}$ sowie $ok_{ii,y,jj^{ZP},s}$ an den entsprechenden Stellen gleich Null gesetzt werden.

Des Weiteren finden auch bereits technologiespezifische Restriktionen Eingang in die Schätzung der Koeffizienten. So ist die Technologie zur Rückgewinnung und energetischen Nutzung des Konvertergases (vgl. Abschnitt 6.2.2) nicht an jedem Standort eines integrierten Hüttenwerks installiert, weshalb die entsprechenden Outputkoeffizienten $ok_{ii^{Kon},y,jj^{ZP},s} = 0$ gesetzt werden. Ähnliches gilt für die Direkteinblasung von Reduktionsmitteln in den Hochofen (vgl. wiederum Abschnitt 6.2.2), wobei nur das tatsächlich eingesetzte Substitut ii^{Sub} , in Deutschland v.a. Kohle, nicht explizit gleich Null gesetzt wird. Die derzeit an einzelnen Anlagen eingesetzten Technologien lassen sich für die Eisen- und Stahlindustrie der PLANTFACTS-Datenbank [306] entnehmen, während für die Aluminiumindustrie diesbezüglich kaum öffentlich verfügbare standortspezifische Informationen vorliegen.¹¹

Der nun vollständig beschriebene Lösungsraum des NLP repräsentiert die verschiedenen (technisch) zulässigen Konfigurationen für jedes Werk

¹¹Den nicht vollständig verfügbaren Informationen zu den derzeit eingesetzten Technologien wird im Simulationsmodell durch eine entsprechende Validierungsphase Rechnung getragen (vgl. Kapitel 7).

s, d.h. die zulässigen Ausprägungen der einzelnen Koeffizienten, unter Berücksichtigung werkspezifischer Restriktionen. Zur Ableitung einer konkreten, möglichst realitätsnahen Ausgangskonfiguration für das Jahr t^{BAS} innerhalb dieses Lösungsraums wird die Zielfunktion gemäß Gleichung 6.32 definiert. Darin werden die quadratischen Abweichungen der Koeffizienten zu den Durchschnittswerten $ik_{ii,jj}^{med}$ bzw. $ok_{ii,jj}^{med}$ minimiert, wobei letztere den BVT-Merkblättern [95, 100, 101] entstammen und ein gewichtetes Mittel der in diesen Merkblättern untersuchten Anlagen darstellen.¹²

$$\sum_{ii} \sum_y \sum_{jj} \sum_s \left(\left(ik_{ii,y,jj}^{ZP,s} - ik_{ii,jj}^{med} \right)^2 + \left(ok_{ii,y,jj}^{ZP,s} - ok_{ii,jj}^{med} \right)^2 \right) \rightarrow \min \quad (6.32)$$

Das NLP wurde in GAMS (*Generic Algebraic Modeling System*) implementiert und als Solver Ipopt verwendet. Letzterer basiert auf dem Inneren-Punkte-Verfahren und kann auch auf große NLP angewendet werden [313]. Tabelle 6.5 fasst die durchgeführten Modellläufe für die einzelnen Verfahrensrouten zusammen. Die angegebenen Laufzeiten differieren dabei nicht nur aufgrund der unterschiedlichen Anzahl modellierter Werke, sondern resultieren ebenfalls aus der Komplexität des jeweiligen Problems, das maßgeblich durch die Anlagenstruktur (SUK) beeinflusst wird.

Die Anzahl der modellierten Werke, insgesamt 48 Stück, weicht leicht von den in Abbildung 2.7 (Abschnitt 2.3) dargestellten 46 Werken ab. Diese Diskrepanz ist dadurch zu erklären, dass an einigen wenigen Standorten sowohl primäre als auch sekundäre Produktionsrouten vorhanden sind und diese aufgrund von deren unterschiedlichen Prozessen und technischen Restriktionen für das vorgestellte NLP entsprechend aufzuteilen sind.

Auf einen Nachweis der Konvexität des Modells wird bewusst verzichtet, so dass die berechneten Ergebnisse nicht zwangsläufig das globale Optimum darstellen. Da aber der Fokus auf dem Auffinden einer technisch zulässigen Ausgangslösung liegt und der Lösungsraum durch die

¹²Für die Aluminiumindustrie werden weiterhin Daten der *European Aluminium Association* [91, 93] zur Bestimmung der Durchschnittswerte herangezogen.

Tabelle 6.5.: Mit dem entwickelten NLP durchgeführte Modellläufe

Verfahrensrout	Anzahl Werke	Anzahl Variablen	Laufzeit
Hochofenroute	9 ¹	≈ 46.500	≈ 12 min
Elektrostahlroute	20 ²	≈ 21.300	≈ 1 min
Aluminiumelektrolyse	5 ³	≈ 14.600	≈ 3 min
Sekundäraluminium (Refiner)	10 ⁴	≈ 300	≈ 4 sec
Sekundäraluminium (Remelter)	4 ⁴	≈ 100	≈ 4 sec

¹ Neben den acht deutschen Werken zur Herstellung von Primärstahl, welche mindestens einen Konverter besitzen, wird auch eine alleinstehende Kokerei, an deren Standort keine weiteren Prozessschritte durchgeführt werden, modelliert. Ein weiteres deutsches Hüttenwerk, welches eisenhaltige Reststoffe an Stelle von Eisenerz einsetzt (DK-Prozess, vgl. bspw. [121]), wird nicht betrachtet.

² Ein deutsches Werk, welches direkt reduziertes Eisen an Stelle von eisenhaltigem Schrott als Inputstoff verwendet, wird nicht betrachtet (vgl. Abschnitt 2.3.1).

³ Neben den vier deutschen Werken zur Herstellung von Primäraluminium, welche mindestens eine Schmelzflusselektrolyse besitzen, wird auch eine alleinstehende Anlage zur Produktion von Aluminiumoxid modelliert.

⁴ Die Diskrepanz zu den in Abschnitt 2.3.2 berichteten Zahlen von 14 Refinern bzw. 21 Remeltern kann dadurch erklärt werden, dass an einem Standort mehrere Anlagen des gleichen Typs vorhanden sein können, welche modellseitig im Falle der Sekundäraluminiumherstellung vereinfachend, aufgrund fehlender genauerer Informationen über die einzelnen an den Standorten eingesetzten Ofentypen, als eine Anlage modelliert werden.

zahlreichen Nebenbedingungen stark eingeschränkt ist, ist die Zielfunktion von eher untergeordneter Relevanz und ein lokales Optimum somit akzeptabel.

Insgesamt adressieren die mittels des NLP für das Basisjahr bestimmten Koeffizienten $ik_{ii,y,jj}^{ZP,s,tBAS}$ bzw. $ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,tBAS}$ 37 Stoffe. Diese sind entweder kohlenstoffhaltig oder es handelt sich dabei um Zwischenprodukte. Neben den individuell für jedes Werk berechneten Koeffizienten existieren jedoch weitere für die aktorsbasierte Simulation relevante Stoff- und Energieflüsse, die nicht über das NLP bestimmt werden können. Dazu zählen bspw. die eingesetzte oder erzeugte Elektrizität sowie Dampf, Sauerstoff oder PFC-Emissionen. Für die meisten dieser Koeffizienten werden daher Durchschnittswerte aus den BVT-Merkblättern [95, 100] sowie weiterer Studien [91, 93] herangezogen. Tabelle 6.6 gibt einen Überblick

Tabelle 6.6.: Anzahl der im aktorsbasierten Teilmodell betrachteten Stoffe je Verfahrensrouten

Verfahrensrouten	Anzahl Stoffe		Anteil werkspezifisch bestimmter Stoffe
	werkspezifisch bestimmt	Durchschnittswerte (für alle Werke gleich)	
Hochofenroute	22	8	73%
Elektrostahlroute	12	5	71%
Aluminiumelektrolyse	17	9	65%
Sekundäraluminium	6	6	50%
insgesamt (ohne Doppelzählungen)	39	13	75%

über die Anzahl werkspezifisch bestimmter Stoffe und solcher, die mittels Durchschnittswerten angegeben werden.

Während für die meisten nicht durch das NLP bestimmten Koeffizienten ein Durchschnittswert hinnehmbar erscheint, so beeinflussen die PFC-Emissionen der Schmelzflusselektrolyse, deren Stromverbrauch wie auch der Stromverbrauch des Elektrolichtbogenofens maßgeblich die entstehenden Treibhausgasemissionen (vgl. hierzu die Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2) und sollten daher ebenfalls werkspezifisch bestimmt werden. Die werkspezifischen PFC-Emissionen können dabei direkt dem PRTR [104] entnommen werden, wohingegen für den Stromverbrauch der einzelnen Elektrolysen Informationen über den Verbrauch an Gleichstrom zuzüglich der Trafoverluste (Hydro, persönliche Kommunikation, 8.6.2012) verwendet werden. Für die Berechnung des Stromverbrauchs der einzelnen Elektrolichtbogenöfen werden Daten der PLANTFACTS-Datenbank [306] über deren spezifischen Nennscheinleistung genutzt.¹³

¹³Weiterhin werden zur Berechnung des Stromverbrauchs der Walzwerke, analog zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs, Informationen über die einzelnen Prozesse aus den BVT-Merkblättern [95] genutzt und mit den in PLANTFACTS enthaltenen Auslegekapazitäten gewichtet, wodurch ebenfalls werkspezifische Werte generiert werden. Gleiches gilt für den Einsatz von Dampf.

Neben den nun für das Basisjahr t^{BAS} bestimmten Input- und Outputkoeffizienten, welche insgesamt 52 Stoffe umfassen¹⁴, können weiterhin die Verkaufsmengen $\vec{d}_{s,t^{BAS}}^{AKT}$ der einzelnen Werke abgeleitet werden. Dies geschieht gemäß Gleichung 6.33 über die Outputkoeffizienten $ok_{ii^{ZP},y,jj^{ZP},s,t^{BAS}}^{Werk,ext}$, welche die pro Tonne des Referenzprodukts jj^{Ref} im Basisjahr verkauften Zwischenprodukte ii^{ZP} widerspiegeln.

$$d_{ii^{ZP},s,t^{BAS}}^{AKT} = \frac{\sum_y ok_{ii^{ZP},y,ii^{ZP},s,t^{BAS}}^{Werk,ext}}{1.000} \cdot q_{jj^{Ref},s,t^{BAS}}^{AKT} \quad (6.33)$$

Zusammengefasst spiegeln die in diesem Abschnitt bestimmten werksspezifischen Koeffizienten die Produktionstechnologie sowie die Energieeffizienz der einzelnen Werke s im Basisjahr wieder. Um jedoch auch Aussagen über deren zukünftige Entwicklung machen zu können, werden in einem nächsten Schritt die energieeffizienzsteigernden Technologien, welche mögliche zukünftige Investitionsoptionen darstellen, in Abschnitt 6.2.2 spezifiziert.

6.2.2. Technische und wirtschaftliche Daten zu den energieeffizienzsteigernden Technologien

Ein wesentlicher Vorteil des in dieser Arbeit entwickelten Modells gegenüber zahlreichen vergleichbaren Ansätzen liegt in der detaillierten Abbildung der Produktionsprozesse (vgl. Kapitel 3). Dieser Detailgrad wird auch bei der Modellierung energieeffizienzsteigernder Technologien beibehalten. Die bereits in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 erläuterten Charakteristika der Produktionsprozesse werden daher im Folgenden auf Anlagenebene weiter spezifiziert, um die Auswirkungen einzelner Technologien auf die Energieeffizienz analysieren zu können.

Die durch das Modell abgedeckten Technologien sind dabei nahezu ausschließlich den BVT-Merkblätter entnommen [95, 100, 101] und repräsentieren somit den Stand der Technik (vgl. Abschnitt 2.2.6). Weitere

¹⁴In der aktorsbasierten Simulation führt dies zu einer Technologiematrix $TEC_{s,t}$ der Dimensionen 104×104 . Ein Überblick über die berücksichtigten Stoffe findet sich in Tabelle A.4 in Anhang A.3.

Veröffentlichungen und Studien, welche energieeffizienzsteigernde Technologien der Metallindustrie aufzeigen, lassen sich für die Eisen- und Stahlindustrie bspw. in [46, 114, 133, 134, 223, 224, 258, 330, 334], für die Aluminiumindustrie bspw. in [79, 235, 258] finden.

Eine in den BVT-Merkblättern enthaltene Technologie wird in den folgenden Ausführungen genau dann berücksichtigt, wenn sie entweder den Einsatz an Energieträgern reduziert oder durch die Erzeugung zusätzlicher Kuppelprodukte wie Elektrizität oder Dampf zu indirekten Minderungen der Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren beiträgt. Energieeffizienzsteigernde Technologien, die nicht Bestandteil der BVT-Merkblätter sind, aber in anderen Studien beschrieben werden und ggf. in (naher) Zukunft ihre Marktreife erlangen können, werden in den folgenden Ausführungen nur kurz umrissen, da sie keinen Bestandteil der im Simulationsmodell verwendeten Datenbasis darstellen.

6.2.2.1. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz am Hochofen

Der Hochofen bildet die zentrale Anlage der Primäreisenerzeugung.¹⁵ Reduktionsmittel (Koks), oxidische Eisenträger (hauptsächlich Sinter und Eisenerz) sowie Zuschlagstoffe (Bsp.: Schlackenbildner) werden zum sogenannten Möller vermischte und von oben in den Hochofen chargiert. Die entstehende Möllersäule wird nach dem Gegenstromprinzip von unten mit heißer durch Sauerstoff und weitere Reduktionsmittel angereicherter Luft, dem sogenannten Heißwind, durchströmt. Der im Koks enthaltene Kohlenstoff wird dadurch verbrannt, wodurch zum einen die benötigte Reaktionswärme erzeugt wird und zum anderen Kohlenstoffmonoxid entsteht, welches das Eisenerz reduziert und selbst zu CO_2 oxidiert. Somit hängen die CO_2 -Emissionen direkt vom eingesetzten Koks ab, weshalb der größte Teil der energieeffizienzsteigernden Technologien auf den verminderten Einsatz dieses Reduktionsmittels abzielt. Als Produkte entstehen Roheisen und Schlacke, welche regelmäßig abgestochen werden.

Die bedeutendste Technologie zur Reduktion des Koksverbrauchs stellt nach dem aktuellen Stand der Technik die Direkteinblasung verschiedener

¹⁵Informationen zum Verfahrensablauf lassen sich bspw. in [100, 241, 243] finden.

Reduktionsmittel dar, welche einen Teil des eingesetzten Koks ersetzen können. Die Einblasung dieser Kohlenwasserstoffe findet zusammen mit dem Heißwind auf der unteren Ebene des Hochofens (Blasformebene) statt. Als Reduktionsmittel kommen Kohle, Schweröl, Kokereigas oder Kunststoffe in Frage. Weiterhin ist eine proportional mit der Einblasrate ansteigende Sauerstoffzufuhr erforderlich, um die benötigte Temperatur zu erreichen [100]. Da Koks neben seiner Funktion als Reduktionsmittel ebenfalls als Stützgerüst der Möllersäule fungiert, kann eine bestimmte Menge an Koks jedoch nicht unterschritten werden ohne die Stabilität des Prozesses zu gefährden ($ik_{ii}^{min\ Koks}, jj^{Eisen} = 282 \frac{kg\ Koks}{t\ Eisen}$). Die Einblasraten der anderen Reduktionsmittel sind ebenfalls begrenzt, im Falle von Kohle und Öl durch die thermodynamischen Bedingungen (zu hohe Senkung der Wirbelzonentemperatur), im Falle von Kokereigas durch den enthaltenen Schwefel und im Falle von Kunststoff durch das enthaltene Chlor sowie die enthaltenen Schwermetalle [100]. Die genauen Auswirkungen der verschiedenen Technologien zur Direkteinblasung von Reduktionsmitteln auf die Inputkoeffizienten eines Hochofens stellt Tabelle 6.7 dar. Daneben hängt ebenfalls der Sauerstoffeinsatz von den Einblasraten ab. Bei Verwendung von Kokereigas als Reduktionsmittel ist weiterhin zu beachten, dass dieses nicht mehr an anderer Stelle des integrierten Hüttenwerks energetisch genutzt werden kann (vgl. hierzu die Ausführungen zum Energiemanagement in Abschnitt 2.3.1 sowie Gleichungen 5.9 und 5.10 in Abschnitt 5.1.1).

Eine weitere Technologie zur Steigerung der Energieeffizienz eines Hochofens setzt an der Energierückgewinnung des unter Druck stehenden Gichtgases (Hochofengases) an. Hierfür wird eine Gichtgasentspannungsturbine (GET) verwendet, welche hinter der Reinigungsanlage für das Hochofengas installiert werden kann [100]. Die Stromerzeugung einer GET hängt dabei einerseits vom Druckunterschied und andererseits vom Gichtgasvolumen ab, welches wiederum von der Kapazität des Hochofens beeinflusst wird. Um die Leistung einer an einem bestimmten Hochofen installierten GET beziffern zu können, wird im Folgenden eine Regressionsanalyse vorgenommen. Diese stützt sich auf Daten existierender Hochöfen [306] und unterstützt die Identifizierung des wichtigsten, die Leistung beeinflussenden Parameters. Die Ergebnisse der Analyse zeigt Abbildung 6.3. Darin wird deutlich, dass die Abhängigkeit der Leistung vom Druck am ehesten durch eine Exponentialkurve angenähert werden kann, während sich für die Abhängigkeit der Leistung von der Kapazität ein eher linearer Zusam-

Tabelle 6.7.: Auswirkungen der Direkteinblasung verschiedener Reduktionsmittel auf die Inputkoeffizienten eines Hochofens (Datengrundlage: [100])

Technologie	Senkung Koksverbrauch $\Delta ik_{te,ii}^{tech}{}_{Koks,jj}{}^{Eisen}$	Erhöhung Einblasung Reduktionsmittel $\Delta ik_{te,ii}^{tech}{}_{Sub,jj}{}^{Eisen}$	maximale Einblasrate $ik_{ii}^{max}{}_{Sub,jj}{}^{Eisen}$
Direkt- einblasung Kohle	- 0,9 $\frac{kg\ Koks}{t\ Eisen}$	+ 1 $\frac{kg\ Kohle}{t\ Eisen}$	260 $\frac{kg\ Kohle}{t\ Eisen}$
Direkt- einblasung Öl	- 1,2 $\frac{kg\ Koks}{t\ Eisen}$	+ 1 $\frac{kg\ Öl}{t\ Eisen}$	130 $\frac{kg\ Öl}{t\ Eisen}$
Direkt- einblasung Kokereigas	- 0,98 $\frac{kg\ Koks}{t\ Eisen}$	+ 37,8 $\frac{MJ\ Kok.gas}{t\ Eisen}$	3.780 $\frac{MJ\ K.gas}{t\ Eisen}$
Direkt- einblasung Kunststoffe	- 0,75 $\frac{kg\ Koks}{t\ Eisen}$	+ 1 $\frac{kg\ Kunstst.}{t\ Eisen}$	70 $\frac{kg\ Kunstst.}{t\ Eisen}$

menhang attestieren lässt. Weiterhin lässt sich feststellen, dass bei einem Druck von etwa 3,5 bar eine Häufung sehr unterschiedlicher Leistungswerte auftritt, weshalb der Druck nur bedingt herangezogen werden kann um die Leistung einer GET zu bestimmen. Da zudem das Bestimmtheitsmaß R^2 eine größere Abhängigkeit von der Auslegekapazität des Hochofens vermuten lässt, werden die entsprechenden Parameter der linearen Regression zur Bestimmung der Leistung einer GET herangezogen. Somit ergibt sich für $a^{reg} = -0,909\ MW$ und für $b^{reg} = 4,8 \cdot 10^{-6} \frac{MW}{t}$. Der durchschnittliche Auslastungsfaktor alf^{GET} , welcher zur Berechnung der jährlich erzeugten Strommenge herangezogen wird, lässt sich anhand der Daten zweier GETs bestimmen und wird hier auf 0,66 gesetzt (vgl. [40, 60, 306]).

Ein Vorheizen der Brennstoffe in den Winderhitzern stellt eine weitere vielversprechende Technologie dar, um die Emissionen an Treibhausgasen zu mindern. Dabei wird die Eigenwärme des Abgases über einen Wärmetauscher zum Vorheizen verwendet, wodurch Brennstoffeinsparungen von etwa $\sum_{iiBS} \Delta ik_{te,ii}^{tech}{}_{BS,jj}{}^{Eisen} = -300 \frac{MJ\ Brennstoffe}{t\ Eisen}$ realisiert werden können.

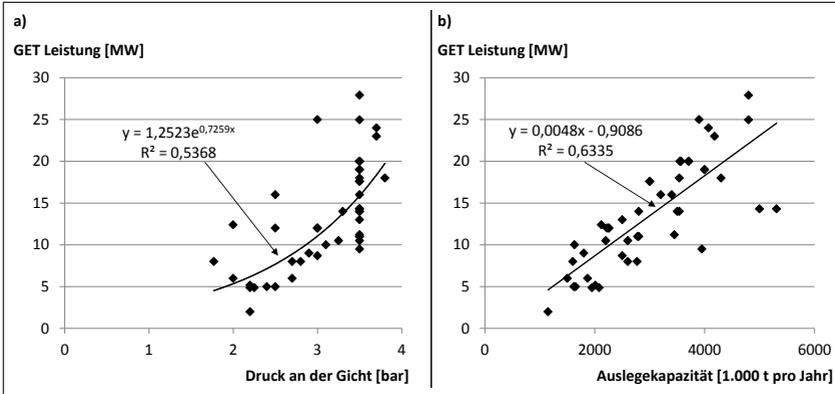


Abbildung 6.3.: Regressionsanalyse der Leistung einer installierten GET bezogen auf a) den Druck an der Gicht und b) die Auslegekapazität verschiedener Hochöfen (Datengrundlage: [306]).

Neben den in den BVT-Merkblättern festgehaltenen Technologien zur Reduktion der Emissionen eines Hochofens existieren weitere, die allerdings noch nicht als Stand der Technik gelten (*Emerging Techniques*) und daher nicht im Modell berücksichtigt werden. So erreicht die Technologie zur Gichtgasrückführung, welche die Abscheidung von Kohlendioxid und die erneute Nutzung des verbliebenen Kohlenmonoxids als Reduktionsmittel ermöglicht, derzeit lediglich den Status einer Pilotanlage (vgl. bspw. [114, 258]). Eine Abwärmenutzung der Hochofenschlacke wird momentan ebenfalls noch nicht praktiziert (vgl. bspw. [114, 258]). Weitere *Emerging Techniques* umfassen bspw. die Verwendung von Biokohle als Reduktionsmittel [46], während andere Technologien eine weitgehende Restrukturierung der Prozesse erfordern. Einen Überblick über die Technologien *Corex*, *Finex*, *CCS (Carbon capture and storage)*¹⁶, *ULCORED*, *Midrex*, *HYL*, *HIsarna* oder *ULCOWIN* kann bspw. [134, 223, 224] entnommen werden. Der zukünftige Einsatz dieser genannten Technologien

¹⁶Die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid könnte in Zukunft auch in Verbindung mit der Gichtgasrückführung eingesetzt werden. Bezüglich *CCS* werden zwar große Potenziale bei der Minderung industrieller Prozessemissionen gesehen (vgl. z.B. [141]), jedoch wird diese Technologie auf politischer Ebene kontrovers diskutiert, da sie die Nutzung fossiler Ressourcen verlängern könnte (vgl. z.B. [90]).

ist jedoch eher beim Anlagenneubau zu erwarten, da die Integration in Bestandsanlagen in der Regel erhebliche zusätzliche Kosten verursachen würde. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell legt den Fokus auf bereits bestehende Werke, sodass die letztgenannten Technologien nicht in der Simulation betrachtet werden.

6.2.2.2. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz an der Sinteranlage

Für den effizienten Betrieb moderner Hochöfen ist eine Vorbehandlung des Eisenerzes notwendig, um die Durchlässigkeit der Möllersäule und damit die Reduzierbarkeit der oxidischen Eisenträger zu erhöhen [100]. Das Sintern dient dem Stückigmachen der Feinanteile eines Erzes und ist das in Deutschland gebräuchliche Vorbereitungsverfahren [243]. Die ebenfalls anwendbare Pelletiertechnik wird hingegen in keinem deutschen Werk eingesetzt (vgl. [306]). Bei den auf das Sinterband aufgegebenen Stoffen handelt es sich um Eisenerze, Brennstoffe (vornehmlich Koks), Additive (z.B. Branntkalk) und zurückgeführte eisenhaltige Feinanteile (Kreislaufstoffe, wie bspw. Staub aus dem Hochofen oder Walzzunder). Das Sinterband selbst ist ein kontinuierlich umlaufender Rost, welcher einen Zündofen durchläuft. Durch letzteren werden die Oberfläche der Sintermischung erhitzt und der enthaltene Kohlenstoff verbrannt, wobei von unten Luft durch die Sintermischung gesaugt wird, so dass sich die Brennzonen von oben nach unten fortbewegt [243]. Durch das Verkleben der Erzkörner entsteht ein steinartiges, poröses Material [241], welches im Anschluss gekühlt und zerkleinert wird.

Technologien zur Reduktion des Brennstoffeinsatzes einer Sinteranlage umfassen unterschiedliche Maßnahmen zur Nutzung der Abwärme des Sinterprozesses. Diese gliedern sich in die Nutzung der Eigenwärme aus der heißen Abluft des Sinterkühlers sowie in die Abgasrückführung und können je nach Technologie auch kombiniert auftreten. Etwa 18% des bis zu 300 °C heißen Abgases des Sinterkühlers können bspw. durch einen Abhitzeessel in Form von Dampf zurückgewonnen werden [100]. Bezüglich der Abgasrückführung existieren darüber hinaus fünf kommerziell genutzte und in den BVT-Merkblättern beschriebene Verfahren: EOS (*Emission optimised sintering*), LEEP (*Low emission and energy optimised*

sintering process), EPOSINT (*Environmental process optimised sintering*) sowie zwei abschnittsweise Abgasrückführungen, von denen eine mit einem zusätzlichen Abhitzekegel zur Dampferzeugung operiert.

Beim EOS wird ein Teil des Abgases (etwa 40-45%) vom gesamten Sinterband über ein zusätzliches Gebläse auf die gesamte Fläche des Sinterbandes zurückgeführt, während LEEP dezidiert nur das gesamte Abgas der zweiten Hälfte des Sinterbandes erfasst und dies ebenfalls auf die gesamte Länge des Sinterbandes zurückführt.¹⁷ Die Oxidation des im zurückgeführten Gas enthaltenen Kohlenmonoxids in der Flammenfront liefert dem System Wärme und ermöglicht so die Ersetzung eines Teils der Wärmebereitstellung aus dem Einsatz von festen Brennstoffen [100]. Das EPOSINT-Verfahren nutzt ähnlich zu LEEP eine selektive Abgasrückführung und integriert darüber hinaus das heiße Abgas des Sinterkühlers. Bei der abschnittswisen Abgasrückführung wird das Sinterband in vier Zonen aufgeteilt, wobei zwei der Abgasströme gereinigt und über einen Kamin abgeleitet werden, während die anderen beiden auf das Sinterband zurückgeführt werden. Dies birgt den Vorteil, dass die unterschiedlichen Zusammensetzungen des Abgases in den einzelnen Zonen entsprechend adressiert und die Sauerstoff-reicheren Abgase für die Rückführung genutzt werden können [100]. Die mit den einzelnen Technologien einhergehenden Koeffizientenänderungen finden sich in Tabelle 6.8. Im Gegensatz zu Tabelle 6.7, welche die kontinuierlichen Inputsubstitutionen darstellt ($typ_{te} = 2$), werden in Tabelle 6.8 die absoluten Änderungen der beschriebenen einmaligen Maßnahmen angegeben ($typ_{te} = 1$, vgl. Abschnitt 5.1.2).

Neben den aufgezeigten Koeffizientenänderungen steigt weiterhin der Stromverbrauch bedingt durch die Nutzung zusätzlicher Gebläse bei der Abgasrückführung an. Es ist anzumerken, dass der Auslöser zur Installation der in Tabelle 6.8 dargestellten Technologien nicht vornehmlich bei den realisierten Energieeinsparungen, sondern eher in dem kleineren Abgasvolumenstrom und die dadurch ermöglichte geringere Dimensionierung der Technologien zur Abgasnachbehandlung liegt. Weitere wichtige Gründe für die Implementierung dieser Technologien stellt die Minderung von Schadstoffen, wie etwa der SO_2 , NO_x , CO- oder Staub-Emissionen dar.

¹⁷In der zweiten Hälfte des Sinterbandes treten höhere Konzentrationen an Schwefeloxiden und Chlorverbindungen auf, die im Falle von LEEP absorbiert werden können [100].

Tabelle 6.8.: Auswirkungen verschiedener Technologien zur Abwärmenutzung auf die Input- und Outputkoeffizienten einer Sinteranlage (Datengrundlage: [100])

Technologie	Senkung Koksverbrauch $\Delta i_{te,ii}^{k,tech} Koks_{,jj} Sinter$	Erhöhung Dampferzeugung $\Delta o_{te,ii}^{k,tech} Da_{,jj} Sinter$
Abhitzekeessel (Sinterkühler) ¹	-	+ 73,6 $\frac{MJ Dampff}{t Sinter}$
Abgasrückführung (EOS)	-6 $\frac{kg Koks}{t Sinter}$	-
Abgasrückführung (LEEP)	-6 $\frac{kg Koks}{t Sinter}$	-
Abgasrückführung (EPOSINT)	-3,5 $\frac{kg Koks}{t Sinter}$	-
abschnittsweise Abgasrückführung (vier Zonen)	-3,2 $\frac{kg Koks}{t Sinter}$	-
abschnittsweise Abgasrückführung (inkl. Abhitzekeessel) ²	-3,2 $\frac{kg Koks}{t Sinter}$	+ 359,6 $\frac{MJ Dampff}{t Sinter}$

¹ Die Wärmerückgewinnung von 18% wird vereinfachend unter Zuhilfenahme der spezifischen Wärmekapazität von Luft, der Luftdichte und einem angenommenen Abgasstrom von 1.250 Nm³ pro Tonne Sinter bei 300 °C (vgl. [100]) auf den Outputkoeffizienten für Dampf umgerechnet.

² Die Dampferzeugung von 120 kg pro Tonne Sinter bei einer Temperatur von 273 °C und einem Druck von 9 bar (vgl. [100]) wird über die spezifische Enthalpie von überhitztem Wasserdampf auf den Outputkoeffizienten für Dampf umgerechnet.

Eine weitere, nicht in den BVT-Merkblättern enthaltene Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz einer Sinteranlage stellt bspw. die Erhöhung der Sinterbetttiefe dar [114], welche jedoch nur mit geringen Effizienzverbesserungen einhergeht (vgl. [133]) und daher modellseitig nicht berücksichtigt wird.

6.2.2.3. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz an der Kokerei

Neben Sinter ist Koks ein weiterer wesentlicher Einsatzstoff für den Hochofenprozess, da Koks, welches hauptsächlich aus elementarem Kohlenstoff besteht, die erforderliche Energie sowie das Reduktionsgas CO liefert. Da-

neben fungiert es als Stützgerüst im Hochofen, das sowohl die Durchgasung der Möllersäule gewährleistet als auch das Abtropfen von flüssigem Eisen und Schlacke ermöglicht [122]. Für die Erzeugung von Koks in einer Kokelei wird zunächst die eingesetzte Kohle unter Sauerstoffausschluss erhitzt um die flüchtigen Bestandteile auszutreiben (Pyrolyse). In diesem Prozess entsteht auch das heizwertreiche Kokereigas (vgl. bspw. Tabelle 6.2), welches gesammelt und gereinigt wird. Im Anschluss an die sogenannte Verkokung wird der glühende Koks mit Wasser gelöscht um ein Verbrennen zu verhindern, wobei 40-50% des Löschwassers sofort verdampfen [122].

Die Technologie der Kokstrockenkühlung (KTK) hingegen kann das zuletzt beschriebene Kokslöschen ersetzen und die im Koks enthaltene Wärme nutzbar machen. Eine KTK-Anlage besteht aus Kühlkammern, welche mit Abhitzekesteln verbunden sind. Zur Kühlung werden im Kreislauf geführte Inertgase, hauptsächlich Stickstoff, eingesetzt. Die Abhitzekesteln kühlen wiederum die Inertgase und erzeugen große Mengen an Hochdruckdampf, wodurch sich modellseitig die Änderung des Outputkoeffizienten für Dampf zu $\Delta \sigma_{te,ii}^{tech, jj}{}_{Koks} = 1.369 \frac{MJ \text{ Dampf}}{t \text{ Koks}}$ ergibt.¹⁸ Weiterhin ist ein erhöhter Stromverbrauch für die zusätzlich erforderlichen Gebläse zu berücksichtigen [100].

Eine weitere Möglichkeit der in den BVT-Merkblättern aufgeführten Technologien ist die Nutzung von „Heat-Recovery“-Koksöfen (vgl. bspw. auch [134]). In diesen erfolgt eine direkte Verbrennung und energetische Nutzung der Gase und des als Nebenprodukt entstehenden Teers, wodurch keine Anlagen zur Behandlung des Kokereigases notwendig sind. Diese Technologie ist jedoch nur bei einer Neukonzeptionierung der gesamten Anlage anwendbar, wobei eine wirtschaftlich vorteilhafte Integration in einen bestehenden Anlagenverbund fraglich ist, da kein Kokereigas gewonnen wird und daher im Energieverbund nicht genutzt werden kann [100]. Aus diesen Gründen werden im Modell keine „Heat-Recovery“-Koksöfen betrachtet.

Weitere Technologien wie Koksöfen mit sehr großen Volumen [114] oder SCOPE21, welche eine sehr schnelle Aufheizung und Karbonisierung der

¹⁸Die Dampferzeugung von 500 kg pro Tonne Koks bei einem Druck von 93 bar (vgl. [100]) wird über die spezifische Enthalpie von Wasserdampf im Sättigungszustand auf den Outputkoeffizienten für Dampf umgerechnet.

Kohle vorsieht [134, 330], befinden sich noch im Entwicklungsstadium und werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

6.2.2.4. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz am Konverter

Das im Hochofen entstehende Roheisen enthält neben unerwünschten Begleitelementen wie bspw. Schwefel, Phosphor, Silicium oder Mangan noch zu viel Kohlenstoff, welcher durch die Reduktionsmittel eingebracht wurde und das Material spröde macht. Um den Kohlenstoffgehalt von etwa 4% auf Werte $<0,5\%$ zu senken und die unerwünschten Begleitelemente zu entfernen wird das Roheisen daher im Konverter gefrischt. Beim gängigsten Sauerstoffblasverfahren (LD-Verfahren) wird hierzu reiner Sauerstoff durch eine Lanze auf die Schmelze geblasen, wodurch Oxidations- bzw. Verbrennungsprozesse in Gang gesetzt werden. Zur Kühlung und Temperaturkontrolle wird dem Konverter weiterhin Schrott zugeführt und eingeschmolzen. Neben dem Rohstahl, der abgegossen wird, entsteht CO-reiches Konvertergas (vgl. bspw. Tabelle 6.2), welches in der Vergangenheit häufig energetisch ungenutzt blieb und abgefackelt wurde [122].

Zwei in den BVT-Merkblättern aufgeführte, sich gegenseitig ausschließende Technologien ermöglichen hingegen eine energetische Nutzung dieses Prozessgases. Zum einen existiert die Möglichkeit der vollständigen Verbrennung unter Nutzung der Abwärme in einem Abhitzeessel zur Dampferzeugung, zum anderen ist auch eine Unterdrückung der Verbrennung mit anschließender Zwischenspeicherung des Gases für eine weitergehende Verwendung im Energieverbund des Hüttenwerks umsetzbar. Aufgrund der geringeren Gasmengen und der deutlich flexibleren Nutzung des Konvertergases gegenüber Dampf lässt sich derzeit ein eindeutiger Trend in Richtung unterdrückte Verbrennung feststellen [100]. Da die beiden beschriebenen Möglichkeiten der Energierückgewinnung weit verbreitet sind, ist davon auszugehen, dass jeweils eine der beiden Technologien an allen in dieser Arbeit untersuchten Convertern bereits verwendet wird. Aus diesen Gründen wird nur der Wechsel von der vollständigen Verbrennung des Konvertergases mit anschließender Dampferzeugung hin zu einer unterdrückten Verbrennung, im Folgenden als Konvertergasrückgewinnung (KRG) bezeichnet, modelliert. Die Änderungen der Koeffizienten ergeben sich somit

zu $\Delta o_{te,ii}^{k,tech}_{Kon,jjStahl} = 525 \frac{MJ \text{ Konvertergas}}{t \text{ Stahl}}$ für den Output des Konvertergases, zu $\Delta o_{te,ii}^{k,tech}_{CO_2,jjStahl} = -99 \frac{kg \text{ CO}_2}{t \text{ Stahl}}$ für die CO₂-Emissionen¹⁹ und zu $\Delta o_{te,ii}^{k,tech}_{Da,jjStahl} = -172 \frac{MJ \text{ Dampf}}{t \text{ Stahl}}$ für die reduzierte Dampferzeugung²⁰.

Gemäß der BVT-Merkblätter stellen endabmessungsnahe Bandgießverfahren eine weitere Möglichkeit der Energieeinsparung dar. Beim konventionellen Strangguss, welcher sich direkt an das Sauerstoffblasverfahren anschließt, sind zusätzliche Prozessschritte zur Wiedererwärmung der Brammen vor dem eigentlichen Walzen notwendig. Diese können entfallen, wenn bereits sehr dünne, endabmessungsnahe Bänder gegossen werden [100]. Problematisch zeigt sich hierbei jedoch einerseits, dass nicht alle Formen direkt endabmessungsnah gegossen werden können und andererseits, dass ein typisches Produktspektrum eines Stahlherstellers eine sehr hohe Vielfalt an unterschiedlichen Formen benötigt, was zu wirtschaftlichen Beeinträchtigungen führen könnte [114]. Aus diesen Gründen wird von der Modellierung dieser Technologie abgesehen.

6.2.2.5. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz am Elektrolichtbogenofen

Neben der primären Rohstahlerzeugung über die Hochofenroute wird Rohstahl ebenfalls über die Elektrostahlroute recycelt. Ein Elektrolichtbogenofen kann entweder mit Wechselstrom oder mit Gleichstrom betrieben werden. Beiden Verfahren gemein ist, dass Graphitelektroden in den Herd gesenkt und gezündet werden, um den chargierten Schrott inklusive der Zuschlagstoffe, Reduktionsmittel und Legierungselemente aufzuschmelzen. Der Lichtbogen brennt dabei zwischen den Elektroden und dem Schrott bzw. der Schmelze. Analog zum Konverter wird auch hier zur Reduzierung

¹⁹Die Reduktion der CO₂-Emissionen wird aus dem zurückgewonnenen Konvertergas von 525 MJ pro Tonne Stahl [100] abgeleitet (Kohlenstoffbilanz), welches vor der Installation der KRG zur Dampferzeugung verbrannt wurde.

²⁰Da auch bei der unterdrückten Verbrennung ein Abhitzeessel zur Dampferzeugung verwendet wird und etwa ein Viertel des Dampfes im Vergleich zur vollständigen Verbrennung erzeugt werden kann, wird der entsprechende Outputkoeffizient lediglich um $\frac{3}{4}$ des ursprünglichen Wertes ($229,5 \frac{MJ \text{ Dampf}}{t \text{ Stahl}}$, vgl. [100]) verringert.

des Kohlenstoffgehalts der Rohstahl nach dem Einschmelzen durch Einblasen von Sauerstoff gefrischt [122]. Letztlich werden, wiederum ähnlich zum Konverter, Schlacke und Rohstahl abgegossen.

Wesentliche Energieeinsparungen können durch die Technologie der Schrottvorwärmung realisiert werden, wobei hierzu die Abwärme der Abgase genutzt wird. Unterscheidungen der zum Einsatz kommenden Verfahren lassen sich gemäß der BVT-Merkblätter hinsichtlich der Betriebsweise - Batch-Prozess oder kontinuierlich - vornehmen. Im diskontinuierlich betriebenen Fingerschachtofen, welcher auf dem Dach des Elektrolichtbogenofens installiert ist, können 100% des Schrotts in zwei Körben vorgewärmt werden. Der erste Korb wird dabei während der Raffination der vorherigen Charge und der zweite beim Schmelzen des ersten Korbes vorgewärmt [100]. Eine kontinuierlich betriebene Schrottvorwärmung kann hingegen über das CONSTEEL-Verfahren realisiert werden. Hier wird der Schrott über ein Förderband chargiert, das von den Ofenabgasen durchströmt wird. Die durch die Vorwärmung eingesparte Elektrizität ergibt sich zu $\Delta ik_{te,ii^{El},jj^{Stahl}}^{tech} = -337 \frac{MJ \text{ Strom}}{t \text{ Stahl}}$ für den Fingerschachtofen und zu $\Delta ik_{te,ii^{El},jj^{Stahl}}^{tech} = -220 \frac{MJ \text{ Strom}}{t \text{ Stahl}}$ für das CONSTEEL-Verfahren [158].

Zusätzliche Oxy-Fuel-Brenner können in Verbindung mit Sauerstoffanlagen zu Energieeinsparungen führen, da Lastspitzen in der Stromversorgung ausgeglichen werden können und ein gleichmäßiges Schmelzen des Schrotts realisierbar ist [100]. Der zusätzliche Bedarf an Erdgas²¹ von $\Delta ik_{te,ii^{EG},jj^{Stahl}}^{tech} = 196 \frac{MJ \text{ Erdgas}}{t \text{ Stahl}}$ [200] wird dabei in der Regel hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs durch die Stromeinsparungen in Höhe von $\Delta ik_{te,ii^{El},jj^{Stahl}}^{tech} = -140 \frac{MJ \text{ Strom}}{t \text{ Stahl}}$ [134] überkompensiert. Der Sauerstoffinput nimmt ebenfalls zu.

Weitere bereits verfügbare, aber modellseitig nicht tiefgehend betrachtete Technologien stellen u.a. der Schaumslaggenbetrieb [100], welcher die Energieverluste durch Wärmestrahlung reduziert, der Einsatz leistungsfähigerer Transformatoren [46, 100], die Bodenrührung unter Zuhilfenahme eines Inertgases für einen verbesserten Wärmetransfer in der Schmelze [46, 114] sowie der Wechsel zum Gleichstrombetrieb [114] dar. Letzterer wird dabei ohnehin lediglich für Neuanlagen in Betracht gezogen,

²¹McIntyre und Landry [200] geben einen Sauerstoffbedarf von durchschnittlich 10 Kubikfuß ($\approx 0,3 \text{ m}^3$) pro kWh eingesparter elektrischer Energie an, wobei das benötigte Volumen an Erdgas etwa die Hälfte beträgt.

während die erstgenannten Technologien mit vergleichsweise kleineren Effizienzsteigerungen einhergehen (vgl. [46]).

6.2.2.6. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz im Walzwerk

Der letzte Prozessschritt der beiden betrachteten Verfahrensrouten zur Stahlherstellung stellt das Walzen dar und schließt sich direkt an den Strangguss an. Die zahlreichen im Walzwerk stattfindenden Prozesse können grob in drei Kategorien eingeteilt werden: Warmwalzen, Kaltwalzen sowie Oberflächenveredelung / -beschichtung [122]. Beim Warmwalzen werden die gegossenen und erstarrten Brammen zunächst in Öfen wiedererwärmt und anschließend zu Warmbreitbändern oder Grobblechen gewalzt. Der durch Oxidation der Metalloberfläche entstehende Walzzunder wird darauffolgend mittels Wasserdüsen und hohem Druck entfernt. Beim Kaltwalzen hingegen erfolgt die Umformung unmittelbar durch mechanische Krafteinwirkung, wobei hierzu entsprechend höhere Kräfte erforderlich sind [122]. Die Entzunderung wird beim Kaltwalzen sowohl mechanisch als auch chemisch mittels Beizen vorgenommen, wobei vor allem Salzbzw. Schwefelsäure eingesetzt werden. Zur Beschichtung und Erhöhung der Korrosionsfestigkeit von Stählen können Schmelztauch-, elektrolytische oder organische Beschichtungslinien (vgl. bspw. [306]) eingesetzt werden.

Das endabmessungsnahe Bandgießverfahren, welches Strangguss und Walzen integriert, wurde bereits in den Ausführungen zum Konverter diskutiert (s.o.). Die weiteren in den BVT-Merkblättern festgehaltenen Technologien beziehen sich vornehmlich auf die Reduktion des Energieverbrauchs beim Warmwalzen. So stellt die Automatisierung der Öfen zur Wiedererwärmung eine Möglichkeit der Regulierung des Drucks und des Luft-Brennstoff-Gemischs dar, was zu Energieeinsparungen von etwa 10% führt [95].²²

Die Wahl des Ofentyps hat ebenfalls großen Einfluss auf den benötigten Brennstoffeinsatz. So können sowohl Regenerativ- als auch Rekuperatorbrenner zu Energieeinsparungen beim Warmwalzen beitragen. Regenerativbrennersysteme bestehen aus zwei Brennern, wobei wechselweise die

²²Ist der Wert der durch eine Technologie induzierten Koeffizientenänderungen in Prozent angegeben, wird Gleichung 5.14 in Abschnitt 5.1.2 entsprechend angepasst.

Abwärme jeweils eines Brenners zum Aufheizen des anderen Brenners verwendet wird und immer nur ein Brenner befeuert wird. Rekuperatorbrenner hingegen nutzen einen Wärmetauscher um die Wärme des Abgases auf die zugeführte Verbrennungsluft zu übertragen. Mit den beiden Technologien lassen sich Energieeinsparungen von 40% für den Regenerativbrenner und von 25% für den Rekuperatorbrenner realisieren [95].

Analog zur Nutzung der Abwärme eines Sinterkühlers kann auch die Abwärme der Öfen eines Warmwalzwerkes zur Dampferzeugung verwendet werden. Die unter realen Bedingungen erreichbare Dampferzeugung wird in den BVT-Merkblättern anhand eines Beispiels mit $\Delta ok_{te,iiDa,jj}^{tech WS} = 170 \frac{MJ \text{ Dampf}}{t \text{ Walzstahl}}$ angegeben.

Eine weitere dem Stand der Technik entsprechende Technologie setzt an der Speicherung der Wärme bereits gegossener Brammen an, welche nicht direkt weiterverarbeitet werden. Hierzu werden gedämmte Behälter zur Lagerung der Brammen eingesetzt. Thermisch isolierte Abdeckungen können weiterhin den Wärmeverlust zwischen Ofen und Walzgerüst minimieren. Insgesamt sind Brennstoffeinsparungen von $\sum_{iiBS} \Delta ik_{te,iiBS,jj}^{tech WS} = -330 \frac{MJ \text{ Brennstoffe}}{t \text{ Walzstahl}}$ realisierbar [95].

Auch der Wärmeinsatz von Brammen im Falle einer direkten Weiterverarbeitung im Anschluss an den Strangguss kann Effizienzpotenziale beim Walzen durch das Entfallen einer Wiedererwärmung erschließen. Problematisch zeigen sich hierbei jedoch häufig die Anordnung der Anlagen innerhalb eines Werkes, die die Implementierung dieser Technologie verhindern, sowie die Produktionsprogramme des Konverters und des Walzwerkes, welche aufeinander abgestimmt werden müssen [95, 114]. Daher wird diese Technologie im Modell nicht tiefergehend betrachtet. Weitere Technologien wie die Wärmerückgewinnung aus dem Kühlwasser [114] haben nur marginale Effekte auf den Energieeinsatz (vgl. bspw. [46, 133]) und werden folglich ebenfalls nicht modelliert.

Zusammengefasst repräsentieren die erläuterten 22 Technologien den aktuellen Stand der Technik für die Eisen- und Stahlindustrie und können in den meisten Werken eingesetzt werden. Reine Prozesskontrollmaßnahmen, welche ebenfalls in den BVT-Merkblättern aufgeführt sind, wurden dabei nicht mit einbezogen, da angenommen wird, dass diese in Deutschland

bereits umfassend genutzt werden. Mit Ausnahme dieser Prozesskontrollmaßnahmen und solcher, die nicht explizit als BVT deklariert sind bzw. nur stark eingeschränkt bei existierenden Anlagen eingesetzt werden können, sind die für die Modellierung ausgewählten 22 Technologien weitestgehend deckungsgleich mit den Studien von Brunke und Blesl [46] (32 Technologien) sowie von Hasanbeigi et al. [133] (23 Technologien). Einige der Technologien hingegen, wie bspw. die Direkteinblasung verschiedener Reduktionsmittel oder die unterschiedlichen Abgasrückführungen in Sinteranlagen, werden in dieser Arbeit deutlich differenzierter als in den letztgenannten Studien betrachtet.

6.2.2.7. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz in der Anodenfabrik

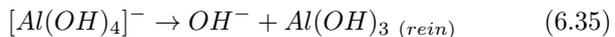
Dieser sowie die folgenden Abschnitte zeigen die in der Aluminiumindustrie einsetzbaren effizienzsteigernden Technologien auf. Um das Aluminiumoxid in der Schmelzflusselektrolyse zu reduzieren ist zunächst ein Kohlenstoffträger notwendig [79], der in der Anodenfabrik gewonnen wird. Zur Anodenproduktion werden in einem ersten Schritt Petrolkoks sowie Reste bereits abgebrannter Anoden zerkleinert, erhitzt und mit Steinkohlenteerpech vermischt [101]. Bezüglich der sich anschließenden Produktionsschritte können prinzipiell zwei Verfahren unterschieden werden: die Herstellung vorgebrannter Anoden sowie von Söderberg-Anoden. Während erstere in einem separaten Produktionsschritt vorgebrannt werden, werden Söderberg-Anoden kontinuierlich erst während des Elektrolysebetriebs durch die Ofenhitze zu fester Anodenkohle verbacken [235]. Da dieses Verfahren in Deutschland aufgrund des deutlich höheren Stromverbrauchs bei der Aluminiumelektrolyse (vgl. [101]) jedoch nicht mehr angewandt wird, wird im Folgenden nur die Herstellung vorgebrannter Anoden betrachtet. Letztere werden nach dem Mischvorgang in einer Presse geformt und in Ringkammeröfen unter Luftausschluss gebrannt. Schichten an Füllkoks schützen die Anoden dabei vor deren Oxidation, wobei ein Teil dieses Kokes im Prozess verbraucht wird. Im Anschluss an den Brennvorgang werden die Anoden gekühlt [101].

Auch beim Brennen der Anoden kann ein Regenerativbrenner eingesetzt werden. Dessen prinzipielle Funktionsweise wurde bereits in den

Ausführungen zum Walzwerk erläutert. In den BVT-Merkblättern werden Energieeinsparungen beim Einsatz von Regenerativbrennern in der Anodenproduktion von bis zu 70% berichtet [101]. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Reduktion des Brennstoffeinsatzes wie im Falle des Walzwerks durchschnittlich 40% beträgt. In der Anodenproduktion werden die Regenerativbrenner zur Minderung von Schadstoffemissionen zusammen mit sogenannten thermisch-regenerativen Abluftreinigern (RTO) betrieben, welche die im Abgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe verbrennen (vgl. [101]).

6.2.2.8. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Aluminiumoxidproduktion

Aluminiumoxid (Tonerde) als zentraler Input der Elektrolyse wird aus dem Rohstoff Bauxit gewonnen. Hierzu wird fast ausschließlich das Bayer-Verfahren mit anschließender Kalzination verwendet, welches durch die folgenden Reaktionsgleichungen 6.34 bis 6.36 beschrieben werden kann [235].



Zunächst werden die im Bauxit enthaltenen Aluminiumhydroxide extrahiert, d.h. aufgeschlossen (Gleichung 6.34), wozu das Bauxit mit einer Alkalilauge (in der Regel Natronlauge) versetzt und bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck in sogenannten Autoklaven verrührt wird. (Natrium-)Aluminat entsteht, wobei das Bauxit sich nicht vollständig in der (Natron-)Lauge löst, sodass der sogenannte Rotschlamm anfällt, welcher neben Bauxitrückständen auch Eisen-, Siliziumoxide und Wasser enthält [258]. Der Rotschlamm sinkt auf den Grund der Autoklaven, während die (Natrium-)Aluminatenlösung obenauf schwimmt. Letztere wird verdünnt, abgekühlt und als nun reines Aluminiumhydroxid ausgerührt (Gleichung 6.35). Somit stellt die wichtigste Grundlage des Bayer-Verfahrens die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit des Aluminium-

hydroxids in Natronlauge dar [235]. Die letzte Reaktionsgleichung 6.36 beschreibt die Kalzination des Aluminiumhydroxids, wobei in Drehrohr- oder Wirbelschichtöfen das chemisch gebundene Wasser entfernt wird, sodass nahezu reines Aluminiumoxid entsteht [258].

Energieeinsparungen von $\sum_{iiBS} \Delta i k_{te,iiBS,jjAlO}^{tech} = -3.000 \frac{MJ \text{ Brennstoffe}}{t \text{ Aluminiumoxid}}$ ($jj^{AlO} \subset jj^{ZP}$) können durch die Verwendung eines Rohrreaktors anstelle der Autoklavenkaskaden realisiert werden (vgl. [101, 235]), da mit dieser höhere Temperaturen, Turbulenzen und damit auch deutlich höhere Reaktionsgeschwindigkeiten erreicht werden. Weiterhin erlaubt diese Technologie einen geringeren Einsatz an Natronlauge. Das einzige in Deutschland befindliche Werk zur Produktion von Aluminiumoxid hat diese Technologie bereits implementiert [101, 235].

Durch den Einsatz von Wirbelschichtöfen bei der Kalzinierung kann der Energiebedarf um $\sum_{iiBS} \Delta i k_{te,iiBS,jjAlO}^{tech} = -500 \frac{MJ \text{ Brennstoffe}}{t \text{ Aluminiumoxid}}$ gegenüber Rekuperatoren gesenkt werden, sodass eine Wärmenutzung von mehr als 80% erreicht wird (vgl. [235]). Diese Technologie wird ebenfalls bereits durch das deutsche Aluminiumoxid-Werk genutzt.

6.2.2.9. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Aluminiuelektrolyse

Die Schmelzflusselektrolyse als zentrale Anlage der Primäraluminiumherstellung dient der Reduktion des Aluminiumoxids zu Aluminium. Hierzu wird überwiegend das Hall-Héroult-Verfahren eingesetzt, welches das Auftrennen der Tonerde in einer Kryolithschmelze vorsieht. Kryolith wird benötigt, um die Schmelztemperatur des Aluminiumoxids von etwa 2.000 °C auf knapp unter 1.000 °C herabzusetzen [258]. Hinsichtlich der Tonerdezugabe werden in Deutschland ausschließlich PFPB-Zellen (*Point Feeder PreBaked*) verwendet. Die Kruste aus erstarrtem Elektrolyt und Tonerde wird bei PFPB-Zellen an ausgewählten Punkten mit Dosierstößeln durchbrochen, wobei die Tonerdezufuhr häufiger und in kleineren Mengen als bei den älteren Technologien (SWPB- bzw. CWPB-Zellen) erfolgt (vgl. hierzu [101, 235]). Dies gewährleistet eine konstantere Tonerde-Konzentration im Elektrolyten, was die Zahl der Anodeneffekte verringert. Letztere entstehen, wenn aufgrund einer zu geringen Tonerde-Konzentration der Elektrolyt in Metall- und Fluoridionen zersetzt wird,

wobei die Fluoridionen durch die Reaktion mit dem Kohlenstoff der Anode das äußerst treibhauswirksame Gas PFC bilden [101]. Die eigentliche Auftrennung des Aluminiumoxids erfolgt unter der Anlegung einer Gleichspannung zwischen Anode und Kathode, wodurch sich Aluminium an der Kathode und Sauerstoff an der Anode sammelt. Der Sauerstoff reagiert mit der Kohlenstoffanode zu CO_2 , wodurch die Anode verbraucht wird [258]. Sobald etwa 80% der Anode verbraucht sind, kann diese nicht weiter verwendet werden und wird somit in der Anodenfabrik recycelt [101].

Die Vermeidung des Anodeneffekts, welcher sowohl mit PFC-Emissionen als auch mit einer Erhöhung der durchschnittlichen Zellspannung einhergeht [235], stellt einen wichtigen Ansatzpunkt zur Reduktion direkt und indirekt emittierter Treibhausgase bei der Aluminiumelektrolyse dar. Um Anodeneffekten entgegenzuwirken, können vor allem Maßnahmen ergriffen werden, welche eine verbesserte Prozesssteuerung unter Nutzung von Informationen über Temperatur, Spannung und Stromstärke des Elektrolysebads ermöglichen [101]. Dies führt zu einer Verringerung der PFC-Emissionen um etwa $\Delta ok_{te,ii}^{tech,jjAlu} = -0,045 \frac{kg\ PFC}{t\ Aluminium}$ ($ii^{PFC} \subset ii^{THG}$ bzw. $jj^{Alu} \subset jj^{ZP}$). Weiterhin tragen Anodeneffekte je nach Häufigkeit ihres Auftretens mit durchschnittlich etwa 20 bis 150 mV zur Zellspannung $U^{Spannung}$ bei, was den spezifischen Energiebedarf E^{spez} erhöht. Letzterer kann über das Faradaysche Gesetz (Gleichung 6.37) berechnet werden, gemäß dem die abgeschiedene Stoffmasse proportional zur elektrischen Ladung Q^{spez} ist, die den Elektrolyten durchflossen hat [235].

$$E^{spez} = \frac{Q^{spez} \cdot U^{Spannung}}{\eta} = 2,9801 \cdot \frac{U^{Spannung}}{\eta} \cdot \frac{kAh}{kg\ Alu.} \quad (6.37)$$

Bei einer angenommenen Stromausbeute η von 92% ergibt sich somit für die durch eine Vermeidung von Anodeneffekten realisierbare Reduktion des Stromeinsatzes $\Delta ik_{te,ii}^{tech,jjAlu} = -991 \frac{MJ\ Strom}{t\ Aluminium}$.

Zur weiteren Senkung des Stromverbrauchs einer Elektrolyse befinden sich derzeit inerte Anoden, welche deutlich länger haltbar als die verwendeten Kohlenstoffanoden sind, sowie benetzbare Kathoden, durch welche der Anoden-Kathoden-Abstand verringert werden könnte, in der Entwicklung.

Darüber hinaus wird der Einsatz des carbothermischen Prozesses sowie von bipolaren Elektrolysezellen erforscht. Für weitere Informationen zu diesen *Emerging Techniques* sei bspw. auf [156, 258] verwiesen.

6.2.2.10. Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz in Refinern und Remeltern

Die Sekundärroute der Aluminiumgewinnung aus Aluminiumschrott beinhaltet den zentralen Prozessschritt der Wiedereinschmelzung, welcher für Alt- bzw. Neuschrotte in Refinern bzw. Remeltern durchgeführt wird. Die unterschiedlichen Eigenschaften der einzuschmelzenden Schrottarten hinsichtlich Größe, Oxidgehalt oder Verunreinigungen führen zu einer Vielzahl an verwendeten Öfen [101]. So werden Altschrotte mit hohen Verunreinigungen häufig in Drehtrommelöfen zu Gusslegierungen aufgeschmolzen, während für relativ reine Neuschrotte oftmals Herdöfen zur Herstellung von Knetlegierungen eingesetzt werden [258]. Abhängig vom Verunreinigungsgrad werden weiterhin Schmelzsalze verwendet, welche Verunreinigungen in der entstehenden Salzschlacke absorbieren und vor der oxidierenden Atmosphäre schützen. Ein weiterer sich anschließender Prozessschritt stellt bei der Herstellung von Gusslegierungen die Raffination dar (Refiner).

Aufgrund der Vielzahl an eingesetzten Ofentypen und der häufig fehlenden Informationen welche Werke mit welchem Ofentyp operieren, werden Annahmen der *European Aluminium Association* [91] herangezogen. Dort werden im Rahmen einer LCA der Anteil an Drehtrommelöfen mit 64% und der Anteil an Herdöfen mit 36% angegeben. In den BVT-Merkblättern lassen sich insgesamt drei Technologien identifizieren, die zu einer Steigerung der Energieeffizienz beitragen können: der Oxy-Fuel-Brenner, der Regenerativbrenner, sowie der Rekuperatorbrenner [101], welche bereits in den vorigen Abschnitten beschrieben wurden. Da nicht jede dieser Technologien für jeden der genannten Ofentypen in Frage kommt, werden weiterhin Informationen von Quinkertz [235] über typische zum Einsatz kommende Kombinationen an Technologien und Ofentypen herangezogen. So wird die Sauerstoffanreicherung häufig bei Drehtrommelöfen verwendet, während Regenerativbrenner und Rekuperatorbrenner Erweiterungen von Herdöfen darstellen.

Für die Sauerstoffanreicherung wird ein reduzierter Erdgasverbrauch von 80 m^3 pro Tonne Aluminium angegeben [101]. Unter Berücksichtigung des Anteils der Drehtrommelöfen von 64% und der Dichte von Erdgas errechnet sich somit die über die Ofentypen gemittelte Koeffizientenänderung zu $\Delta i_{te,iiEG,jjAlu}^{k,tech} = -1.628 \frac{MJ \text{ Erdgas}}{t \text{ Aluminium}}$. Des Weiteren fällt ein zusätzlicher Input an Sauerstoff an. Allgemein werden für den Regenerativbrenner Energieeinsparungen von bis zu 60% und für den Rekuperatorbrenner von bis zu 30% angegeben [96]. Hier werden aus Konsistenzgründen mit 40% bzw. 25% dieselben Werte wie für das Walzwerk angesetzt. Diese Werte beziehen sich jedoch nur auf die jeweiligen Herdöfen und werden daher weiterhin mit 36% multipliziert, um einen über den Sektor gemittelten Ofentypen widerzuspiegeln.

Zusammengefasst lassen sich für die Aluminiumindustrie deutlich weniger effizienzsteigernde Technologien identifizieren als für die Eisen- und Stahlindustrie. Insgesamt werden modellseitig für die primäre und sekundäre Produktionsroute sieben Technologien berücksichtigt, welche dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen. Auch die Verfügbarkeit dokumentierter technischer Daten ist im Falle der Eisen- und Stahlindustrie wesentlich umfangreicher, weshalb die aufgezeigten Koeffizientenänderungen in der Aluminiumindustrie größeren Unsicherheiten unterliegen. Neben den in den letzten Abschnitten beschriebenen technischen Daten ist weiterhin die Höhe der Investitionen für die einzelnen Technologien zu ermitteln, was im folgenden Abschnitt wiedergegeben wird.

6.2.2.11. Investitionen der betrachteten Technologien

Die Berechnung der Investition in eine Technologie te erfolgt im aktorsbasierten Teilmodell unter Berücksichtigung der für eine festgelegte Referenzkapazität kap_{te}^{Ref} gegebenen Referenzinvestition inv_{te}^{Ref} sowie einer Größendegression $\kappa_{te} < 1$ (vgl. Gleichung 5.20 in Abschnitt 5.2.1). Somit sind diese drei Parameter für alle betrachteten 29 Technologien zu bestimmen. Hierfür werden, insoweit verfügbar, vor allem Daten aus den BVT-Merkblättern genutzt, da diese häufig auf berichteten Werten beruhen. Liegen weiterhin Informationen über den Investitionszeitpunkt vor, so werden die Investitionen mittels des *Chemical Engineering plant cost index*

(CEPCI) [228] auf das Basisjahr t^{BAS} umgerechnet um Preisänderungen Rechnung zu tragen.

Sind in den BVT-Merkblättern keine Werte angegeben, können allgemeine, d.h. nicht nur in der Stahlindustrie einsetzbare Technologien, wie bspw. Gasturbinen oder Abhitzeessel auch über die in Peters et al. [228] enthaltenen Investitionsdaten bestimmt werden. Hierzu werden zunächst die Investitionen der Hauptaggregate für eine gegebene Kapazität aus Diagrammen abgelesen und über Zuschlagsfaktoren die weiteren Investitionsbestandteile wie Ausgaben für Installation, Instrumentierung, Rohrleitungen, Planung, etc. ermittelt. Ein typischer Zuschlagsfaktor liegt für eine Anlage, welche vor allem Fluide verarbeitet, bei etwa 590% [228].

Generell lassen sich für die Aluminiumindustrie seltener valide Investitionsdaten finden, weshalb bei vergleichbaren Technologien (Bsp.: Regenerativbrenner, Rekuperatorbrenner) die Werte der Eisen- und Stahlindustrie genutzt und auf die entsprechende Referenzkapazität skaliert werden. Die ermittelten Investitionsdaten sind in Tabelle 6.9, zusammen mit den verwendeten Datenquellen und einer Einschätzung über deren Qualität, dargestellt.

Tabelle 6.9.: Investitionen der berücksichtigten effizienzsteigernden Technologien (HO: Hochofen, SI: Sinteranlage, KOK: Kokerei, KON: Konverter, EAF: Elektrolichtbogenofen, WA: Walzwerk, AN: Anodenfabrik, BAY: Bayer-Verfahren, ELE: Schmelzflusselektrolyse, RE: Refiner/Remelter, (***) berichtete Werte, (**) berichtete Werte ergänzt um Annahmen, (*) Schätzung)

Technologie	Bezeichnung	Referenzinvestition inv_{te}^{Ref} [Mio. €]	Referenzkapazität kap_{te}^{Ref}	Quelle	Datenqualität
Direkteinblasung Kohle	HO1	25,6	320 $\frac{kt \text{ Kohle}}{a}$	[100], CEPCI	**
Direkteinblasung Öl	HO2	25,6	320 $\frac{kt \text{ Öl}}{a}$	vgl. HO1	**
Direkteinblasung Kokereigas	HO3	10,0	3,2 $\frac{PJ \text{ Kok.gas}}{a}$	[100]	**
Direkteinblasung Kunststoff	HO4	20,0	220 $\frac{kt \text{ Kunstst.}}{a}$	[100]	***
GET	HO5	5,0	10 MW	[228], CEPCI	**

Tabelle 6.9.: Investitionen der berücksichtigten Effizienz-steigernden Technologien (HO: Hochofen, SI: Sinteranlage, KOK: Kokerei, KON: Konverter, EAF: Elektrolichtbogenofen, WA: Walzwerk, AN: Anodenfabrik, BAY: Bayer-Verfahren, ELE: Schmelzflusselektrolyse, RE: Refiner/Remelter, (***) berichtete Werte, (**) berichtete Werte ergänzt um Annahmen, (*) Schätzung)

Technologie	Bezeichnung	Referenzinvestition inv_{te}^{Ref} [Mio. €]	Referenzkapazität kap_{te}^{Ref}	Quelle	Datenqualität
Vorheizung Brennstoff Winderhitzer	<i>HO6</i>	6,4	4,0 $\frac{Mt\ Eisen}{a}$	[100], CEPCI	**
Abhitzeessel (Sinterkühler)	<i>SI1</i>	4,3	3,6 $\frac{Mt\ Sinter}{a}$	[228], CEPCI	**
Abgasrückführung (EOS)	<i>SI2</i>	18,4	4,2 $\frac{Mt\ Sinter}{a}$	[100], CEPCI	***
Abgasrückführung (LEEP)	<i>SI3</i>	14,6	5,0 $\frac{Mt\ Sinter}{a}$	[100], CEPCI	***
Abgasrückführung (EPOSINT)	<i>SI4</i>	15,3	3,1 $\frac{Mt\ Sinter}{a}$	[100], CEPCI	***
abschnittsweise Abgasrückführung (vier Zonen)	<i>SI5</i>	9,6	3,7 $\frac{Mt\ Sinter}{a}$	[100], CEPCI	**
abschnittsweise Abgasrückführung (inkl. Abhitzeessel)	<i>SI6</i>	15,0	3,7 $\frac{Mt\ Sinter}{a}$	vgl. <i>SI5</i> , <i>SI1</i>	**
KTK	<i>KOK1</i>	100,0	2,0 $\frac{Mt\ Koks}{a}$	[100]	***
KRG	<i>KON1</i>	30,5	5,0 $\frac{Mt\ Stahl}{a}$	[100]	**
Schrottvorwärmung (Fingerschacht- ofen)	<i>EAF1</i>	9,0	0,5 $\frac{Mt\ Stahl}{a}$	[158], vgl. <i>EAF2</i>	**
Schrottvorwärmung (CONSTEEL)	<i>EAF2</i>	7,5	0,5 $\frac{Mt\ Stahl}{a}$	[100]	**
Oxy-Fuel- Brenner	<i>EAF3</i>	1,7	0,5 $\frac{Mt\ Stahl}{a}$	[134]	**
Automatisierung Öfen	<i>WA1</i>	2,0	1,5 $\frac{Mt\ Walzst.}{a}$	[95]	***
Regenerativ- brenner (Walzwerk)	<i>WA2</i>	4,5	1,5 $\frac{Mt\ Walzst.}{a}$	[95]	***

Tabelle 6.9.: Investitionen der berücksichtigten Effizienz-steigernden Technologien (HO: Hochofen, SI: Sinteranlage, KOK: Kokerei, KON: Konverter, EAF: Elektrolichtbogenofen, WA: Walzwerk, AN: Anodenfabrik, BAY: Bayer-Verfahren, ELE: Schmelzflusselektrolyse, RE: Refiner/Remelter, (***) berichtete Werte, (**) berichtete Werte ergänzt um Annahmen, (*) Schätzung)

Technologie	Bezeichnung	Referenzinvestition inv_{te}^{Ref} [Mio. €]	Referenzkapazität kap_{te}^{Ref}	Quelle	Datenqualität
Rekuperatorbrenner (Walzwerk)	WA3	2,2	1,5 $\frac{Mt\ Walzst.}{a}$	[95]	***
Abhitzekeessel (Walzwerk)	WA4	4,0	1,5 $\frac{Mt\ Walzst.}{a}$	[95]	***
Wärmespeicherung	WA5	2,0	1,5 $\frac{Mt\ Walzst.}{a}$	[95]	**
Regenerativbrenner (Anodenproduktion)	AN1	1,4	180 $\frac{kt\ Anoden}{a}$	vgl. WA2	**
Rohrreaktor	BAY1	(100,0) ¹	1,0 $\frac{Mt\ Al.oxid}{a}$	Annahme	*
Wirbelschichttechnik	BAY2	(3,0) ¹	1,0 $\frac{Mt\ Al.oxid}{a}$	[280]	**
Verbesserte Prozesssteuerung	ELE1	1,6	0,2 $\frac{Mt\ Alu.}{a}$	[83]	*
Oxy-Fuel-Brenner (Refiner)	RE1	(0,5) ²	27 $\frac{kt\ Alu.}{a}$	vgl. EAF3	**
Regenerativbrenner (Remelter)	RE2	(0,3) ²	27 $\frac{kt\ Alu.}{a}$	vgl. WA2	**
Rekuperatorbrenner (Remelter)	RE3	(0,2) ²	27 $\frac{kt\ Alu.}{a}$	vgl. WA3	**

¹ Technologie bereits am einzigen Werk zur Produktion von Aluminiumoxid implementiert (Wert hat keine Auswirkungen auf Investitionsentscheidung)

² Investition über Anteil der Ofentypen, an denen Technologie einsetzbar ist, gemittelt (Anteil Drehtrommelöfen: 64%, Anteil Herdöfen: 36%)

Bezüglich der Größendegression wird für die meisten Anlagen ein Wert von $\kappa_{te} = 0,6$ angenommen. Dieser Wert berücksichtigt, dass eine Investition unterproportional zur Anlagenkapazität wächst (vgl. bspw. [6]). Einige der modellierten Anlagen bestehen jedoch aus vielen kleineren parallel

operierenden Einheiten, die nicht getrennt voneinander simuliert werden. Dies gilt sowohl für Elektrolysezellen als auch für Refiner und Remelter, weshalb für diese Anlagen die Größendegression auf $\kappa_{te} = 0,9$ gesetzt wird.

Mit der im vorliegenden Abschnitt 6.2.2 spezifizierten Datenbasis lassen sich die technischen und ökonomischen Auswirkungen einer Implementierung effizienzsteigernder Technologien auf ein metall erzeugendes Werk modellieren. Darüber hinaus ist für jedes Werk zu ermitteln, welche der Technologien bereits genutzt werden um die zukünftigen Treibhausgasreduktionspotenziale korrekt bestimmen zu können. Diese Ermittlung des Startbestands erfolgt anhand von Informationen aus der PLANTFACTS-Datenbank [306] sowie der BVT-Merkblätter. Da, insbesondere in der Aluminiumindustrie, die benötigten Informationen jedoch nicht für jede Technologie vorliegen, gewährleistet weiterhin eine Validierungsphase im Simulationsmodell die Ermittlung eines realistischen Startbestands. Das bedeutet, dass die im Zeitraum von 2006 bis 2014 modellseitig getätigten Investitionen bereits ohne eine Variation klimapolitischer Instrumente finanziell attraktiv sind und daher angenommen wird, dass diese ohnehin von den deutschen metall erzeugenden Werken eingesetzt werden (vgl. hierzu auch Kapitel 7).

6.2.3. Ableitung weiterer technisch-betriebswirtschaftlicher Daten

Neben den anlagenspezifischen Input- und Outputkoeffizienten sowie den modellierten Technologien existieren weitere zentrale technisch-betriebswirtschaftliche Daten, die im Folgenden erläutert werden. Auch bezüglich dieser Daten wird der Konvention gefolgt, dass im vorliegenden Kapitel nur die im Simulationslauf konstant gehaltenen Daten näher erläutert werden oder solche, die nur für das Basisjahr zu ermitteln sind und anschließend endogen fortgeschrieben werden. Parameter, die als Zeitreihe in das Modell eingehen, sind hingegen Teil der betrachteten Szenarios und somit Gegenstand von Kapitel 7.

Eine Schwierigkeit bei der Ermittlung der Eingangsdaten stellen die werkspezifischen Abschreibungen im Basisjahr $abs_{s,tBAS}^{AKT}$ dar, da diese Informationen im Allgemeinen nicht auf Werksebene ausgewiesen werden. Um

Tabelle 6.10.: Aufteilung der Investitionen der Eisen- und Stahlindustrie im Jahr 2002 auf die einzelnen Anlagentypen (Datengrundlage: [108])

Anlagentyp	Anteil Investitionen
Kokerei	3,6%
Sinteranlage	1,8%
Hochofen	9,8%
Konverter	10,3%
Walzwerk	40,5%
Kraftwerk	22,7%
Elektrolichtbogenofen	11,3%

weiterhin die Konsistenz mit der IO-Tabelle zu gewährleisten werden die dort für die metallherzeugenden Sektoren ausgewiesenen Abschreibungen $w_{abs,j}^{AKT,tBAS}$ verwendet und auf die simulierten Werke aufgeteilt. Für die Aufteilung werden zunächst anlagenspezifische Investitionsdaten herangezogen, da anzunehmen ist, dass die Abschreibungen mit diesen korrelieren. So weist bspw. die Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (EGKS) die Aufteilung der jährlichen Investitionen zwischen den einzelnen Anlagentypen der europäischen Eisen- und Stahlindustrie gemäß Tabelle 6.10 aus [108].

Mit diesen Informationen ergeben sich die Abschreibungen am Beispiel eines integrierten Hüttenwerks s nach der folgenden Gleichung 6.38, die die Anteile der Kapazitäten aller Anlagen an der Gesamtkapazität des Sektors berücksichtigt.

$$\begin{aligned}
 abs_{s,tBAS}^{AKT} = & \left(\frac{\sum_y kap_{y,ii}^{Koks,s}}{\sum_s \sum_y kap_{y,ii}^{Koks,s}} \cdot 3,6\% \right. \\
 & \left. + \frac{\sum_y kap_{y,ii}^{Sinter,s}}{\sum_s \sum_y kap_{y,ii}^{Sinter,s}} \cdot 1,8\% + \dots \right) \quad (6.38) \\
 & \cdot \sum_{j^{AKT}} \sum_{ii^{EP}} w_{abs,j}^{AKT,tBAS} \cdot \lambda_{j^{AKT},ii^{EP}} \cdot \omega_{s,ii^{EP}}
 \end{aligned}$$

Die Ableitung der Abschreibungen für die Aluminiumindustrie erfolgt ähnlich, wobei hier anlagenspezifische Investitionsdaten aus verschiedenen Quellen [92, 115, 263] verwendet und um Annahmen ergänzt werden.

Weiterhin sind die für das Basisjahr ermittelten Preise $p_{ii,t}^{Ein,BAS}$ bzw. $p_{ii,t}^{Ver,BAS}$ von hoher Relevanz bei der Bestimmung der werkspezifischen Cash Flows sowie des Gewinns. Diese befinden sich zusammen mit den verwendeten Quellen in Tabelle A.4 im Anhang A.3. Die restlichen zuvor nicht genauer spezifizierten Daten des aktorsbasierten Teilmodells zeigt Tabelle 6.11.

Tabelle 6.11.: Weitere im aktorsbasierten Teilmodell verwendete und im Simulationslauf konstant gehaltene Daten

Bezeichnung	Notation	Quelle
Wirkungsgrad der Stromerzeugung	$eff^{El} = 40\%$	BVT-Merkblätter [100]
Wirkungsgrad der Dampfauskopplung	$eff^{Da} = 10\%$	BVT-Merkblätter [100]
Anzahl Implementierungsschritte einer kontinuierlichen Maßnahme	$st = 3$	Annahme
Kohlenstoffgehalte	cge_{ii}	berechnet aus Molmassen, chemische Zusammensetzungen u.a. aus [100, 230]
Referenzpersonaleinsatz	$pez^{Ref} = 20 \frac{h}{d}$	vgl. Peters et al. [228], Wert für hochautomatisierte Anlagen
Referenzkapazität (Personal)	$kap^{Ref,Per} = 10 \frac{t}{d}$	vgl. Peters et al. [228], Wert für hochautomatisierte Anlagen
Größendegression (Personal)	$\kappa^{Per} = 0,24$	berechnet mit Werten aus Peters et al. [228] für verschiedene Kapazitäten
Personalkostensatz	$pks_{s,t} = 40 \frac{EUR}{h}$	vgl. Peters et al. [228], Wert für qualifizierte Fachkräfte
Aufschlag für Aufsichtspersonal	$fak^{Aufs} = 15\%$	Peters et al. [228]
Aufschlag für Laborarbeiten	$fak^{Lab} = 15\%$	Peters et al. [228]

Tabelle 6.11.: Weitere im aktorsbasierten Teilmodell verwendete und im Simulationslauf konstant gehaltene Daten

Bezeichnung	Notation	Quelle
Prozentsatz der Kosten für Reparatur und Instandhaltung	$prs^{Rep} = 7\%$	Peters et al. [228]
Faktor für Verbrauch an zusätzlichen Betriebsstoffen	$faK^{BeS} = 1,15$	Peters et al. [228]
Lebensdauer (Technologien)	ld_{te}	Annahmen (zwischen 10 und 15 Jahren)
Lebensdauer (Werk)	$ld^{Werk} = 20a$	Annahme
Durchschnittliche Eigenkapitalquote	$ekq = \frac{1}{3}$	abgeleitet aus Geschäftsberichten verschiedener Metallherzeuger (Bsp.: www.unternehmensregister.de)
Zinssatz Fremdkapital	$prs^{FK} = 7,5\%$	Peters et al. [228]
Prozentsatz Lokalsteuern	$prs^{Ste} = 2\%$	Peters et al. [228]
Prozentsatz Sachversicherungen	$prs^{Vers} = 1\%$	Peters et al. [228]
Prozentsatz Overhead-Kosten (bezogen auf Personalkosten)	$prs^{OH} = 60\%$	Peters et al. [228]
Prozentsatz administrative Kosten (bezogen auf Personalkosten)	$prs^{Adm} = 20\%$	Peters et al. [228]
Prozentsatz der Kosten für Distribution und Marketing	$prs^{Dis} = 2\%$	Peters et al. [228]
Prozentsatz der Kosten für Forschung und Entwicklung	$prs^{FuE} = 5\%$	Peters et al. [228]
Treibhauswirksamkeit	$trw_{i;THG}$	vgl. Tabelle 2.1

Tabelle 6.11.: Weitere im aktorsbasierten Teilmodell verwendete und im Simulationslauf konstant gehaltene Daten

Bezeichnung	Notation	Quelle
Energiegehalt (Heizwert)	eng_{iiET}	vgl. bspw. AGEBA [3]
Körperschaftsteuer	$kst = 29,83\%$	(für Kapitalgesellschaften inkl. Gewerbesteuer und Solidaritätszuschlag), vgl. bspw. [47]
Zinssatz (Renditeerwartung)	$zi = 8\%$	vgl. WACC (<i>Weighted Average Cost of Capital</i>) in [175]

Das in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellte Simulationsmodell ist in *MATLAB* implementiert. Zusammen mit der im vorliegenden Kapitel aufgezeigten Granularität der Datenbasis ergeben sich die folgenden Laufzeiten. Werden beide Teilmodelle integriert ausgeführt mit $t^{BAS} = 2006$ als gegebenem Basisjahr und einem Zeithorizont von 2030, so benötigt ein Modelllauf etwa 30 min. Wird hingegen auf die Integration des aktorsbasierten Teilmodells verzichtet, so beträgt die Laufzeit lediglich <1 Minute, da keine Iterationen über die simulierten Werke und Technologien erfolgen.²³ Dies ermöglicht die Berechnung einer Vielzahl an Szenarios und die Analyse zahlreicher Einflussfaktoren auf die Ergebnisse, welche im folgenden Kapitel dargestellt werden.

²³Bezüglich der Laufzeiten des NLP, vgl. Tabelle 6.5.

7. Anwendung des entwickelten Modells auf die Rahmenbedingungen der deutschen (Metall-) Industrie

Das vorliegende Kapitel zeigt die Anwendung des in den Kapiteln 4 und 5 entwickelten Modells auf die im Kapitel 6 spezifizierten Daten. Der Fokus liegt dabei auf einer Analyse der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen klimapolitischer Instrumente auf die Metallerzeugung in Deutschland. Hierzu wird zunächst die Datenbasis, die zum Teil auf einem eigenständigen Modell (NLP, vgl. Abschnitt 6.2.1) beruht, im Abschnitt 7.1 analysiert um den Status quo der Metallerzeugung darzustellen und etwaige Treibhausgasreduzierungsspotenziale abzuleiten. Daran anschließend werden die mit dem Simulationsmodell untersuchten Szenarios zusammen mit den verwendeten und variierten Parametern in Abschnitt 7.2 aufgezeigt. Abschnitt 7.3 zeigt letztlich den Einfluss der variierten Parameter auf ausgesuchte Kennzahlen.

7.1. Analyse der entwickelten Datenbasis

Die entwickelte Datenbasis ist von hoher Relevanz für die Ergebnisse der Szenarioanalyse. Vor allem die durch das NLP abgeschätzten Input- und Outputkoeffizienten repräsentieren die Effizienz der einzelnen Anlagen im Basisjahr und sind somit ein Indiz für das verfügbare Potenzial zur Minderung der Treibhausgasemissionen in der Metallerzeugung. Abbildung

7.1 zeigt beispielhaft die durch das NLP ermittelten Kohlenstoffflüsse¹ für ein integriertes Hüttenwerk *s*, welches auf Grund der unzureichenden Kokereikapazität einen Teil des Kokses zukauf und überschüssiges Roheisen verkauft.

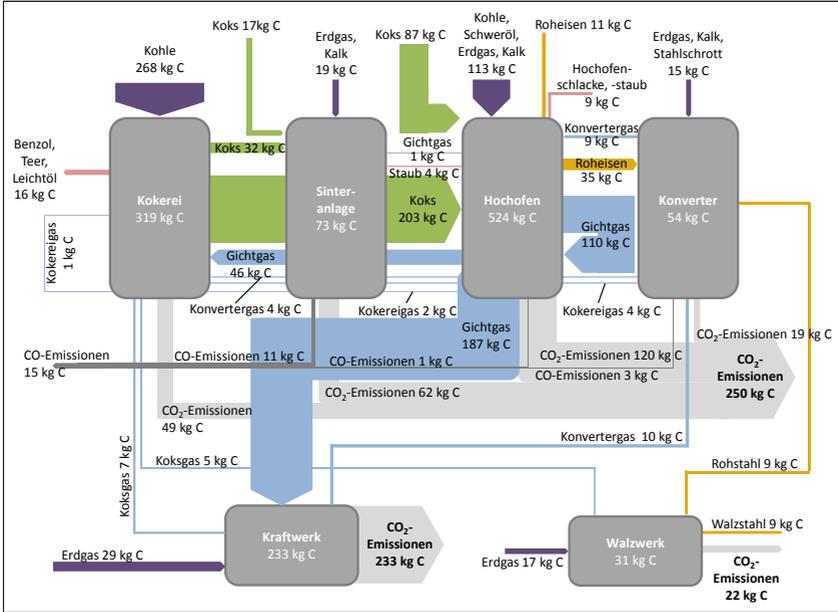


Abbildung 7.1.: Durch das NLP ermittelte kohlenstoffhaltige Flüsse zwischen den Anlagen eines integrierten Hüttenwerks zur Produktion von einer Tonne Rohstahl, dargestellt als Sankey-Diagramm (Einige Flüsse wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit zusammengefasst, Flüsse <0,5 t Kohlenstoff sind nicht dargestellt)

Es wird deutlich, dass neben den CO₂-Emissionen die größten Kohlenstoffflüsse den Input an Kohle in die Kokerei, den Input an Koks in den Hochofen sowie den Output des im Hochofen entstehenden Gichtgases umfassen. Weiterhin gibt Abbildung 7.1 die Komplexität der Energieflüsse

¹Die Kohlenstoffflüsse eines Werkes setzen sich aus $ik_{ii,y,jj}^{Werk,int} \cdot cge_{ii}$, $ik_{ii,y,jj}^{Werk,ext} \cdot cge_{ii}$, $ok_{ii,y,jj}^{Werk,int} \cdot cge_{ii}$ und $ok_{ii,y,jj}^{Werk,ext} \cdot cge_{ii}$ zusammen.

(blau markierte Kuppelgase) eines integrierten Standorts und damit die Bedeutung eines Anlagen-übergreifenden Energiemanagements wieder. So hängen bspw. die CO_2 -Emissionen des Kraftwerks zu einem großen Teil von der im Hochofen entstehenden Gichtgasmenge ab. Wird nun eine Technologie zur Reduktion des Kohlenstoffinputs am Hochofen implementiert (vgl. die verschiedenen Möglichkeiten der Direkteinblasung $HO1$ bis $HO4$), so wirkt sich dies zum einen auf die CO_2 -Emissionen des Hochofens, aber auch auf die Emissionen des Kraftwerks sowie die damit einhergehende Stromerzeugung aus. Einer Senkung der direkten, am Standort entstehenden Treibhausgasemissionen steht deshalb ein Anstieg der indirekten, in anderen Sektoren generierten Emissionen gegenüber, da die verringerte Stromproduktion durch den Elektrizitätssektor kompensiert werden muss. Wie hoch die gesamten Emissionseinsparungen durch das Implementieren einer Technologie letztlich sind, hängt direkt von der Ausprägung der jeweiligen werksinternen Kohlenstoffflüsse ab, was die Notwendigkeit des in dieser Arbeit vorgestellten werkspezifischen Ansatzes verdeutlicht.

Abbildung 7.2 zeigt beispielhaft die Kohlenstoffflüsse eines Standorts zur Produktion von Primäraluminium. Die Herstellung der Tonerde durch das Bayer-Verfahren ist dabei nicht abgebildet, da keine der vier deutschen Aluminiumhütten eine eigene Tonerdeproduktion besitzt. Wesentliche kohlenstoffhaltige Inputs stellen die Rohmaterialien und Brennstoffe zur Herstellung von Anoden sowie der Einsatz dieser in der Aluminiumelektrolyse dar. Die direkt am Standort emittierten CO_2 -Emissionen zur Produktion von einer Tonne Rohaluminium liegen in etwa auf dem Niveau der durch ein integriertes Hüttenwerk verursachten direkten Emissionen zur Herstellung einer Tonne Rohstahl, wobei in Abbildung 7.2 die für die Elektrolyse ebenfalls relevanten PFC-Emissionen keine Berücksichtigung finden.

Ein Vergleich der für alle vier primären und sekundären Verfahrensrouten mittels des NLP berechneten Kohlenstoffflüsse zeigt zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen modellierten Anlagen und Werken. Wie effizient alle der modellierten Anlagen y hinsichtlich ihrer CO_2 -Emissionen $ok_{ii\text{CO}_2,y,jj}^{\text{ZP},s}$ sind, gibt bspw. der in Abbildung 7.3 dargestellte Vergleich wieder.

Die größten Differenzen, ablesbar an der ebenfalls dargestellten Standardabweichung, existieren bezüglich der Kokerei, der Aluminiumelektrolyse zur Herstellung von Flüssigaluminium, bezüglich des Hochofens sowie des

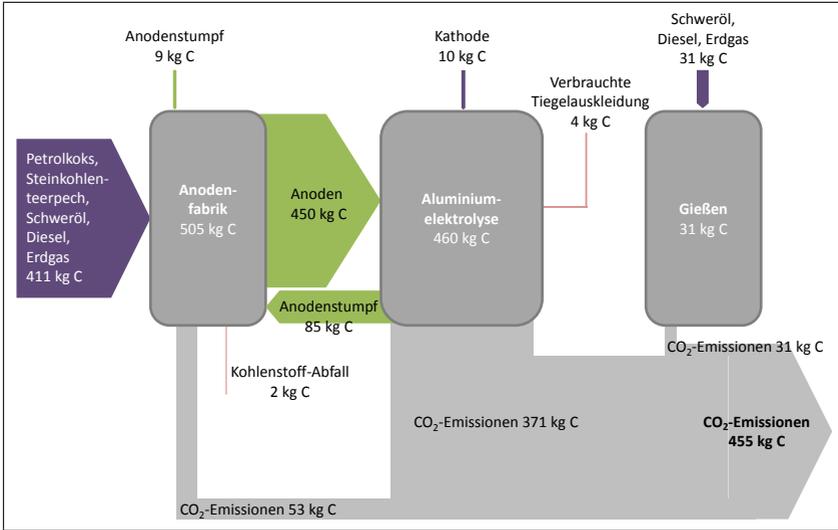


Abbildung 7.2.: Durch das NLP ermittelte kohlenstoffhaltige Flüsse zwischen den Anlagen eines Aluminiumwerks zur Produktion von einer Tonne Primäraluminium, dargestellt als Sankey-Diagramm (Einige Flüsse wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit zusammengefasst, Flüsse <0,5 t Kohlenstoff sind nicht dargestellt)

Walzwerks. Die unterschiedlichen Werte bei der Kokserzeugung resultieren vor allem aus der unterschiedlichen Verwendung der Kuppelgase. Bei einem integrierten Standort wird maßgeblich das bezogen auf den Heizwert kohlenstoffreiche Gichtgas (vgl. Tabelle 6.2 in Abschnitt 6.2.1) bei der Feuerung in den Koksofenbatterien eingesetzt, während das kohlenstoffärmere Kokereigas zum großen Teil der energetischen Nutzung im Hochofen oder im Konverter vorbehalten bleibt (vgl. Abbildung 7.1). Wird eine Kokerei hingegen autark und nicht am Standort der eigentlichen Stahlerzeugung betrieben, so wird in der Regel nur Kokereigas bei der Feuerung verwendet, wodurch sich geringere CO₂-Emissionen ergeben.

Die Differenzen bei der Elektrolyse in Abbildung 7.3 sind zu einem großen Teil durch die unterschiedlichen PFC-Emissionen bedingt, die von 113 kg CO₂-Äquivalenten bis hin zu 630 kg CO₂-Äquivalenten pro Tonne

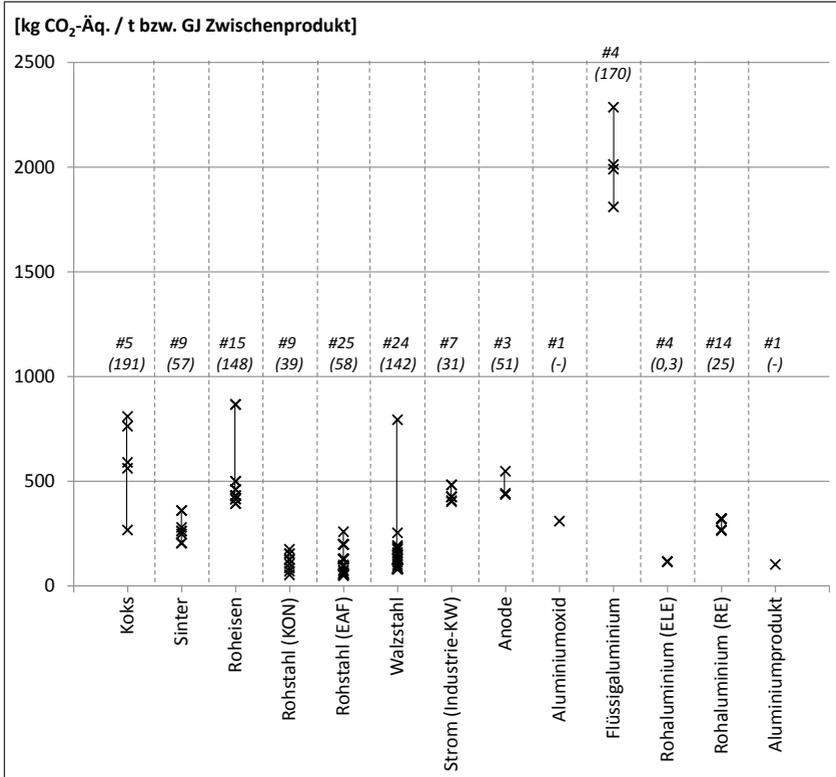


Abbildung 7.3.: Durch das NLP ermittelte (direkte) CO₂-Emissionen aller modellierten Anlagen im Jahr 2007 ergänzt um die berichteten PFC-Emissionen der PRTR-Datenbank [104]. Dargestellt sind weiterhin die Anzahl der betrachteten Anlagen (#) sowie die Standardabweichungen (Werte in Klammern); KON: Konverter, EAF: Elektrolichtbogenofen, KW: Kraftwerk, ELE: Elektrolyse, RE: Refiner/Remelter

Flüssigaluminium reichen. Die Kontrolle des Anodeneffekts, z.B. durch eine verbesserte Prozesssteuerung *ELE1*, stellt somit einen wichtigen Ansatzpunkt zur Minderung dieser Treibhausgasemissionen dar. Die Streuung der CO₂-Emissionen bei der Walzstahlproduktion resultiert vor allem aus den zahlreichen unterschiedlichen Prozessen, die unter dem Anlagentyp Walzwerk subsumiert werden und durch einen unterschiedlichen Energieverbrauch charakterisiert sind (vgl. Abschnitt 5.1.2). Bei der Herstellung des Roheisens im Hochofen kommt zum Tragen, dass an einem Standort im Basisjahr der Simulation noch kein Industrie-Kraftwerk installiert war und somit die Kuppelgase der zwei sich dort befindlichen Hochöfen zum Teil verbrannt werden mussten.

Inwiefern und zu welchen Kosten die Möglichkeit besteht, die CO₂-Emissionen der ineffizienteren Anlagen auf das Niveau der effizientesten Anlagen zu führen, wird in Abschnitt 7.3 unter Zuhilfenahme des entwickelten Simulationsmodells erörtert. In diesem Zusammenhang wird auch der Frage nachgegangen, welche klimapolitischen Instrumente diese Transition begünstigen können. Da die Entscheidung über die Implementierung zusätzlicher Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen auf Werksebene erfolgt, werden im Folgenden zunächst die Emissionsfaktoren der einzelnen modellierten Akteure aufgezeigt.

Abbildung 7.4 stellt die CO₂-Emissionen $ok_{ii}^{Werk,CO_2,y,jjZP,s}$ der acht modellierten integrierten Hüttenwerke zur Produktion einer Tonne Rohstahl dar. Die Emissionen verschiedener Anlagen *y* gleichen Typs am selben Standort werden hierzu über die jeweiligen Produktionsmengen gemittelt. Des Weiteren ist eine Normierung der so ermittelten Emissionsfaktoren vorzunehmen um die Vergleichbarkeit der Werte zu gewährleisten. Unter einer Normierung wird in diesem Fall die Berücksichtigung der verkauften und bezogenen Zwischenprodukte verstanden. Reicht bspw. die Kapazität der Kokerei eines integrierten Hüttenwerks nicht aus bzw. ist diese am Standort nicht vorhanden, so muss Koks zugekauft werden. Dieser zugekaufte Koks $ik_{ii}^{Werk,ext,Koks,y,jjEisen,s}$ generiert wiederum Treibhausgasemissionen in der vorgelagerten Wertschöpfungsstufe, welche dem Hüttenwerk zuzurechnen sind um einen Vergleich mit einem Hüttenwerk, das keinen Koks zukaufte, zu ermöglichen. Gleiches gilt bezüglich der Veräußerung von Zwischenprodukten bei Überkapazitäten. Für die Emissionen der zugekauften Zwischenprodukte wird der Durchschnitt aller modellierter Anlagen ange-

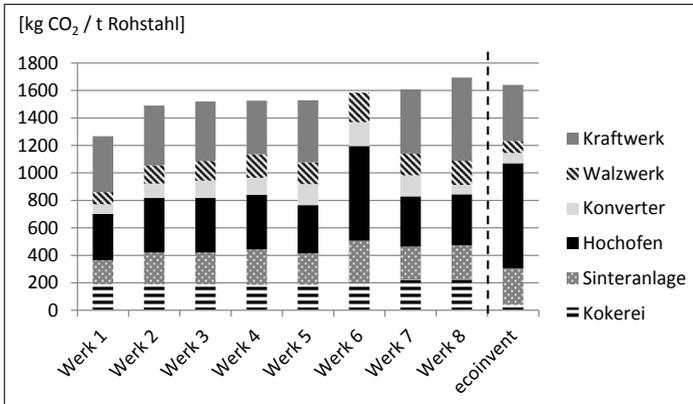


Abbildung 7.4.: Durch das NLP ermittelte (direkte und normierte) CO₂-Emissionen aller deutschen integrierten Hüttenwerke im Jahr 2007 und Vergleich mit den Durchschnittswerten der ecoinvent-Datenbank [52].

setzt, im Falle der Kokerei $\frac{\sum_y \sum_s ok_{ii} CO_{2,y,jj} Koks_{s}}{5}$. Weiterhin sind auch die unterschiedlichen Mengen anfallender und veräußerter Kuppelprodukte in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Für das wichtigste Kuppelprodukt, die Erzeugung von Strom in einem angeschlossenen Industrie-Kraftwerk, wird daher eine Gutschrift für die im Elektrizitätssektor vermiedenen CO₂-Emissionen auf die Emissionen eines Werkes angerechnet. Der Emissionsfaktor des deutschen Strommixes beläuft sich auf 576 g CO₂ pro kWh [155].

Insgesamt zeigen sich bei einem Vergleich der direkten und normierten CO₂-Emissionen aller deutschen integrierten Hüttenwerke Streuungen von bis zu 25%, was auf ein relativ großes Reduktionspotenzial einiger ineffizienterer Werke hindeutet. Die ebenfalls in Abbildung 7.4 dargestellten Werte der Ökobilanzdatenbank ecoinvent [52] werden dabei von sieben der acht Werke unterschritten. Die Tatsache, dass es sich bei diesen Werten um europäische Durchschnittswerte handelt, spricht für die im internationalen Vergleich relativ geringen CO₂-Emissionen deutscher Hüttenwerke.

Bezüglich der Herstellung von Primäraluminium zeigen sich geringere Streuungen. Wie aus Abbildung 7.5 ersichtlich wird, liegen die Treib-

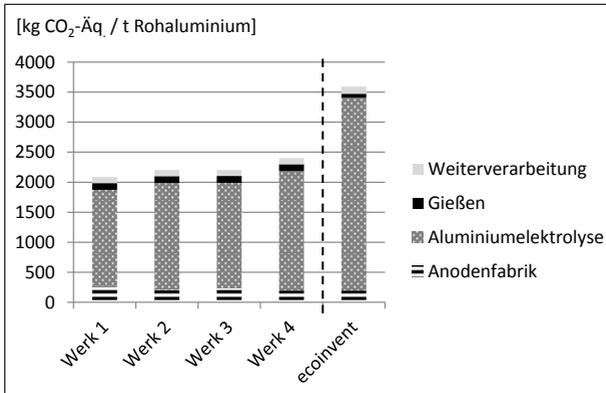


Abbildung 7.5.: Durch das NLP ermittelte (direkte und normierte) CO₂-Emissionen aller deutschen primären Aluminiumwerke im Jahr 2007 ergänzt um die berichteten PFC-Emissionen der PRTR-Datenbank [104] und Vergleich mit den Durchschnittswerten der ecoinvent-Datenbank [52].

hausgasemissionen des effizientesten Werkes etwa 13% unterhalb derer des ineffizientesten Werkes. Bedingt durch den verhältnismäßig hohen Emissionsfaktor der Aluminiumelektrolyse führt dies dennoch zu der in Abbildung 7.3 dargestellten großen Standardabweichung. Die europäischen Durchschnittswerte der ecoinvent-Datenbank übersteigen die in dieser Arbeit für die Aluminiumindustrie ermittelten Werte deutlich, da die dort hinterlegten PFC-Emissionen mit etwa 1.700 kg CO₂-Äq. pro Tonne Flüssigaluminium um ca. 170% über dem höchsten für Deutschland berichteten Wert liegen (vgl. PRTR-Datenbank [104]). Somit lässt sich auch hier eine im internationalen Vergleich hinsichtlich der emittierten Treibhausgase effiziente Produktion feststellen.

Die Streuung der direkt am Standort emittierten CO₂-Emissionen aller 20 modellierten Elektrolichtbogenöfen liegt bei 78%, was Abbildung 7.6 verdeutlicht. Diese relativ weite Streuung ist zu einem großen Teil auf die Walzwerke zurückzuführen, welche durch eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse mit unterschiedlichen Energieintensitäten charakterisiert sind. Die Differenzen der durch die Elektrolichtbogenöfen emittierten Treibhausgase sind hingegen durch die Intensität des Erdgaseinsatzes bedingt, der jedoch

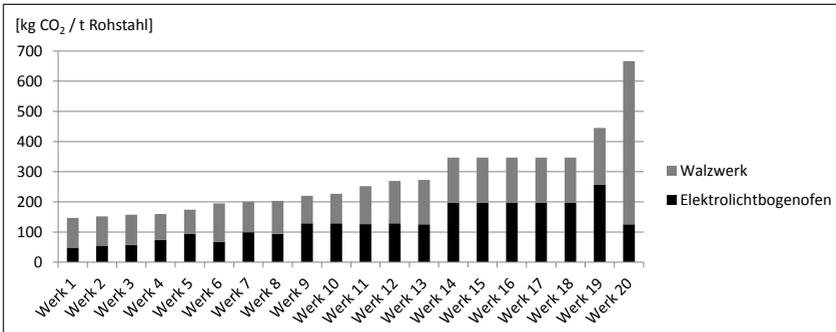


Abbildung 7.6.: Durch das NLP ermittelte (direkte und normierte) CO₂-Emissionen aller deutschen Elektrolichtbogenöfen im Jahr 2007

wiederum reduzierend auf den Stromverbrauch wirken kann (vgl. Oxy-Fuel-Brenner *EAF3*). Eine abschließende Bewertung der Effizienz einzelner Elektrolichtbogenöfen ist somit nur unter Berücksichtigung des spezifischen Stromeinsatzes durchführbar (s.u.). Da die ecoinvent-Datenbank keine direkten CO₂-Emissionen resultierend aus dem Erdgaseinsatz ausweist, wird im Falle des Elektrolichtbogenofens von einem Vergleich mit den europäischen Durchschnittswerten abgesehen.

Für die modellierten Refiner und Remelter ist keine Normierung erforderlich, da pro Standort jeweils nur eine Anlage modelliert wird und die Weiterverarbeitung (Bsp.: Walzprozesse) in der Regel an separaten Standorten erfolgt. Die werkspezifischen Ergebnisse sind daher deckungsgleich mit den anlagenspezifischen aus Abbildung 7.3. Die geringe Streuung der 14 Anlagen ist dadurch zu erklären, dass die Emissionen bei der Produktion von Sekundäraluminium in der Regel unterhalb der Berichtsschwelle des PRTR (vgl. Abschnitt 2.2.6) liegen und somit durchschnittliche Emissionen für die beiden Prozesse im NLP angenommen werden müssen. Damit ergeben sich die Emissionsfaktoren zu 265 kg CO₂ pro Tonne für die vier betrachteten Remelter [93] und zu 320 kg CO₂ pro Tonne für die zehn Refiner [103].

Neben den direkten CO₂- und PFC-Emissionen der betrachteten Werke ist weiterhin der Stromverbrauch der 25 Elektrolichtbogenöfen und vier Elektrolysen von hoher Relevanz für die indirekte Entstehung von

Treibhausgasen. Für erstere ergibt sich ein Mittelwert von 1970 MJ pro Tonne Rohstahl mit einer Standardabweichung von 238 MJ, für letztere ein durchschnittlicher Verbrauch von 51003 MJ pro Tonne Flüssigaluminium mit einer Standardabweichung von 696 MJ.

Insgesamt lässt sich für die entwickelte Datenbasis festhalten, dass für einige Anlagen und Werke eine relativ große Bandbreite bezüglich der direkt und indirekt emittierten Treibhausgase vorliegt. Dies spricht für das Vorhandensein von großen Minderungspotenzialen, zumindest für die eher ineffizienten Werke. Dem entgegen steht die Tatsache, dass nicht jedes Werk dieselben Voraussetzungen besitzt, da bspw. nicht alle Anlagen an einem Standort integriert sind und somit Nachteile bezüglich eines effizienten Energiemanagements bestehen. Auch die im internationalen Vergleich relativ geringen Emissionen sprechen für ein eher geringes Treibhausgasminderungspotenzial der deutschen Metallerzeugung. Die noch offenen Fragen, welche Potenziale in Zukunft genutzt werden könnten, wie sich die Emissionen in Zukunft entwickeln und wie diese beeinflusst werden könnten, werden daher in den folgenden Abschnitten anhand des in den Kapiteln 4 und 5 entwickelten Simulationsmodells beantwortet.

7.2. Untersuchte Szenarios

Während in Kapitel 6 die in der Simulation konstant gehaltenen oder nur für das Basisjahr t^{BAS} vorgegebenden Parameter bereits beschrieben wurden, gibt der vorliegende Abschnitt einen Überblick über die in Szenarios variierbaren, zeitabhängigen Parameter sowie über die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Szenarios. Der Zeithorizont, welcher durch das integrierte Gesamtmodell abgedeckt wird, erstreckt sich vom Basisjahr 2006 bis zum Jahr 2030. Daneben kann das IO-Teilmodell auch für Simulationsrechnungen mit einem bis zum Jahr 2050 erweiterten Zeithorizont verwendet werden. Bezüglich des aktorsbasierten Teilmodells werden jedoch Simulationsrechnungen über das Jahr 2030 hinaus als nicht sinnvoll erachtet, da hierfür neben den BVT auch *Emerging Techniques*, welche teilweise eine weitgehende Restrukturierung der einzelnen Prozessketten erfordern, in Betracht gezogen werden müssten. Fehlende Informationen

über Investitionen und der durch diese Technologien induzierten Koeffizientenänderungen würden bei dem hier vorgestellten werkspezifischen Ansatz mit beträchtlichen Unsicherheiten einhergehen.

Um die Auswirkungen einer Variation der klimapolitischen Instrumente auf die Metallherzeugung und die damit verbundenen Sektoren quantifizieren zu können, wird zunächst ein Basisszenario definiert, das als Referenz herangezogen werden kann. Dieses Basisszenario repräsentiert die aktuelle Klimapolitik sowie aktuelle Erwartungen über zukünftige makroökonomische Entwicklungen und wird daher auch als *BAU*-Szenario (*business-as-usual*) bezeichnet. Die konkreten Parameter finden sich zusammen mit den verwendeten Quellen in Tabelle 7.1. Insofern keine weiteren Informationen gegeben sind, bleiben die entsprechenden Werte unverändert und $\Delta c_{i,j,t}$, $\Delta u_{g,j,t}$, $\Delta d_{i,h,t}$ bzw. $\Delta \pi_{g,j,t}$ werden gleich Eins gesetzt.

Tabelle 7.1.: Im Basisszenario *BAU* verwendete zeitabhängige Inputparameter

Bezeichnung	Notation	2006	2015	2020	2025	2030	2050	Quelle
Bevölkerung im Vergleich zu Basisjahr [%]	Δbev_t	100	98	97	96	94	84	[68, 198]
Preis importiertes Rohöl im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\Delta \pi_{imp,j=7,t}$	100	101	103	102	102	101	[198]
Preis importiertes Erdgas im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\Delta \pi_{imp,j=8,t}$	100	101	103	102	102	101	[198]
Preis importierte Steinkohle im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\Delta \pi_{imp,j=4,t}$	100	96	102	101	101	101	[198]
Arbeitsentgelte im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\Delta \pi_{ae,j,t}$	100	101	101	101	101	101	Annahme (Reallohn)

Tabelle 7.1.: Im Basisszenario *BAU* verwendete zeitabhängige Inputparameter

Bezeichnung	Notation	2006	2015	2020	2025	2030	2050	Quelle
Änderung Exporte im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\Delta d_{i,exp,t}$	Fortschreibung der in [76] berichteten Exporte für jeden Sektor und Abgleich mit [249], Werte für Metallherzeugung aus [257]						[76, 249, 257] + Trendfortschreibung
Änderung der gesamten Exporte im Vergleich zu Vorjahr [%]	<i>gewichtetes Mittel aus allen Sektoren</i>	100	104	103	103	102	102	[76, 249] + Trendfortschreibung
Änderung Energieeinsatz im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\widehat{\Delta c}_{iET,j,t}$	100	99	99	99	99	99	[34] + Trendfortschreibung
Änderung Input an fossilen Energien im Elektrizitätssektor im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\widehat{\Delta c}_{iET,j=47,t}$, $i^{ET} \in \{4, 5, 8, 24\}$	100	97	97	97	97	97	Erreichung Soll-EE-Anteil ¹
Änderung Input an Halbzeugen im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\Delta c_{iHZ,jEP,t}$	100	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	[260]
Änderung Energieeinsatz private Haushalte im Vergleich zu Vorjahr [%]	$\Delta eff_{iET,t}^H$	100	99	99	99	99	99	[34] + Trendfortschreibung
Preis Emissionsberechtigungen $[\frac{EUR}{t CO_2 - Äq.}]$	$p_t^{CO_2}$	17	18	20	25	30	50	[198, 199]
Produkt-Emissionswert $[\frac{t CO_2 - Äq.}{t}]$	$bm_{jjZP,t}^{Prod}$	vgl. Abschnitt 2.2.3; Beibehaltung der Produkt-Emissionswerte aus der dritten Handelsperiode in Folgejahren ²						[97]

Tabelle 7.1.: Im Basisszenario *BAU* verwendete zeitabhängige Inputparameter

Bezeichnung	Notation	2006	2015	2020	2025	2030	2050	Quelle
Brennstoff-Emissionswert [$\frac{t\ CO_2}{TJ}$]	bm_t^{Brenn}	(-) ²	56,1	56,1	56,1	56,1	56,1	[97]
Carbon-Leakage-Faktor (gefährdete Sektoren) ³ [-]	$clf_{jjZP,t}$	(-) ²	1	1	1	1	1	[97]
Carbon-Leakage-Faktor (nicht gefährdete Sektoren) ⁴ [-]	$clf_{jjZP,t}$	(-) ²	0,66	0,3	0,3	0,3	0,3	[97]
Carbon-Leakage-Faktor Wärmeauskopplung [-]	$clf_t^{Wärme}$	(-) ²	0,66	0,3	0,3	0,3	0,3	[97]
Linearer Kürzungsfaktor [-]	lkf_t	(-) ²	0,97	0,88	0,88	0,88	0,88	[298, 301]
Kostenlose Zuteilung Emissionsberechtigungen [t CO ₂ -Äq.]	$zut_{jETS,t}$	Zusammenfassung der Zuteilungsmengen einzelner Anlagen aus den NAPs (vgl. Abschnitt 2.2.3) für die Jahre 2008 bis 2020 anhand der Tätigkeiten nach Anhang I TEHG, welche den Sektoren j^{ETS} entsprechen; für Folgejahre Werte aus 2020 konstant gehalten						[300, 302, 303]
Gesamte zuteilte Emissionsberechtigungen [Mio. t CO ₂ -Äq.]	$\sum_{jETS} (zut_{jETS,t})$	(-) ²	147	126	126	126	126	[300, 302, 303]
Normalsteuersatz Ökosteuer [$\frac{EUR}{GJ}$]	$ost_{iET,t}$	vgl. Tabelle 2.4 in Abschnitt 2.2.4; Werte über die Laufzeit konstant gehalten						[113, 279]
Steuerentlastungssatz produzierendes Gewerbe [$\frac{EUR}{GJ}$]	$ost_{iET,t}^{PG}$	vgl. Tabelle 2.4 in Abschnitt 2.2.4; Werte über die Laufzeit konstant gehalten ⁵						[113, 279]

Tabelle 7.1.: Im Basisszenario *BAU* verwendete zeitabhängige Inputparameter

Bezeichnung	Notation	2006	2015	2020	2025	2030	2050	Quelle
Selbstbehalt produzierendes Gewerbe (für Energie- und Stromsteuern) [EUR]	sbh_t^{PG}	2 · 205	2 · 250	2 · 250	2 · 250	2 · 250	2 · 250	[113, 279]
Maximaler Entlastungssatz im Spitzenausgleich [$\frac{EUR}{GJ}$]	$ost_{iET,t}^{SPA}$	vgl. Tabelle 2.4 in Abschnitt 2.2.4; Werte über die Laufzeit konstant gehalten ⁵						[113, 279]
Sockelbetrag produzierendes Gewerbe (für Energie- und Stromsteuern) [EUR]	sob_t^{SPA}	513 + 308	1000 + 750	1000 + 750	1000 + 750	1000 + 750	1000 + 750	[113, 279]
Rentenversicherungsbeitrag vor ökologischer Steuerreform [%]	rvb_t^{vor}	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	[247]
Rentenversicherungsbeitrag nach ökologischer Steuerreform [%]	rvb_t^{nach}	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	[247]
Erstattungssatz im Spitzenausgleich [%]	ers_t^{SPA}	95	90	90	90	90	90	[247]
Steuersatz energieintensive Sektoren [$\frac{EUR}{GJ}$]	$ost_{iET,t}^{INT}$	0	0	0	0	0	0	[80]
Reguläre EEG-Umlage [$\frac{EUR}{GJ}$]	eeu_t	2,2	17,9	21,4	25,6	29,8	46,5	[185, 247] + Trendfortschreibung

Tabelle 7.1.: Im Basisszenario *BAU* verwendete zeitabhängige Inputparameter

Bezeichnung	Notation	2006	2015	2020	2025	2030	2050	Quelle
¹ Annahme, dass das Ausbauziel für erneuerbare Energien (EE) von 80% im Jahre 2050 erreicht wird (vgl. Abschnitt 2.2.5).								
² In den Jahren 2006 bis 2012 wird die Zuteilungsmenge gleich den tatsächlichen Emissionen gesetzt.								
³ Unter die als gefährdet geltenden Sektoren fällt die Herstellung der folgenden Zwischenprodukte: Koks, Sinter, Eisen, Stahl, Anoden sowie Flüssialuminium (Elektrolyse) (vgl. EU-Kommission [97]).								
⁴ Unter die als nicht gefährdet geltenden Sektoren fällt die Herstellung der folgenden Zwischenprodukte: Walzstahl, Aluminiumoxid, Rohaluminium sowie Aluminiumband (Aluminiumprodukt) (vgl. EU-Kommission [97]).								
⁵ Vor 2011 werden die damals geltenden höheren Steuerentlastungssätze und niedrigeren maximalen Entlastungssätze im Spitzenausgleich angesetzt (vgl. bspw. [80]).								
⁶ Von 2006 bis 2011 bzw. von 2012 bis 2013 erfolgt modellseitig die Berechnung gemäß des bereits überholten EEGs [105] bzw. [106] (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.2.5).								

Als charakteristisch für das Szenario *BAU* zeigen sich die erwarteten Preissteigerungen importierter Brennstoffe² sowie eine Zunahme zukünftiger Exporte. Darüber hinaus wird von einem abnehmenden Energie- und Materialeinsatz bzw. einer Steigerung der Energie- und Materialeffizienz ausgegangen. Abbildung 7.7 zeigt zusammenfassend die Entwicklung dieser zentralen makroökonomischen Parameter, welche in Tabelle 7.1 als Abweichung zum Vorjahr angegeben sind. Während der Materialeinsatz pro erzeugtem Produkt nur leicht sinkt, geht der Energieeinsatz pro erzeugtem Produkt bzw. pro erstellter Leistung deutlich stärker zurück. Vor allem bezüglich des Einsatzes fossiler Energien im Elektrizitätssektor wird aufgrund der ambitionierten Ziele Deutschlands zum Ausbau der erneuerbaren Energien (vgl. Abschnitt 2.2.5) ein starker Rückgang erwartet. Inwieweit dies die erwarteten Exportsteigerungen und die dadurch zusätzlich generierten Produktionsvorgänge und Emissionen kompensiert, wird in Abschnitt 7.3 untersucht.

Die neben dem Basisszenario *BAU* analysierten Szenarios lassen sich prinzipiell in zwei Klassen einteilen. Eine Klasse hinterfragt die Erreichbarkeit der gesetzten klimapolitischen Minderungsziele (vgl. Abschnitt 2.1) und untersucht hierzu mögliche Lastenverteilungen zwischen den Sektoren. Die

²Die inländischen Preise ergeben sich im IO-Teilmodell direkt aus den Vorleistungsstrukturen und den Primärinputs (vgl. Gleichung 4.44 in Abschnitt 4.2.1). Letztere werden wiederum durch die Importe beeinflusst.

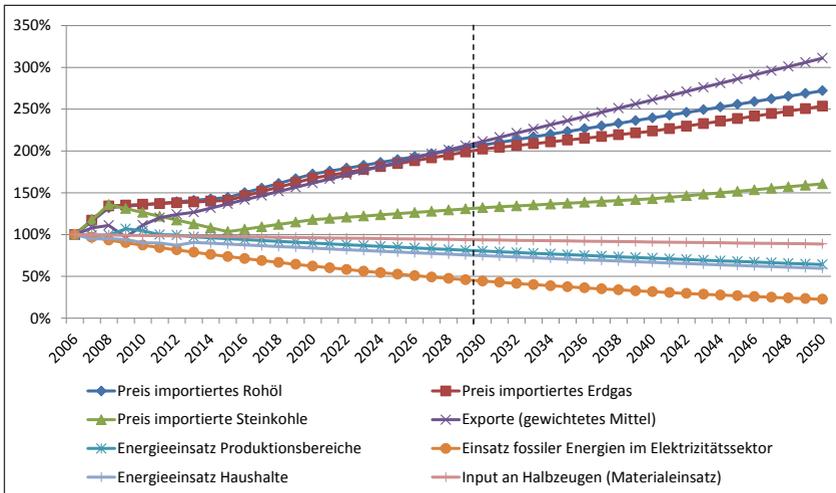


Abbildung 7.7.: Ausgewählte makroökonomische Entwicklungen im Szenario *BAU*

Analysen gründen dabei auf dem IO-Teilmodell, welches die Treibhausgasemissionen aller Sektoren berücksichtigt. Da die Zielerreichung durch klimapolitische Instrumente sichergestellt werden soll, quantifiziert eine weitere Klasse an Szenarios den Einfluss dieser auf die Metallherzeugung unter Berücksichtigung indirekter Effekte. Hierzu wird das integrierte Modell, bestehend aus IO-Teilmodell und aktorsbasiertem Teilmodell, eingesetzt.

Beide Klassen enthalten mehrere Szenarios, die jeweils unterschiedliche Ausprägungen annehmen können. Dies ist in den Tabellen 7.2 und 7.3 dargestellt. Alle dort nicht genauer spezifizierten Parameter werden wie im Szenario *BAU* angenommen. Da die Validierungsphase des Modells die Jahre 2006 bis 2014 umfasst, werden die Variationen der von *BAU* abweichenden Parameter erst ab dem Jahr 2015 vorgenommen. Auch Kombinationen der dargestellten Szenarios können betrachtet werden.

Die in Tabelle 7.2 spezifizierten Szenarios beziehen sich im Wesentlichen auf die Variation der Energieeffizienz *ENE-EFF*, der Materialeffizienz *MAT-EFF* sowie der Exporte *EXP*. Während die Energieeffizienz für alle

Sektorklassen (vgl. Abschnitt 4.2.2) variiert wird, erscheint die Variation der Materialeffizienz in erster Linie für die Sektoren sinnvoll, welche Halbzeuge zu Endprodukten weiterverarbeiten. Das Szenario *ENE-EFF-HZ*_{98%} bezeichnet bspw. eine jährliche Reduktion des Energieträgereinsatzes pro hergestelltem Halbzeug von 2%.

Die in Tabelle 7.3 spezifizierten Szenarios beziehen sich zum einen auf den Einsatz einer restriktiveren Klimapolitik *RES*, d.h. auf die Reduktion der Entlastungstatbestände bestehender klimapolitischer Instrumente (vgl. Abschnitte 2.2.3 bis 2.2.5) und zum anderen auf die Erhöhung des ökonomischen Anreizes zur Emissionsminderung durch höhere Steuern oder Preise für Emissionsberechtigungen. Im Szenario *RES-TEHG*_{0%} werden bspw. ab 2020 keine Zertifikate mehr zugeteilt, so dass sämtliche Emissionsberechtigungen käuflich erworben werden müssen. Im Szenario *RES-ÖKO*_{0%} sind hingegen ab 2020 keine Ausnahmen mehr bezüglich der Energie- und Stromsteuern vorgesehen, so dass jeder Sektor die volle Ökosteuern abführen muss. Das Szenario *RES-EEG*_{0%} hebt wiederum sämtliche Vergünstigungen bezüglich der EEG-Umlage auf, so dass ab 2020 jeder Sektor die volle EEG-Umlage zu entrichten hat.

Für jedes der aufgezeigten Szenarios werden zehn verschiedene Ausprägungen (zehn verschiedene Belegungen der xx-Werte) betrachtet, so dass sich eine Gesamtzahl von 131 Szenarios inklusive *BAU* ergibt. Alle dieser Szenarios können mit den in Abschnitt 5.2.3 dargestellten Verhaltensmustern der Akteure kombiniert werden. Insofern nicht explizit angegeben, wird jedoch von rational handelnden Akteuren (*homo oeconomicus*) ausgegangen, die den Kapitalwert als Entscheidungsgrundlage heranziehen. Wird hingegen die Maximierung der Emissionseinsparungen in den Vordergrund gestellt, so kann dies auch als Instrument der direkten Verhaltenssteuerung (vgl. Abschnitt 2.2.1) verstanden werden, das die Implementierung der jeweils effizientesten BVT vorschreibt.

7.3. Ergebnisse aus den untersuchten Szenarios

In Abschnitt 7.3.1 werden zunächst die Ergebnisse aus dem Basisszenario *BAU* eingehender analysiert. Letzteres dient zum einen dazu, einen Referenzpunkt für die weiteren betrachteten Szenarios festzulegen. Zum

Tabelle 7.2.: Betrachtete Szenarios zur Untersuchung der Zielerreichung und Lastenverteilung

Bezeichnung	Erläuterung
$ENE-EFF-ET_{xx\%}$	Senkung des Energieeinsatzes auf jährlich $xx\%$ in den Energieträger bereitstellenden Sektoren beginnend in 2015; ausgenommen ist die Elektrizitätserzeugung $(\widehat{\Delta c}_{iET,jET,t} = xx\% \forall t \geq 2015, i^{ET}, j^{ET} \neq 47)^1$
$ENE-EFF-HZ_{xx\%}$	Senkung des Energieeinsatzes auf jährlich $xx\%$ in den energieintensiven (Halbzeuge herstellenden) Sektoren beginnend in 2015 $(\widehat{\Delta c}_{iET,jHZ,t} = xx\% \forall t \geq 2015, i^{ET}, j^{HZ})^1$
$ENE-EFF-EP_{xx\%}$	Senkung des Energieeinsatzes auf jährlich $xx\%$ in den Endprodukte bereitstellenden Sektoren beginnend in 2015 $(\widehat{\Delta c}_{iET,jEP,t} = xx\% \forall t \geq 2015, i^{ET}, j^{EP})^1$
$ENE-EFF-DL_{xx\%}$	Senkung des Energieeinsatzes auf jährlich $xx\%$ in den restlichen Sektoren beginnend in 2015 $(\widehat{\Delta c}_{iET,jDL,t} = xx\% \forall t \geq 2015, i^{ET}, j^{DL})^1$
$ENE-EFF-HH_{xx\%}$	Senkung des Energieeinsatzes auf jährlich $xx\%$ in Haushalten beginnend in 2015 $(\Delta eff_{iET,t}^H = xx\% \forall t \geq 2015, i^{ET})^1$
$MAT-EFF-EP_{xx\%}$	Senkung des Materialeinsatzes (Halbzeuge) auf jährlich $xx\%$ in den Endprodukte bereitstellenden Sektoren beginnend in 2015 $(\Delta c_{iHZ,jEP,t} = xx\% \forall t \geq 2015, i^{HZ}, j^{EP})$
$EXP_{xx\%}$	Steigerung der Exporte auf jährlich $xx\%$ beginnend in 2015 $(\Delta d_{i,exp,t} = xx\% \forall t \geq 2015, i)$

¹ Zur Berechnung der aufgezeigten Szenarios wird $\Delta u_{abs,j,t} = 1$ für alle durch die Variation adressierten Sektoren j gesetzt. Dies liegt darin begründet, dass die Quote abq (vgl. Gleichung 4.21 in Abschnitt 4.2.1) nur für kleine Änderungen des Inputs an Energieträgern $\widehat{\Delta c}_{iET,j,t}$ valide Ergebnisse liefert, in einigen Extrem-szenarios diese Inputs jedoch um bis zu 10% jährlich gesenkt werden.

Tabelle 7.3.: Betrachtete Szenarios zur Untersuchung des Einflusses klimapolitischer Instrumente

Bezeichnung	Erläuterung
$RES-TEHG_{xx\%}$	Schrittweise Reduktion der Entlastungstatbestände im TEHG auf $xx\%$ im Jahre 2020 beginnend in 2015; d.h. Reduktion des Carbon-Leakage-Faktors ($clf_{jj^{ZP},t} = clf_t^{W\ddot{a}rme} = xx\% \forall t \geq 2020, jj^{ZP}$) ¹ sowie der exogen vorgegebenen Zuteilungsmengen ($zut_{jETS,t} = zut_{jETS,t=2014} \cdot xx\% \forall t \geq 2020, j^{ETS}$)
$RES-\ddot{O}KO_{xx\%}$	Schrittweise Reduktion der Entlastungstatbestände im EnergieStG bzw. StromStG auf $xx\%$ im Jahre 2020 beginnend in 2015; d.h. Anhebung der Ökosteuer für energieintensive Sektoren ($ost_{iET,t}^{INT} = (1 - xx\%) \cdot ost_{iET,t} \forall t \geq 2020, i^{ET}$), Reduktion der Entlastungssätze für das produzierende Gewerbe ($ost_{iET,t}^{PG} = xx\% \cdot ost_{iET,t} \forall t \geq 2020, i^{ET}$) sowie des Erstattungssatzes im Spitzenausgleich ($ers_t^{SPA} = xx\% \forall t \geq 2020$) ¹
$RES-EEG_{xx\%}$	Schrittweise Reduktion der Entlastungstatbestände im EEG auf $xx\%$ im Jahre 2020 beginnend in 2015; d.h. Anhebung der unteren Begrenzung für die EEG-Umlage ($beg_t^{min} = beg_t^{min,NEM} = (1 - xx\%) \cdot eeut \forall t \geq 2020$) ¹
$CO2-PR_{xx}$	Lineare Steigerung des Preises für Emissionsberechtigungen beginnend in 2015; xx bezeichnet den Preis im Jahre 2030 ($p_{t=2030}^{CO2} = xx \frac{EUR}{t CO_2 - Ag.}$)
$\ddot{O}KO-ST_{xx\%}$	Lineare Anhebung der Ökosteuer beginnend in 2015; $xx\%$ bezeichnet die Anhebung bis zum Jahr 2030 ($ost_{iET,t=2030} = ost_{iET,t=2014} \cdot xx\% \forall i^{ET}$)
$EEG-UM_{xx}$	Lineare Anhebung der EEG-Umlage beginnend in 2015; $xx\%$ bezeichnet die Anhebung bis zum Jahr 2030 ($eeut_{t=2030} = eeut_{t=2014} \cdot xx\%$)

¹ Der Carbon-Leakage-Faktor der nicht gefährdeten Sektoren sowie die Reduktion der Entlastungssätze (prod. Gewerbe) bzw. des Erstattungssatzes im Spitzenausgleich werden erst auf den vorgegebenen Prozentsatz ($xx\%$) gesetzt, sobald dieser geringer als der der aktuellen Klimapolitik ist (30%, 25% bzw. 90%), d.h. es werden lediglich Verschärfungen der klimapolitischen Instrumente betrachtet. Gleiches gilt für die Anhebung der unteren Begrenzung der EEG-Umlage.

anderen kann an Hand des Basisszenarios der Einfluss der unterschiedlichen EntscheidungsROUTINEN (rational handelnde Akteure bzw. solche, die die Auswirkungen auf das Klima minimieren) beziffert werden, was wiederum Rückschlüsse auf die vorhandenen Treibhausgasreduktionspotenziale zulässt. In Abschnitt 7.3.2 werden die in Tabelle 7.2 spezifizierten Szenarios untersucht. Dabei stehen die notwendigen Voraussetzungen für die Erreichbarkeit der durch die Bundesregierung gesteckten klimapolitischen Ziele (vgl. Abschnitt 2.1) im Fokus. Abschnitt 7.3.3 hingegen zeigt inwiefern klimapolitische Instrumente zu dieser Zielerreichung beitragen können, wobei sich die Analysen auf die Rahmenbedingungen der deutschen Metallindustrie beziehen und auf den in Tabelle 7.3 spezifizierten Szenarios gründen.

7.3.1. Analyse des Basisszenarios und der Treibhausgasreduktionspotenziale

Bevor die Ergebnisse aus dem Basisszenario dargestellt und die Treibhausgasreduktionspotenziale der deutschen Metallherzeugung quantifiziert werden, wird im folgenden Abschnitt zunächst das entwickelte Modell an Hand von berichteten Emissionsdaten validiert. In der von 2006 bis 2014 reichenden Validierungsphase werden keine Parametervariationen vorgenommen (vgl. Abschnitt 7.2). Weiterhin wird angenommen, dass Investitionsentscheidungen, welche in dieser Phase getätigt werden, in der Realität ohnehin bereits realisiert wurden. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass die im Abschnitt 6.2 hergeleitete Datenbasis bezüglich der aktuell in den Werken installierten Technologien vor allem hinsichtlich der Aluminiumindustrie nicht zwangsläufig vollständig ist. Der Einfluss der unterschiedlichen klimapolitischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auf die Investitionsentscheidung (Abschnitt 7.3.3) wird somit dem durch diese Validierungsphase aktualisierten Anlagenbestand gegenübergestellt.

7.3.1.1. Modellvalidierung

Abbildung 7.8 stellt die durch das IO-Teilmodell simulierten Treibhausgasemissionen den durch das Umweltbundesamt [295] für die Jahre 2006 bis 2013 berichteten Werten gegenüber. Es zeigt sich sowohl für die simulierten

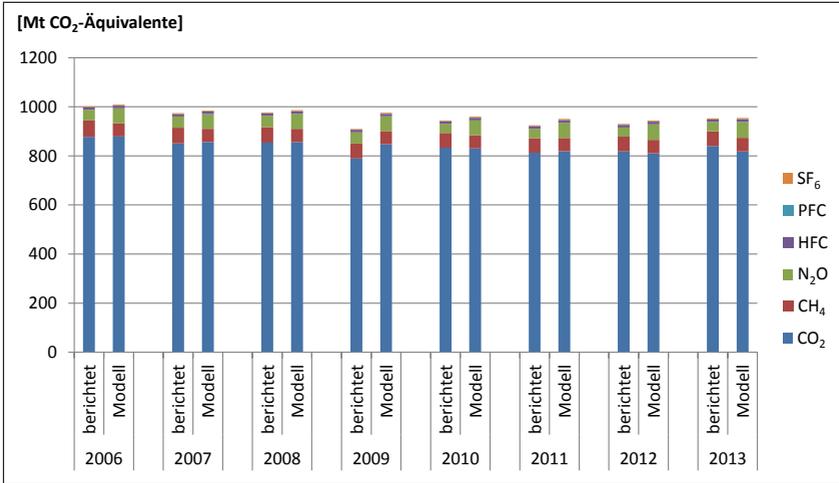


Abbildung 7.8.: Vergleich der tatsächlichen (in [295] berichteten) Treibhausgasemissionen Deutschlands mit den im Szenario *BAU* simulierten

als auch für die berichteten Werte ein leichter Rückgang der Emissionen, wobei, bis auf das Jahr 2009, die jährlichen Abweichungen zwischen 0,2% und 2,7% liegen. Die höhere Abweichung von 7,2% im Jahr 2009 ist auf die Weltwirtschaftskrise zurückzuführen, welche durch das Modell nur eingeschränkt wiedergegeben wird. Dies liegt darin begründet, dass modellseitig lediglich der Rückgang der exogen vorgegebenen Exporte eine Reduktion der Produktionsvorgänge und damit der Emissionen bedingt. Der im Jahr 2009 ebenfalls zu beobachtende Rückgang der inländischen Nachfrage, resultierend aus einem äußerst defensiven Kauf- und Investitionsverhalten, kann durch das Modell hingegen nicht endogen abgebildet werden (vgl. bspw. die Funktionsweise des LES in Abschnitt 4.2.1).

Ähnliches lässt sich auch für die Emissionen der Metallerzeugung feststellen, welche in Abbildung 7.9 dargestellt sind. Hier bewegen sich die Abweichungen von den im aktorsbasierten Teilmodell simulierten zu den im PRTR [104] berichteten Werten zwischen 0,4% und 10,2% (2009: 32,3%). Die höheren Abweichungen im Vergleich zu Abbildung 7.8 erklären sich

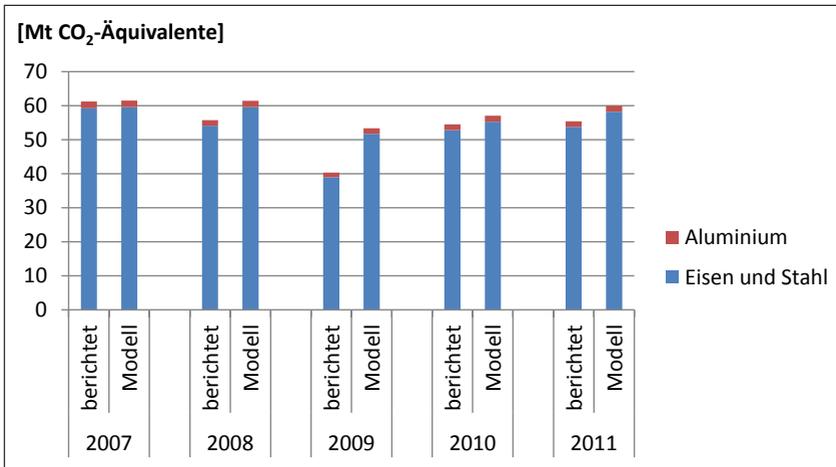


Abbildung 7.9.: Vergleich der tatsächlichen (in [104] berichteten) Treibhausgasemissionen der Metallherzeugung mit den im Szenario *BAU* simulierten

aus der Tatsache, dass die Metallindustrie als wichtiger Zulieferer für viele Industrien besonders von der Weltwirtschaftskrise betroffen war.

Insgesamt geben sowohl die durch das IO-Teilmodell als auch die durch das aktorsbasierte Teilmodell simulierten Treibhausgasemissionen den rückläufigen Trend der berichteten Werte wieder. Somit wird das entwickelte Modell zusammen mit der verwendeten Datenbasis als prinzipiell geeignet angesehen, um Abschätzungen bezüglich der in Zukunft emittierten Treibhausgase vorzunehmen, zumindest insofern keine strukturellen wirtschaftlichen Brüche wie im Falle der Weltwirtschaftskrise zu erwarten sind. Diese Abschätzungen werden in den folgenden Abschnitten für Deutschland sowie die Metallherzeugung im Speziellen dargestellt.

7.3.1.2. Analyse der makroökonomischen Entwicklungen

Die Simulation der makroökonomischen Entwicklungen wird durch das IO-Teilmodell getragen. Der betrachtete Zeithorizont erstreckt sich hier bis

zum Jahre 2050, um die für die Erreichbarkeit der klimapolitischen Langfristziele (vgl. Abschnitt 2.1) erforderlichen Prämissen (vgl. Abschnitt 7.3.2) ableiten zu können. Abbildung 7.10 zeigt hierzu zunächst die Entwicklung ausgewählter makroökonomischer Parameter im Szenario *BAU*.

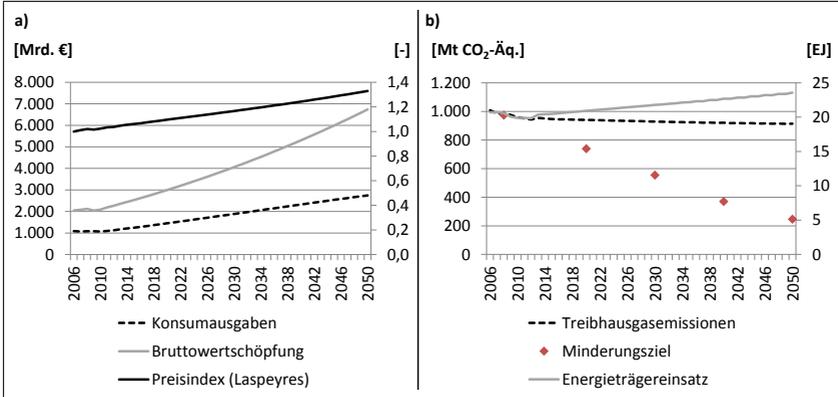


Abbildung 7.10.: Entwicklungen ausgewählter makroökonomischer Parameter im Szenario *BAU*; Dargestellt sind in a) die Konsumausgaben $\sum_i f_{i,pri,t}$, die Bruttowertschöpfung $\sum_j \sum_{g \in \{ae,sop,abs,nbu\}} w_{g,j,t}$, der Preisindex nach Laspeyres p^{Las} sowie in b) die Treibhausgasemissionen $\sum_{i=1}^{n+1} \sum_b e_{i,b,t}$, der Energieträgereinsatz $\sum_{j=1}^{n+1} \sum_{i \in ET} ent_{i \in ET,j,t}$ und die klimapolitischen Ziele Deutschlands (vgl. Abbildung 2.1).

Es wird ein deutlicher Anstieg der Bruttowertschöpfung ersichtlich, welche im Jahre 2050 etwa 6,7 Billionen Euro beträgt und damit um 230% höher liegt als in 2006. Teilweise kann dieser Anstieg auf ein erhöhtes Preisniveau zurückgeführt werden, was der Anstieg des Preisindex nach Laspeyres auf 133% verdeutlicht.³ Der größere Teil des Anstiegs ist jedoch durch eine Zunahme des Produktionsniveaus, resultierend aus einer gestiegenen Endnachfrage, bedingt. Letztere wird im Wesentlichen von den Konsumausgaben im Inland (Zunahme um 153%) sowie den Exporten (Zunahme um 210%, vgl. Abbildung 7.7) getragen. Dies führt dazu, dass die im Szenario *BAU* unterstellten Energie- und Materialeffizienzverbesserun-

³Da modellseitig keine Inflation berücksichtigt wird, sind alle Preise in €₂₀₀₆ angegeben und etwaige Preisänderungen als eine Änderung der realen Preise zu verstehen.

gen (Rückgang des Energie- bzw. Materialeinsatzes um 40 bzw. 11%, vgl. Abbildung 7.7) nur in geringem Umfang reduzierend auf die absoluten Treibhausgasemissionen wirken. Letztere sinken lediglich um 9% auf 914 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2050, wodurch die gesteckten klimapolitischen Ziele (246 Mt CO₂-Äq.) im Szenario *BAU* deutlich verfehlt werden. Der Energieträgereinsatz steigt sogar leicht um 14% auf 23,6 PJ, wobei jedoch vor allem die Dekarbonisierung der Elektrizitätserzeugung (Rückgang des Einsatzes fossiler Energien auf 23%, vgl. Abbildung 7.7) einem Anstieg der Treibhausgasemissionen resultierend aus einem gestiegenen Stromverbrauch entgegenwirkt.

Diese Betrachtungen zeigen bereits, dass eine alleinige Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors durch den Einsatz erneuerbarer Energien nicht ausreichend ist, um die zusätzlichen Emissionen, generiert durch ein starkes Wirtschaftswachstum, zu kompensieren. Welche Bedingungen abweichend vom Szenario *BAU* erfüllt sein müssen, damit die Einhaltung der klimapolitischen Ziele sichergestellt werden kann, wird in Abschnitt 7.3.2 erörtert.

Der in der vorliegenden Arbeit verfolgte Ansatz schlüsselt neben den emittierten Treibhausgasen auch die anthropogenen Kohlenstoffflüsse einer Volkswirtschaft explizit auf (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die Entwicklung dieser ist für das Szenario *BAU* in Abbildung 7.11 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Kohlenstoffintensität, welche den gesamten anthropogenen Input bzw. Output an Kohlenstoff beschreibt, um etwa 17% zunimmt. Dabei gehen die Emissionen der kohlenstoffhaltigen Treibhausgase CO₂ und CH₄ um etwa 22% zurück. Der höhere Rückgang im Vergleich zum obig beschriebenen Durchschnitt aller Treibhausgase (Rückgang um 9%) liegt darin begründet, dass bezüglich der CO₂-Emissionen jährliche Effizienzverbesserungen unterstellt werden, während die Emissionsfaktoren der anderen Treibhausgase konstant gehalten werden (Linkage-Ansatz). Der exportierte in Produkten oder Energieträgern gebundene Kohlenstoff⁴ steigt um 99%, was auf den allgemeinen Anstieg der Exporte zurückzuführen ist. Der Bestand an in der Volkswirtschaft verbleibenden kohlenstoffhaltigen Produkten

⁴Unter dem exportierten Kohlenstoff wird, wie im Falle des importierten Kohlenstoffs, nicht die durch die Endnachfrage generierten Produktionsprozesse bzw. Treibhausgasemissionen verstanden (vgl. *embodied emissions*, Abschnitt 3.2.2), sondern tatsächliche Kohlenstoffflüsse, die die Landesgrenzen übertreten, z.B. kunststoffhaltige Produkte.

und Energieträgern nimmt hingegen um 87% zu, was der gestiegenen Endnachfrage und dem höheren Produktionsniveau geschuldet ist. Die bedeutendsten Kohlenstoffflüsse stellen die Produkt- bzw. Rohstoffströme zwischen den Sektoren dar und steigen um etwa 18%. Eine höhere Steigerung, bedingt durch das starke Wirtschaftswachstum, wird durch die modellierten Energie- und Materialeffizienzverbesserungen verhindert. Der importierte Kohlenstoff legt um 23% zu, während der aus der Umwelt entnommene Kohlenstoff lediglich um 2% steigt. Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass im Szenario *BAU* die Kohlenstoffintensität der deutschen Volkswirtschaft im Vergleich zur Entwicklung des Produktionsniveaus (vgl. die Bruttowertschöpfung in Abbildung 7.10) unterproportional wächst, was für eine teilweise Entkopplung des benötigten Kohlenstoffs von den bereitzustellenden Produkten und Dienstleistungen spricht.

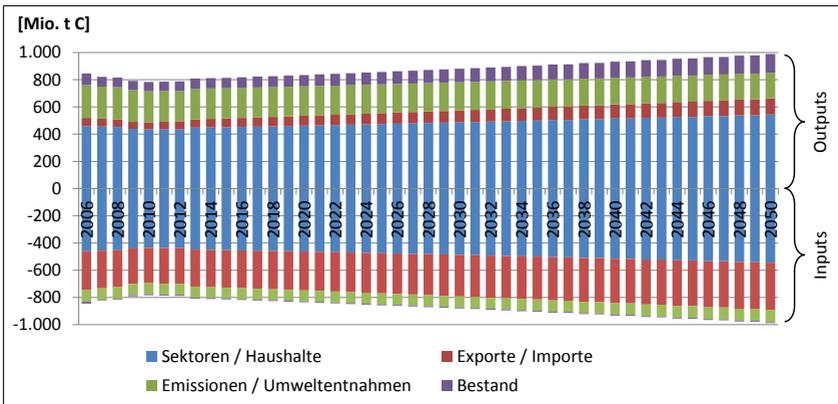


Abbildung 7.11.: Über alle Sektoren j aggregierte Kohlenstoffflüsse im Szenario *BAU* (Die Inputs umfassen den Input aus den zuliefernden Sektoren $\sum_i \sum_j cz_{i,j}$, den importierten Kohlenstoff $\sum_j cw_j^{IMP}$, den aus der Umwelt entnommenen Kohlenstoff $\sum_j cw_j^{UMW}$ sowie den aus dem Bestand entnommenen Kohlenstoff $\sum_j cw_j^{BES}$. Die Outputs umfassen den Output der liefernden Sektoren $\sum_i \sum_j cz_{i,j}$, den exportierten Kohlenstoff $\sum_i cf_i^{EXP}$, den emittierten Kohlenstoff $\sum_i (cf_i^{CO2} + cf_i^{CH4})$ sowie den Kohlenstoff, welcher im Bestand verbleibt $\sum_i cf_i^{BES}$.)

Neben den aggregierten Kohlenstoffflüssen der deutschen Volkswirtschaft werden auch die Entwicklungen in den einzelnen Sektoren betrachtet. Tabelle 7.4 liefert hierzu die notwendigen Informationen. Dargestellt sind die zehn Sektoren mit den höchsten Treibhausgasemissionen im Basisjahr, wobei neben den Emissionen und Emissionsfaktoren auch weiterhin die indirekt induzierten Umweltauswirkungen auf nationaler und internationaler Ebene (*domestic technology assumption*, vgl. Abschnitt 3.2.2) ausgewiesen werden. Während die Elektrizitätsversorgung ($i = 47$) gefolgt von den privaten Haushalten ($i = 80$) im Basisjahr den größten Teil der Treibhausgase emittiert, repräsentiert in 2050 die Landwirtschaft ($i = 1$) den größten Emittenten. Diese Veränderung liegt an den erwarteten Emissionsreduktionen durch den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien in der Elektrizitätsversorgung (induziert durch EEG), aber auch in der Raumwärmebereitstellung der Haushalte (bspw. induziert durch EEWärmeG). Gleichzeitig bedingen die N_2O - und CH_4 -Emissionen in der Landwirtschaft etwa 90% der emittierten Treibhausgase, wobei die entsprechenden Emissionsfaktoren in der Modellierung konstant gehalten werden. Somit sinkt der durchschnittliche Emissionsfaktor in der Landwirtschaft lediglich um 4%, wohingegen der Emissionsfaktor der Elektrizitätsversorgung um 71% zurückgeht. Daraus ergibt sich eine Steigerung der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft um 88% und eine Senkung in der Elektrizitätsversorgung um 67%.

Während die zehn dargestellten Sektoren im Basisjahr bereits 83% der Treibhausgasemissionen verursachen, emittieren die verbleibenden 70 Sektoren lediglich 17%. Dieses Verhältnis verschiebt sich durch die Dekarbonisierung der Elektrizitätsversorgung und der privaten Haushalte hin zu einem Anteil der zehn emissionsintensivsten Sektoren von nur noch 73% in 2050. Im Basisjahr entstehen 31% der deutschen Treibhausgasemissionen durch die Nachfrage nach Produkten aus dem Ausland, im Jahre 2050 sind es hingegen bereits 40%.⁵

⁵Die durch die Nachfrage nach Produkten aus dem Ausland generierten Treibhausgasemissionen werden analog zu $e_{i,b,t}^{LEV}$ bestimmt (vgl. Abschnitt 4.2.3), wobei jedoch nur die Exporte als Teil der Endnachfrage betrachtet werden.

Tabelle 7.4.: Kohlenstoffintensität der zehn Sektoren mit den höchsten Treibhausgasemissionen; Neben den direkten, im Sektor i entstehenden Emissionen $\sum_b e_{i,b,t}$ und Emissionsfaktoren $\sum_b ef_{i,b,t}$ sind weiterhin die indirekten Umweltauswirkungen (*Carbon Footprint* $\sum_b ef_{i,b,t}^{ind}$ bzw. $\sum_b ef_{i,b,t}^{Welt,ind}$, Umweltentnahmen $cw_{i,t}^{UMW,ind}$ bzw. $cw_{i,t}^{UMW,Welt,ind}$, Bestandszunahmen $cf_{i,t}^{BES,ind} - cw_{i,t}^{BES,ind}$ bzw. $cf_{i,t}^{BES,Welt,ind} - cw_{i,t}^{BES,Welt,ind}$) angegeben.

Sektor	Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äq.]		Emissions- faktoren [kg CO ₂ - Äq./€] ¹		<i>Carbon Footprint</i> [kg CO ₂ -Äq./€] ¹				Umweltentnahmen [kg C/€] ¹				Bestandszunahmen [kg C/€] ¹			
					national		interna- tional		national		interna- tional		national		interna- tional	
	2006	2050	2006	2050	2006	2050	2006	2050	2006	2050	2006	2050	2006	2050	2006	2050
Elektrizität	336	112	4,60	1,32	5,88	1,69	6,11	1,75	0,77	0,18	1,36	0,32	0,13	0,01	0,15	0,01
Haushalte ²	199	118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Landwirt.	74	139	1,16	1,11	1,46	1,32	1,69	1,47	0,02	0,01	0,16	0,08	0,00	0,00	0,01	0,01
Stahl	50	53	0,44	0,28	1,08	0,67	1,72	1,07	0,06	0,04	0,57	0,49	0,05	0,17	0,13	0,32
Chemie	43	73	0,21	0,16	0,50	0,31	0,76	0,45	0,04	0,02	0,37	0,26	0,05	0,05	0,08	0,07
Keramik	37	67	1,14	0,75	1,56	0,94	1,70	0,99	0,14	0,08	0,37	0,21	0,03	0,00	0,04	0,01
Fernwärme	35	25	5,26	3,54	6,57	4,41	6,80	4,53	0,21	0,14	1,07	0,71	0,40	0,22	0,44	0,24
Entsorgung	27	39	0,84	0,81	0,95	0,88	0,97	0,89	0,01	0,00	0,05	0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Transport	18	26	0,30	0,20	0,41	0,25	0,46	0,27	0,01	0,00	0,12	0,06	0,01	0,01	0,01	0,02
Mineralöl	17	16	0,20	0,14	0,28	0,19	0,49	0,25	0,04	0,03	1,64	1,32	0,01	0,14	0,07	0,16
Restliche Sektoren	172	245	0,04	0,02	0,17	0,08	0,26	0,13	0,02	0,01	0,12	0,06	0,02	0,01	0,02	0,02
Alle Sektoren	1009	914	0,19	0,07	0,27	0,11	0,38	0,16	0,03	0,01	0,16	0,07	0,02	0,02	0,03	0,03

¹ Der Nenner (1 €) entspricht dem Wert einer fiktiven physischen Einheit im Basisjahr t^{BAS} und ist somit von etwaigen Preisentwicklungen entkoppelt (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.2.1).

² Als Teil der Endnachfrage repräsentieren die Haushalte keine Güter, weshalb nicht alle Werte angegeben werden können.

Bezüglich der indirekten Umweltauswirkungen zeigt sich folgendes Bild. Die Reduktion des *Carbon Footprints* erfolgt in ähnlicher Größenordnung wie die Reduktion der Emissionsfaktoren, da letztere häufig einen großen Teil des *Carbon Footprints* repräsentieren. Der Rückgang liegt dabei zwischen -71% für die Elektrizitätsversorgung und -8% für die Entsorgungsleistungen ($i = 75$). Der internationale *Carbon Footprint* ist, abhängig vom importierten Anteil der jeweiligen Vorleistungen, zwischen 2% (Entsorgungsleistungen) und 74% (Mineralölverarbeitung, $i = 24$) höher als der korrespondierende nationale Wert.

Die durch die Nachfrage nach Gütern indirekt induzierten Umweltentnahmen reichen für das Basisjahr im nationalen Fall von 0,01 bis 0,77 kg Kohlenstoff pro nachgefragtem Euro. Bei der Elektrizitätsversorgung kommt dabei vor allem der heimische Braunkohleabbau zum Tragen. Die weltweit induzierten Umweltentnahmen liegen deutlich höher. So zeigt sich bspw. bei der Mineralölverarbeitung, dass der größte Teil des Erdöls importiert wird, wodurch vor allem Umweltentnahmen im Ausland verursacht werden.

Bezüglich der induzierten Bestandsänderungen fällt auf, dass, im Gegensatz zu den restlichen Sektoren, der Bestand an Kohlenstoff im Sektor *Entsorgungsleistungen* reduziert wird. Dies verdeutlicht die Recyclingaktivitäten des Sektors, da kohlenstoffhaltige Reststoffe genutzt und wiederum in neue Produkte überführt werden. Die Entwicklung der induzierten Bestandsänderungen zwischen 2006 und 2050 weist zwischen den zehn betrachteten Sektoren die größte Bandbreite auf. Während durch die Endnachfrage in einigen Sektoren deutliche Bestandszunahmen generiert werden, lassen sich in anderen Sektoren deutliche Reduktionen feststellen. Diese Schwankungen sind teilweise darauf zurückzuführen, dass der in der Volkswirtschaft verbleibende Bestand an Kohlenstoff modellseitig als Resultierende berechnet wird (vgl. Gleichung 4.68 in Abschnitt 4.2.2) und somit die unsicherste Größe der modellierten Kohlenstoffflüsse darstellt. Dennoch dient die Berechnung dieser Größe einer Abschätzung bezüglich der Größenordnung des in Produkten gebundenen und jährlich zusätzlich im Bestand verbleibenden Kohlenstoffs und kann daher nicht vernachlässigt werden.

7.3.1.3. Ableitung der Treibhausgasreduktionspotenziale

Nachdem die makroökonomischen Entwicklungen im vorangegangenen Abschnitt basierend auf dem IO-Teilmodell dargestellt wurden, gründen die folgenden Analysen auf dem integrierten Gesamtmodell. Der Zeithorizont wird daher auf 2030 festgelegt. Abbildung 7.12 zeigt die Entwicklung der einzelnen Kostenpositionen $k_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ sowie der Erlöse $erl_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ (vgl. Tabelle 5.2 in Abschnitt 5.2.2) in der Metallindustrie aggregiert über alle simulierten Werke s . Daneben werden auch der resultierende Gewinn $gew_{te,y,jj}^{ZP,s,t}$ sowie die jeweiligen durch die Implementierung von BVT generierten Emissionsminderungen $e_{te,y,jj}^{AKT,Mind,ZP,s,t}$, $e_{te,y,jj}^{Mind,ges,ZP,s,t}$ bzw. $e_{te,y,jj}^{Welt,Mind,ges,ZP,s,t}$ dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Erlöse leicht zunehmen, was zum einen durch ein höheres Produktionsniveau und zum anderen durch steigende Preise für Stahl und Aluminium bedingt ist. So steigt in der Eisen- und Stahlproduktion ($i = 32$) zwischen 2006 und 2030 die preisbereinigte Bruttowertschöpfung um 28%, in der Aluminiumindustrie ($i = 33$) hingegen um 16%, während die Preise für Eisen und Stahl in derselben Periode um 11%, für Aluminium um 6%, zunehmen.

Die dominierende Kostenposition aller betrachteten Verfahrensrouten stellen die Ausgaben für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (RHB) $k_{1,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ dar. Während in der primären Stahlerzeugung die RHB-Kosten, bedingt durch die Ausgaben für Eisenerz, Stahlschrott, Kohle und Legierungen, etwa 58% der Gesamtkosten repräsentieren, beträgt der Anteil in der sekundären Stahlerzeugung etwa 67%. Letzterer resultiert vor allem aus den Ausgaben für Stahlschrott, Elektrizität und Legierungen. Bei der primären Aluminiumerzeugung kommen neben dem Zukauf von Zwischenprodukten wie Aluminiumoxid vor allem die Ausgaben für die bereitgestellte Elektrizität zum Tragen, was zu einem Anteil der RHB-Kosten von etwa 75% führt. Bezüglich der sekundären Aluminiumerzeugung ist der RHB-Kostenanteil von 91% nahezu ausschließlich auf die Ausgaben für Aluminiumschrott zurückzuführen. Aufgrund der im Szenario *BAU* unverändert geltenden Entlastungstatbestände stellen die klimabezogenen Ausgaben keinen nennenswerten Kostenfaktor dar.

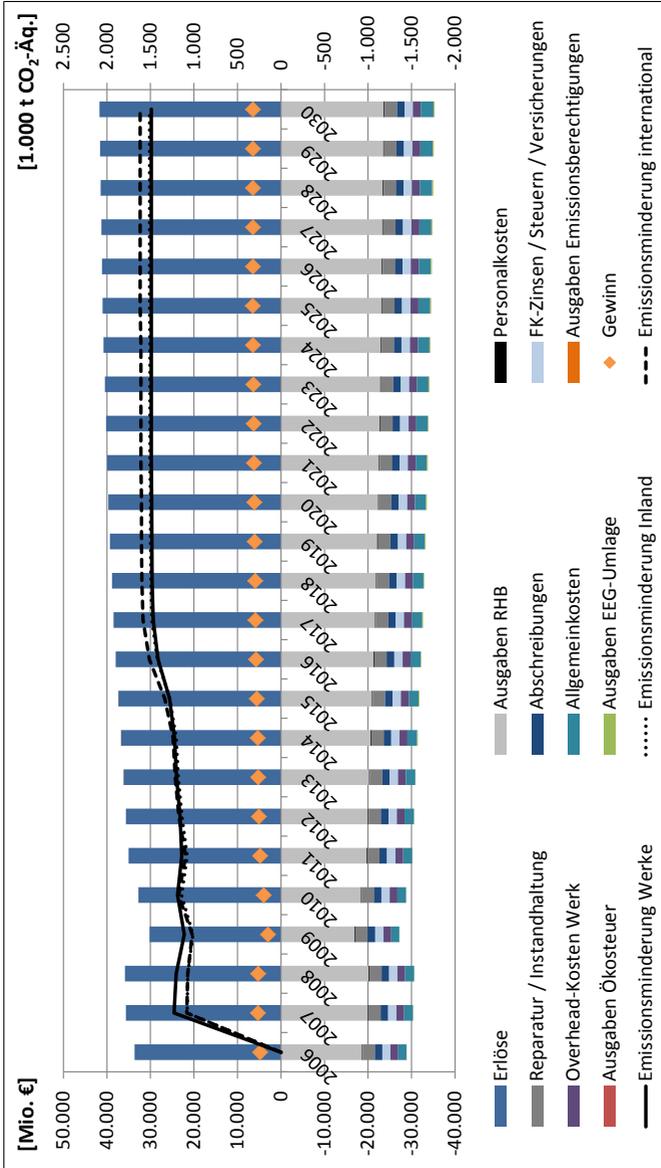


Abbildung 7.12.: Kosten, Erlöse und Emissionseinsparungen aller Werke *s* im Szenario *BAU*

Wie die ebenfalls in Abbildung 7.12 dargestellten Emissionseinsparungen zeigen, werden bereits im Basisszenario einige Investitionen in effizienzsteigernde Technologien getätigt (vgl. hierzu auch Abbildung 7.13 a). Diese belaufen sich auf insgesamt 290 Mio. €, wobei bis zum Jahre 2014 bereits 233 Mio. € realisiert werden.⁶ Die werksseitigen Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj}^{AKT,Mind,ZP,s,t}$ können mit ca. 1,5 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten angegeben werden, die indirekt in anderen Sektoren induzierten Einsparungen $e_{te,y,jj}^{Mind,ges,ZP,s,t}$ bzw. $e_{te,y,jj}^{Welt,Mind,ges,ZP,s,t}$ liegen nur knapp darüber. Aus diesen Entwicklungen ergibt sich zwischen 2006 und 2030 eine Steigerung der absoluten Treibhausgasemissionen in der deutschen Stahlherstellung um 4% und eine Reduktion um 9% für die deutsche Aluminiumproduktion.

Um die Spannweite der in Zukunft unter dem Einsatz energieeffizienzsteigernder Technologien erreichbaren Emissionsminderungen beziffern zu können, werden im Basisszenario die vier folgenden unterschiedlichen Verhaltensmuster der Akteure betrachtet (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.2.3):

- Der Standardfall (homo oeconomicus) stellt die Maximierung des Kapitalwerts $kw_{te,y,jj}^{ZP,s,t}$ durch den jeweiligen Akteur dar und wird für das Basisszenario durch Abbildung 7.12 wiedergegeben. Dieser Fall lässt Aussagen über die finanziellen Anreize und Auswirkungen zu, welche durch ökonomische klimapolitische Instrumente induziert werden.
- Alternativ zeigt die Maximierung der werksseitigen Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj}^{AKT,Mind,ZP,s,t}$ auf, wie hoch das Treibhausgasminderungspotenzial im Sektor der Metallerzeugung ist.
- Durch die Maximierung der direkten und indirekten nationalen Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj}^{Mind,ges,ZP,s,t}$ können die deutschlandweit im Sektor der Metallerzeugung, aber auch in allen anderen Sektoren generierten Emissionsminderungen beziffert werden.
- Die Maximierung der direkten und indirekten internationalen Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj}^{Welt,Mind,ges,ZP,s,t}$ schließt neben den Sektoren Deutsch-

⁶Wie eingangs des Abschnitts 7.3.1 beschrieben, wird bei der Evaluierung des Einflusses klimapolitischer Instrumente in Abschnitt 7.3.3 angenommen, dass diese im Szenario BAU bis zum Jahre 2014 realisierten Investitionen tatsächlich bereits realisiert wurden und somit den derzeitigen Anlagenbestand wiedergeben.

lands auch die im Ausland vermiedenen Treibhausgasemissionen ein (*domestic technology assumption*).

Die vorgestellten Verhaltensmuster wirken sich sehr unterschiedlich auf die getätigten Investitionen aus, was Abbildung 7.13 verdeutlicht. Die Abbildung zeigt, welche Investitionen getätigt würden, wenn zwischen 2006 und 2030 keine Änderungen der jeweiligen Verhaltensmuster eintreten würden.

Handeln die Akteure rational, wird ein Großteil (108 Mio. €) in die existierenden Hochöfen investiert. Neben der Ausweitung der Direkteinblasung von Kohle *HO1* werden weiterhin GETs *HO5* installiert oder eine Vorheizung der Brennstoffe im Winderhitzer *HO6* vorgenommen. Die Installation der KRG *KON1* im Konverter stellt hingegen den zweitgrößten Posten dar, gefolgt von den Investitionen in die Walzwerke, welche die Technologien Ofenautomatisierung *WA1*, Regenerativbrenner *WA2* und Wärmespeicherung *WA5* umfassen. Für alle unter der Annahme rationaler Akteure realisierten Investitionen gilt, dass die eingesparten Ausgaben für Energieträger oder die durch die zusätzliche Stromproduktion generierten Erlöse die annualisierten Kosten der jeweiligen Technologien übersteigen.

Ist die Einsparung der werksseitigen Treibhausgasemissionen oberste Prämisse, verlagern sich die getätigten Investitionen. Insgesamt werden 607 Mio. € investiert, wobei etwas mehr als die Hälfte (329 Mio. €) auf den Hochofen entfällt. Jedoch steht nicht mehr die Ausweitung der Direkteinblasung von Kohle *HO1* im Vordergrund, sondern die drei weiteren modellierten Möglichkeiten der Direkteinblasung von Reduktionsmitteln (Schweröl *HO2*, Kokereigas *HO3* bzw. Kunststoff *HO4*). Letztere erlauben einen geringeren Input an Kohlenstoff pro kg ersetztem Koks (vgl. Tabelle 7.5) und führen damit ebenfalls zu geringeren CO₂-Emissionen. Demgegenüber stehen jedoch die höheren Ausgaben für die alternativen Reduktionsmittel, da Kohle deutlich geringere spezifische Kosten aufweist (vgl. Tabelle A.4 im Anhang A.3). Aus diesem Grund wird im Falle rational handelnder Akteure kein Gebrauch von den alternativen Reduktionsmitteln gemacht. Darüber hinaus erklärt dies auch die Tatsache, dass derzeit in Deutschland fast ausschließlich Kohle zur Direkteinblasung verwendet wird (vgl. [306]). Weiterhin stellen bei der Maximierung der werksseitigen Emissionseinsparungen die Investitionen in die KRG *KON1* (122 Mio.

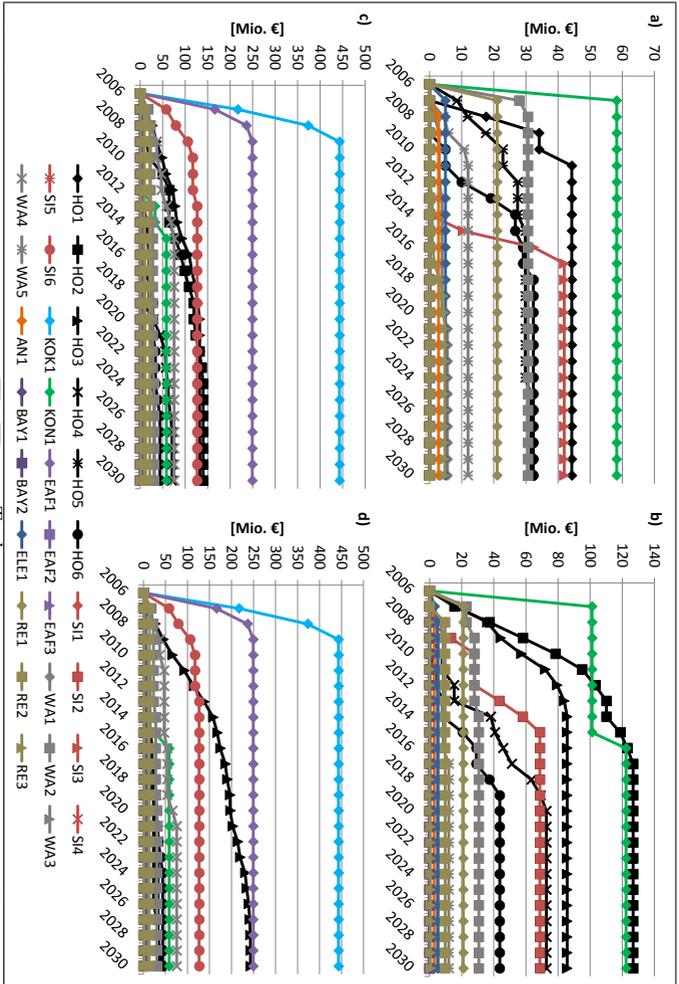


Abbildung 7.13.: Getätigte Investitionen $\sum_y \sum_s inv_{t_e,y,j}^{Tech}$ bei unterschiedlichen Verhaltensmustern im Szenario BAU (a) Akteure handeln rational, b) Akteure maximieren die direkten werkseitigen Emissionseinsparungen, c) Akteure maximieren die direkten und indirekten nationalen Emissionseinsparungen, d) Akteure maximieren die direkten und indirekten internationalen Emissionseinsparungen)

Tabelle 7.5.: Auswirkung verschiedener Möglichkeiten der Direkteinblasung von Reduktionsmitteln auf den Kohlenstoffinput

Technologie	Bezeichnung	Input Kohlenstoff
Direkteinblasung Kohle	<i>HO1</i>	1,00 kg C/kg ersetztem Koks
Direkteinblasung Öl	<i>HO2</i>	0,75 kg C/kg ersetztem Koks
Direkteinblasung Kokereigas ¹	<i>HO3</i>	0,39 kg C/kg ersetztem Koks
Direkteinblasung Kunststoff	<i>HO4</i>	0,73 kg C/kg ersetztem Koks

¹ Im Falle der Direkteinblasung von Kokereigas muss beachtet werden, dass dieses an anderen Stellen im integrierten Hüttenwerk durch Erdgas zu ersetzen ist (Energiebilanz), weshalb die Emissionseinsparung in der Regel geringer als dargestellt ausfällt.

€) sowie in die Abgasrückführung (EOS) *SI2* (69 Mio. €) bedeutende Positionen dar.

Wird die Maximierung der direkten und indirekten nationalen bzw. internationalen Emissionseinsparungen vorausgesetzt, werden mit 1.465 bzw. 1.418 Mio. € deutlich umfangreichere Investitionen getätigt. Dies liegt darin begründet, dass nun zusätzlich in Technologien investiert wird, welche lediglich Emissionen in anderen Sektoren vermeiden. So führt die KTK *KOK1* zu einer umfassenden Erhöhung der Dampferzeugung eines integrierten Hüttenwerks, was die Nutzung zusätzlichen Dampfes in der Fernwärmebereitstellung ermöglicht. Investitionen in Höhe von 443 Mio. € entfallen somit allein auf diese Technologie. Mit 419 bzw. 390 Mio. € stellen die Investitionen in den Hochofen den zweitgrößten Faktor dar, wobei verstärkt in die Direkteinblasung von Kokereigas *HO3* investiert wird. Die nun ebenfalls genutzte Schrottvorwärmung im Fingerschacht-ofen *EAF1* (249 Mio. €) geht mit deutlichen Stromeinsparungen einher, während bezüglich der Sinteranlage (127 Mio. €) eine Abkehr von der (konventionelleren) Abgasrückführung *SI2* bzw. *SI3* hin zur abschnittswisen Abgasrückführung inklusive Abhitzekessel *SI6*, welche zusätzlich die Erzeugung von Dampf ermöglicht, festzustellen ist.

Welche Technologie mit welchen direkt bzw. indirekt in anderen Sektoren induzierten Emissionsminderungen einhergeht, kann den Abbildungen 7.14 und 7.15 entnommen werden. Aus Abbildung 7.14 wird deutlich, dass unter

Einsatz der aktuellen BVTs etwa 5,0 Mio. Tonnen der in der Stahl- und Aluminiumindustrie emittierten CO₂-Äquivalente vermieden werden können, was etwa 8% der Treibhausgasemissionen (inkl. Industrie-Kraftwerken) im Basisjahr entspricht. Abzüglich der Emissionen, welche ohnehin bis 2014 unter der Annahme rational handelnder Akteure gemindert werden, ergibt dies eine Reduktion von etwa 6%. Die so ermittelten relativ geringen Treibhausgasreduktionspotenziale sprechen dafür, dass die deutsche Metallerzeugung bereits sehr effizient ist und den aktuellen Stand der Technik umfassend nutzt. Im Anbetracht ambitionierter klimapolitischer Ziele scheint daher ein weitreichender Beitrag zur Emissionsminderung durch die Metallerzeugung fraglich, zumindest mit einem gegebenen Zeithorizont von 2030.

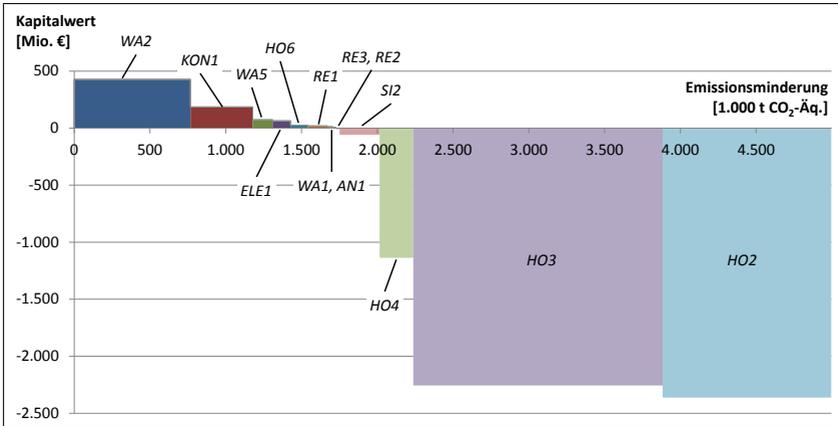


Abbildung 7.14.: Kapitalwerte $kw_{te,y,jj^{ZP},s,t}$ der Technologien te sowie deren direkt induzierte Emissionsminderung $e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{AKT,MinD}$ im Szenario BAU (Die Werte wurden über alle Anlagen y , Werke s und Jahre t aufsummiert, als Verhaltensmuster wurde die Maximierung der direkt im Werk realisierten Emissionseinsparungen gewählt)

Weiterhin wird durch Abbildung 7.14 deutlich, dass die größten Emissionsminderungen am Hochofen realisiert werden könnten, jedoch mit deutlichen zusätzlichen Ausgaben einhergehen würden. Letztere sind, wie oben bereits erwähnt, ein Resultat der im Vergleich zu Kohle teureren

alternativen Reduktionsmittel. Inwiefern klimapolitische Instrumente dazu beitragen können, dass auch im Falle rational handelnder Akteure diese im Szenario *BAU* unwirtschaftlichen Technologien implementiert werden, wird in Abschnitt 7.3.3 erörtert.

Um auch die indirekt in anderen Sektoren induzierten Emissionsminderungspotenziale beziffern zu können, zeigt Abbildung 7.15 die Minderungsbeiträge $e_{te,y,jj}^{Welt, Mind, ges}$ der einzelnen Technologien te . Es wird deutlich, dass jährlich Emissionen in Höhe von etwa 12,7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten durch die Implementierung geeigneter BVT vermieden werden können. Abzüglich der Emissionen, welche ohnehin bis 2014 unter der Annahme rational handelnder Akteure gemindert werden, verbleibt ein Potenzial von 11,5 Mio. Tonnen. Ein Vergleich mit den Reduktionspotenzialen aus Abbildung 7.14 offenbart, dass die direkt am Standort vermeidbaren Emissionen lediglich etwa ein Drittel der insgesamt (direkt und indirekt) vermeidbaren Emissionen betragen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, die Systemgrenzen eines Standorts durch die vollständige Betrachtung der Wertschöpfungskette, hier durch Anbindung eines IO-Teilmodells (vgl. Abschnitt 5.3.2), zu erweitern. Des Weiteren zeigt sich durch den Einbezug der indirekten Emissionen auch ein deutlich höherer möglicher Minderungsbeitrag seitens der Metallindustrie zur Einhaltung der klimapolitischen Ziele.

Die Direkteinblasung von Kokereigas in den Hochofen *HO3* stellt die wichtigste Technologie zur Minderung der direkten und indirekten Emissionen dar, geht jedoch wiederum mit den höchsten zusätzlichen (annualisierten) Kosten einher. Daneben existieren zahlreiche Technologien, welche ebenfalls umfassend zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen können und vergleichsweise geringere Einbußen der Wirtschaftlichkeit mit sich bringen. So können bspw. allein durch eine umfassende Nutzung der abschnittswisen Abgasrückführung inklusive Abhitzekessel *SI6* 1,8 Mio. Tonnen oder durch die Schrottvorwärmung im Fingerschachtofen *EAF1* 1,6 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart werden. Im Gegensatz zur Direkteinblasung von Kokereigas *HO3*, welche eine Reduktion des Kapitalwerts um 1.488 € pro eingesparter Tonne CO₂ bedeutet, führt die Implementierung der Technologien *SI6* und *EAF1* nur zu einer Reduktion von durchschnittlich 91 bzw. 188 € pro eingesparter Tonne CO₂.

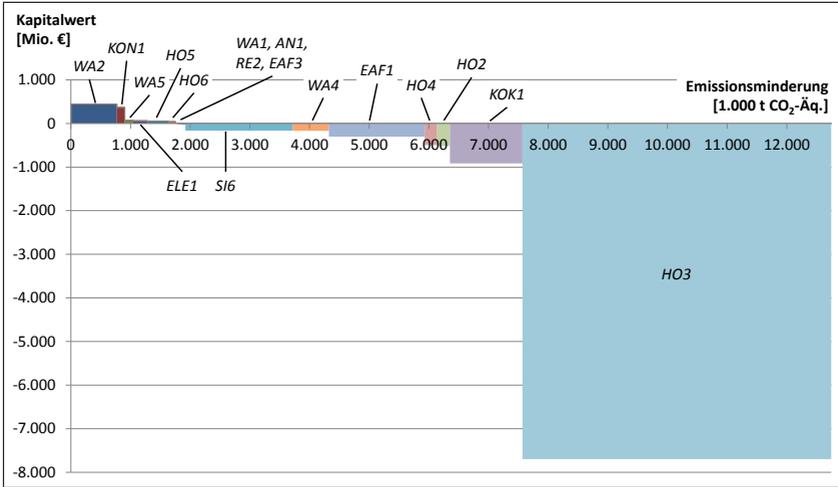


Abbildung 7.15.: Kapitalwerte $kw_{te,y,jj}^{ZP,s,t}$ der Technologien te sowie deren direkt und indirekt induzierte Emissionsminderung $e_{te,y,jj}^{Welt,Mind,ges}$ im Szenario *BAU* (Die Werte wurden über alle Anlagen y , Werke s und Jahre t aufsummiert, als Verhaltensmuster wurde die Maximierung der direkt und indirekt induzierten weltweiten Emissionsminderungen gewählt)

Die hier nicht genauer dargestellten möglichen Emissionseinsparungen im Inland $e_{te,y,jj}^{Mind,ges}$ können mit 10,3 Mio. Tonnen bzw., unter Berücksichtigung der Validierungsphase, mit 9,1 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten angegeben werden. Die hierzu verwendeten Technologien entsprechen größtenteils denen aus Abbildung 7.15 für den internationalen Fall.

Im Gegensatz zu den vielfach in Modellen verwendeten Kostenkurvenansätzen (vgl. Abschnitt 3.1.3) sind die in den Abbildungen 7.14 und 7.15 dargestellten Werte das Ergebnis werkspezifischer Betrachtungen, berücksichtigen daher den tatsächlichen aktuellen Anlagenbestand Deutschlands und gehen somit über den Detaillierungsgrad der meisten vergleichbaren Ansätze hinaus.

Um die wirtschaftliche Bedeutung der Implementierung von BVT genauer analysieren zu können, zeigt Abbildung 7.16 neben den Auswirkungen auf

die Emissionsreduktionen den Verlauf der in den betrachteten Sektoren erzielten Gewinne über dem simulierten Zeithorizont auf. Hierzu wird unterstellt, dass im Jahre 2015 eine Verhaltensänderung aller Akteure eintritt, welche sich in den Folgejahren nicht mehr rational verhalten, sondern die Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj}^{AKT, Mind, ZP, s, t}$ bzw. $e_{te,y,jj}^{Welt, Mind, ges, ZP, s, t}$ maximieren. Ein Vergleich mit den Ergebnissen, welche im Falle ausschließlich rational handelnder Akteure erzielt werden, zeigt neben den jährlich aufgelösten Reduktionspotenzialen auch etwaige jährliche Gewinneinbußen auf.

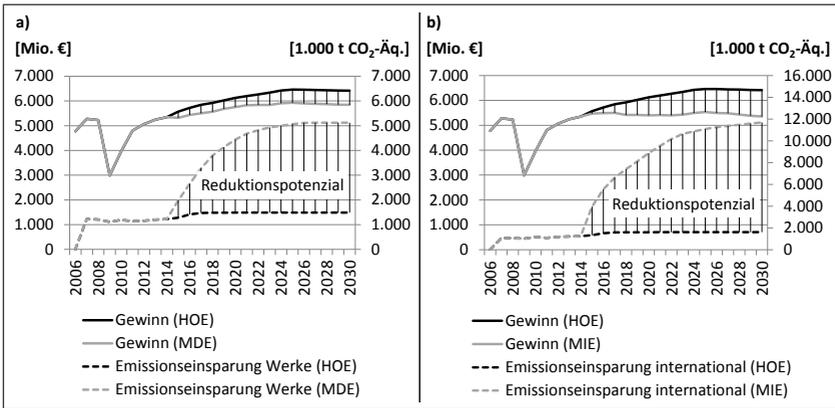


Abbildung 7.16.: Vergleich unterschiedlicher Verhaltensmuster bei der Investitionsentscheidung hinsichtlich des Gewinns $gew_{te,y,jj}^{ZP,s,t}$ und der Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj}^{AKT, Mind, ZP, s, t}$ (a) bzw. $e_{te,y,jj}^{Welt, Mind, ges, ZP, s, t}$ (b) im Szenario BAU (HOE bzw. homo oeconomicus: Akteure handeln rational; MDE: Akteure maximieren ab 2015 die direkten werksseitigen Emissionseinsparungen; MIE: Akteure maximieren ab 2015 die direkten und indirekten internationalen Emissionseinsparungen)

Stehen ab 2015 die werksseitigen Emissionseinsparungen im Fokus der Akteure, so geht aufgrund der Implementierung der Technologien aus Abbildung 7.14 der Gewinn um etwa 9% zurück, während die dadurch realisierten direkten Emissionseinsparungen um etwa das 2,4-fache steigen. Stehen hingegen ab 2015 die direkten und indirekten (weltweiten) Einsparungen im Fokus, so tritt, bedingt durch die Technologien aus Abbildung 7.15 und aggregiert über alle simulierten Werke, eine Gewinnreduktion von

etwa 17% ein. Die gesamten Emissionseinsparungen steigen dabei sogar um das 6,2-fache im Vergleich zu den Einsparungen im Falle ausschließlich rational handelnder Akteure. Aufgrund der hohen Ausgaben für alternative Reduktionsmittel erzielt jeweils ein integriertes Hüttenwerk in beiden Fällen einen negativen Gewinn, welches im Falle ausschließlich rational handelnder Akteure einen positiven Gewinn realisiert hätte. Dies verdeutlicht, dass einige der aufgezeigten Technologien aus rein wirtschaftlichen Überlegungen nicht implementiert werden und ggf. sogar zu einer unwirtschaftlichen Produktion führen können. Fraglich bleibt daher, inwiefern ökonomische klimapolitische Instrumente dennoch eine Implementierung beeinflussen können bzw. welche wirtschaftlichen Auswirkungen mit einer Änderung der derzeitigen Klimapolitik einhergehen (vgl. Abschnitt 7.3.3).

Um die Analyse des Basisszenarios und der Treibhausgasreduktionspotenziale abzuschließen, wird an dieser Stelle der Beitrag einzelner Technologien zu den indirekt in anderen Sektoren vermiedenen Emissionen genauer beleuchtet. Die Basis hierzu bilden die in Abbildung 7.15 dargestellten Technologien, welche das optimale Portfolio hinsichtlich der Maximierung der gesamten Emissionseinsparungen repräsentieren. In Tabelle 7.6 werden die zugehörigen werksseitigen Emissionsminderungen $e_{te,y,jjZP,s,t}^{AKT,Min}$ den indirekt induzierten Emissionsminderungen $\sum_{jAKT} e_{jAKT,s,t}^{Welt,ind,Min} + e_{s,t}^{ind,Sub}$ gegenübergestellt und der Anteil der werksseitigen Emissionsminderungen an den gesamten Einsparungen technologiespezifisch ausgewiesen.

Es zeigt sich, dass einige Technologien vornehmlich die werksseitigen Emissionen beeinflussen, während andere nahezu ausschließlich zu indirekten Emissionseinsparungen führen. Darüber hinaus wird deutlich, dass vereinzelte Technologien auch eine Zunahme der indirekten Emissionen bedingen. So hat die Technologie der KRG *KON1* positive Effekte auf die direkten CO₂-Emissionen, da geringere Mengen an Erdgas benötigt werden. Durch die im Vergleich zu einer vollständigen Verbrennung des Konvertergases mit anschließender Dampfnutzung geringere Dampferzeugung können jedoch wiederum weniger Treibhausgase im Fernwärmesektor eingespart werden. Letztlich zeigt sich die Bilanz der durch die KRG vermiedenen Emissionen zwar positiv, jedoch betragen die gesamten Einsparungen nur etwa 37% der werksseitigen Emissionsminderungen.

Tabelle 7.6.: Auswirkungen verschiedener Technologien auf die direkten und indirekten Emissionsminderungen im Szenario *BAU* (Die Werte wurden über alle Anlagen y , Werke s und Jahre t aufsummiert, als Verhaltensmuster wurde die Maximierung der direkt und indirekt induzierten weltweiten Emissionsminderungen gewählt)

Bezeichnung	Werksseitige Emissionsminderung [1.000 t CO ₂ -Äq.]	Indirekt induzierte Emissionsminderung [1.000 t CO ₂ -Äq.]	Anteil werksseitiger Emissionsminderungen
<i>KON1</i>	357	-225	-
<i>HO2</i>	219	-5	-
<i>AN1</i>	19	0	100%
<i>HO6</i>	109	7	94%
<i>WA2</i>	712	59	92%
<i>WA5</i>	129	11	92%
<i>WA1</i>	32	3	91%
<i>RE2</i>	49	6	90%
<i>HO3</i>	4.054	1.121	78%
<i>ELE1</i>	118	125	49%
<i>HO4</i>	94	114	45%
<i>SI6</i>	99	1.700	5%
<i>EAFF1</i>	0	1.606	0%
<i>KOK1</i>	0	1.217	0%
<i>WA4</i>	0	607	0%
<i>HO5</i>	0	353	0%
<i>EAFF3</i>	-24	79	-

Umgekehrt kann, wie im Falle des Oxy-Fuel-Brenners *EAF3*, auch eine Zunahme der werksseitigen Emissionen durch indirekt induzierte Einsparungen überkompensiert werden. Dies liegt darin begründet, dass der zusätzliche Bedarf an Erdgas zu Einsparungen im Stromverbrauch und damit zu geringeren Treibhausgasemissionen im Elektrizitätssektor führt.

Diese technologiespezifischen Betrachtungen zeigen wiederum den Vorteil des in der vorliegenden Arbeit verfolgten detaillierten Ansatzes auf, welcher neben makroökonomischen und betriebswirtschaftlichen Faktoren auch die technischen Restriktionen berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten werden nun aufbauend auf dem Basisszenario die im Abschnitt 7.2 spezifizierten Parametervariationen durchgeführt, um Aussagen hinsichtlich der klimapolitischen Zielerreichung sowie des Einflusses klimapolitischer Instrumente auf die Ergebnisse vornehmen zu können.

7.3.2. Analyse der klimapolitischen Zielerreichung

Da die Einhaltung der klimapolitischen Ziele auf makroökonomischer Ebene zu prüfen ist, gründen die folgenden Betrachtungen alleinig auf dem IO-Teilmodell, wobei der Zeithorizont auf 2050 festgelegt wird. Zur Analyse, unter welchen Bedingungen die Zielerreichung sichergestellt werden kann, werden die in Tabelle 7.2 spezifizierten Szenarios herangezogen. Somit wird neben der Energie- und Materialeffizienz auch das Exportaufkommen variiert. Während erstere Einfluss auf die pro hergestelltem Gut oder pro bereitgestellter Dienstleistung emittierten Treibhausgase nehmen (relative Größe), beeinflussen die Exporte als wesentlicher Teil der Endnachfrage das Produktionsniveau (absolute Größe).

Für jedes Szenario werden jeweils zehn verschiedene Ausprägungen betrachtet, wobei auch Kombinationen der einzelnen Szenarios in die Analyse mit einbezogen werden. Die Senkung des jährlichen Energie- bzw. Materialeinsatzes wird zwischen 1% und 10% variiert, wobei eine Steigerung der Effizienz um jährlich 10% auch als Extremszenario interpretiert werden kann. Die zugehörigen Bezeichnungen der Szenarios sind am Beispiel der Energieträger bereitstellenden Sektoren *ENE-EFF-ET_{99%}* bzw. *ENE-EFF-ET_{90%}*. Für die Exporte, welche bereits im Basisszenario ansteigen, werden jährliche Änderungsraten von +5% (*EXP_{105%}*) bis -4% (*EXP_{96%}*)

festgelegt, wobei, im Gegensatz zum Basisszenario, keine Differenzierung zwischen den Produkten erfolgt.

Da in *BAU* die klimapolitischen Ziele deutlich verfehlt werden (vgl. Abbildung 7.10), erfolgt zunächst eine Analyse, welche exogen vorgegebenen Faktoren die Treibhausgasemissionen am meisten beeinflussen. Hierzu werden in Abbildung 7.17 zunächst nur die Ausprägungen der einzelnen Szenarios betrachtet, welche den größten mindernden Einfluss auf die Emissionen haben.

Es zeigt sich, dass bei einem jährlichen Exportrückgang von 4% ab 2015 die umfassendsten Emissionsreduktionen erzielt werden. Dies ist jedoch in zweierlei Hinsicht als äußerst problematisch zu erachten. Zum einen sinkt die Bruttowertschöpfung in 2050 um 17% gegenüber 2006, da auch die privaten Konsumausgaben um 37% zurückgehen. Letztere resultieren vor allem aus dem geringeren verfügbaren Einkommen, induziert durch eine schwache Wirtschaft (Akzelerationseffekt). Zum anderen bedeutet ein Rückgang deutscher Exporte nicht zwangsläufig ein Konsumrückgang im Ausland, sondern wird ggf. durch Exportsteigerungen anderer Nationen kompensiert (*Carbon Leakage*). Eine Senkung der Exporte kann aus diesen Gründen sicherlich keine Strategie deutscher Klimapolitik darstellen. Dennoch zeigt die Bandbreite der bei einer Variation der Exporte emittierten Treibhausgase in Abbildung 7.18 die Bedeutung der Einschätzung des zukünftigen Außenhandels für die Festlegung nationaler klimapolitischer Ziele. Während bei einem Rückgang der Exporte um jährlich 4% die Treibhausgasemissionen mit 309 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten in 2050 in der Größenordnung der klimapolitischen Ziele liegen, bedeutet ein jährlicher Anstieg um 5% ein Anstieg der Emissionen auf 2.054 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente in 2050 und damit eine Überschreitung um mehr als das 7-fache.⁷

Eine geeignete Klimapolitik bei erwartetem Wirtschaftswachstum ist somit in der Entkopplung der Emissionen vom gegebenen Produktionsniveau zu suchen. Abbildung 7.17 zeigt hierzu den Einfluss der Energie- und Materialeffizienzsteigerungen in den einzelnen Sektorklassen⁸. Die größten Hebel

⁷Das Szenario *BAU* entspricht bezüglich des Umfangs der Exporte in etwa dem Szenario *EXP*_{102%}.

⁸Die vorgenommene Klassifizierung der in der deutschen IO-Tabelle enthaltenen Sektoren kann Tabelle A.3 in Anhang A.2 entnommen werden.

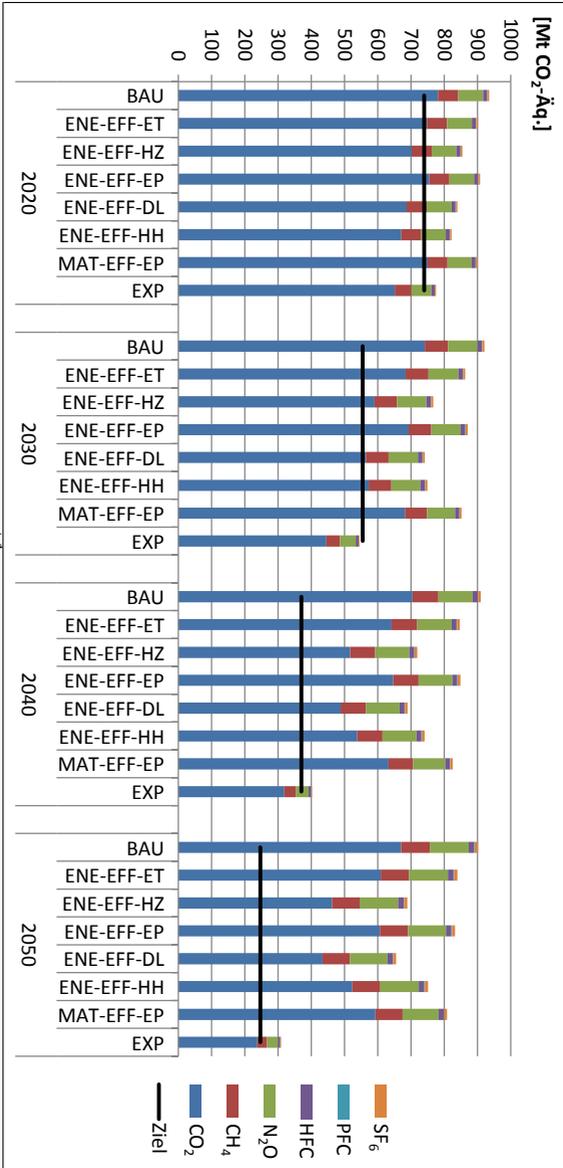


Abbildung 7.17.: Treibhausgasemissionen $\sum_{i=1}^{n+1} e_{i,b,t}$ im Szenario *BAU* sowie in den Extremszenarios *ENE-EFF-ET*_{90%}, *ENE-EFF-HZ*_{90%}, *ENE-EFF-EP*_{90%}, *ENE-EFF-DL*_{90%}, *ENE-EFF-HH*_{90%}, *MAT-EFF-EP*_{90%} und *EXP*_{96%}, verglichen mit den klimapolitischen Zielen Deutschlands

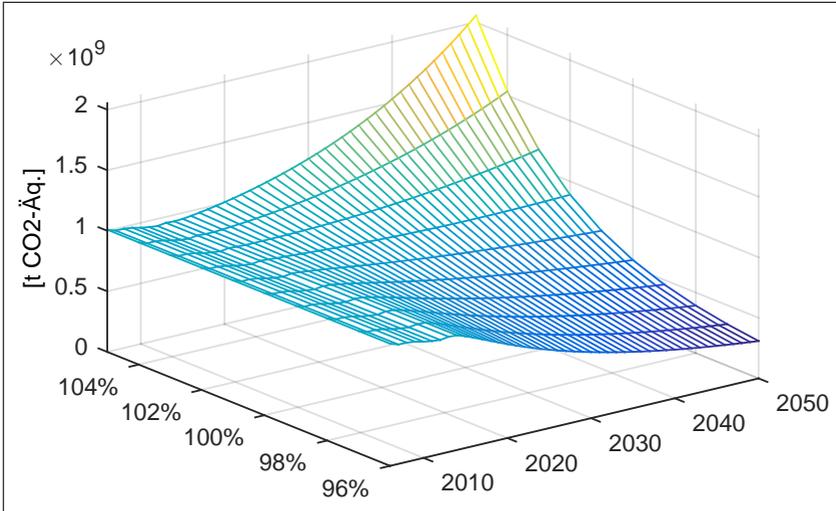


Abbildung 7.18.: Entwicklung der Treibhausgasemissionen $\sum_{i=1}^{n+1} \sum_b e_{i,b,t}$ bei Variation der Exporte in allen Sektoren ($EXP_{xx\%}$)

sind in der Energieeffizienzsteigerung bei der Halbzeugherstellung i^{HZ} , im privaten Konsum sowie in den verbleibenden Sektoren i^{DL} zu finden. Letztere stellen einen großen Hebel dar, da sie 50% der insgesamt betrachteten Sektoren repräsentieren (vgl. Tabelle A.3 im Anhang A.2), während die Halbzeugherstellung und der private Konsum (Bsp.: Heizvorgänge) mit einem hohen Energieverbrauch sowie hohen Treibhausgasemissionen einhergehen.

Weiterhin wird deutlich, dass der Fokus auf einer Dekarbonisierung von nur einer Sektorklasse bei weitem nicht ausreichend ist, da die Treibhausgasemissionen für die Szenarios $ENE-EFF-DL_{90\%}$, $ENE-EFF-HZ_{90\%}$ bzw. $ENE-EFF-HH_{90\%}$ im Jahre 2050 immer noch 655, 689 bzw. 751 Mio. t CO_2 -Äq. betragen und damit das Ziel in Höhe von 246 Mio. t deutlich übersteigen. Daher wird im Folgenden untersucht, welche Auswirkungen eine simultane Steigerung der Energieeffizienz in allen Sektoren auf die emittierten Treibhausgase hat. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 7.19.

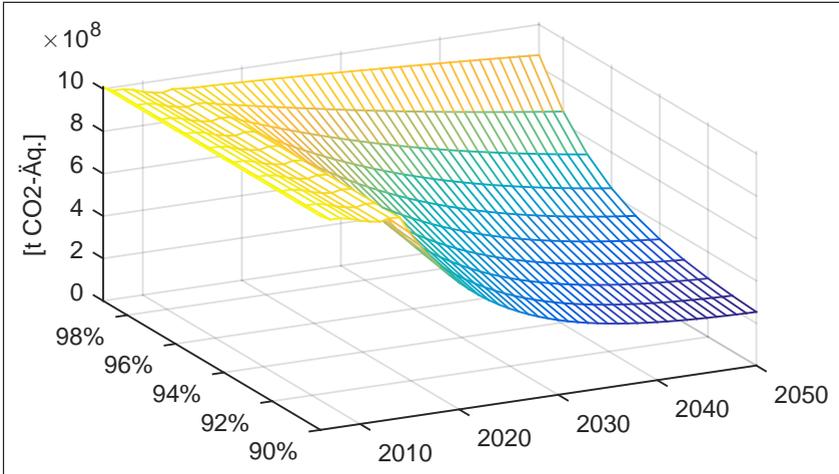


Abbildung 7.19.: Entwicklung der Treibhausgasemissionen $\sum_{i=1}^{n+1} \sum_b e_{i,b,t}$ bei Variation der Energieeffizienz in allen Sektoren (Kombination der Szenarios $ENE-EFF-ET_{xx\%}$, $ENE-EFF-HZ_{xx\%}$, $ENE-EFF-EP_{xx\%}$, $ENE-EFF-DL_{xx\%}$ und $ENE-EFF-HH_{xx\%}$)

Während eine 1%-ige jährliche Steigerung der Energieeffizienz in etwa dem Basisszenario entspricht und damit die klimapolitischen Ziele deutlich verfehlt, zeigt eine 5%-ige Steigerung bereits einen Rückgang der Emissionen auf 368 Mio. t $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ in 2050 und eine Steigerung um 10% einen Rückgang auf 253 Mio. t, wodurch die gesteckten Ziele nahezu erreicht werden. Eine Steigerung der Energieeffizienz im Sinne eines Rückgangs der modellierten Koeffizienten $\widehat{\Delta}_{c_{iET},j,t}$ kann dabei nicht nur als Reduktion des gesamten Energieeinsatzes verstanden werden, sondern spiegelt auch die Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare wider. Dies liegt darin begründet, dass erneuerbare Energien wie Wind oder Sonne keine direkte Entsprechung in der IO-Tabelle finden, wodurch deren Energieinput auch nicht in der Energieträgermatrix ENT_t enthalten ist.

Die durch die Kombination der Szenarios $ENE-EFF-ET_{90\%}$, $ENE-EFF-HZ_{90\%}$, $ENE-EFF-EP_{90\%}$, $ENE-EFF-DL_{90\%}$ und $ENE-EFF-HH_{90\%}$ beschriebene umfassende Dekarbonisierung der deutschen Volkswirtschaft

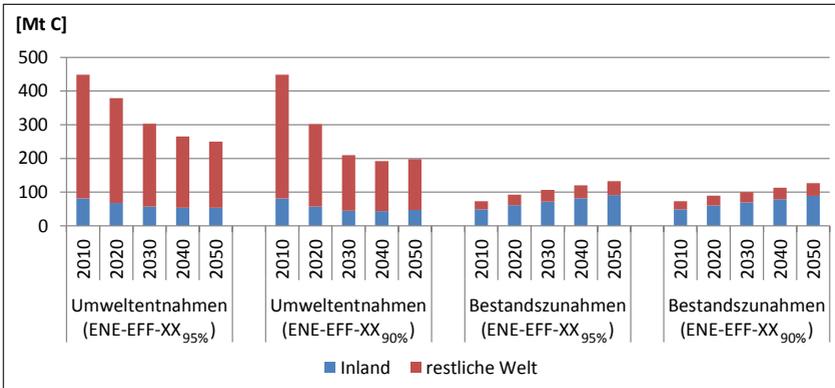


Abbildung 7.20.: Entwicklung der Umweltentnahmen $\sum_{j=1}^n cw_{j,t}^{UMW}$ bzw. $\sum_{j=1}^n cw_{j,t}^{UMW,Welt}$ und Bestandszunahmen $\sum_{i=1}^n cf_{i,t}^{BES} - \sum_{j=1}^n cw_{j,t}^{BES}$ bzw. $\sum_{i=1}^n cf_{i,t}^{BES,Welt} - \sum_{j=1}^n cw_{j,t}^{BES,Welt}$ an Kohlenstoff in der Szenariokombination $ENE-EFF-ET_{xx\%}$, $ENE-EFF-HZ_{xx\%}$, $ENE-EFF-EP_{xx\%}$, $ENE-EFF-DL_{xx\%}$ und $ENE-EFF-HH_{xx\%}$

bedeutet neben dem Rückgang der inländischen Treibhausgasemissionen um 75% zwischen 2006 und 2050 weiterhin einen Rückgang der weltweit generierten Emissionen $\sum_b e_{b,t}^{THG,Welt}$ um 74% auf 345 Mio. t CO₂-Äq. Die Entwicklung des aus der Umwelt entnommenen sowie des im Bestand gebundenen Kohlenstoffs ist für den Fall der 10%-igen, aber auch für den Fall der 5%-igen jährlichen Energieeffizienzsteigerung in Abbildung 7.20 dargestellt.

Die insgesamt im In- und Ausland generierten Umweltentnahmen an Kohlenstoff gehen zwischen 2006 und 2050 um 48% im Falle einer 5%-igen Steigerung der Energieeffizienz und um 59% im Falle einer 10%-igen Steigerung zurück und sinken damit weniger stark als die Treibhausgasemissionen. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass ein nicht unerheblicher Teil des Kohlenstoffs chemisch in den Zwischen- und Endprodukten gebunden wird (vgl. Abbildung 7.11 in Abschnitt 7.3.1) und nicht durch Energieeffizienzmaßnahmen adressiert werden kann. Der Anstieg der Bestandszunahmen um 57 bzw. 50%, induziert durch das höhere Produktionsniveau, verdeutlicht diesen Zusammenhang. Eine Steigerung der Energieeffizienz allein

kann somit nicht die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen aufheben. Wird neben der Energieeffizienz auch die Materialeffizienz $MAT-EFF-EP_{90\%}$ um jährlich 10% gesteigert, so ist eine Reduktion der generierten Umweltentnahmen um immerhin 67% möglich. Diese Größenordnung erscheint jedoch äußerst unrealistisch, da eine jährliche 10%-ige Zunahme der Materialeffizienz für das Jahr 2050 bedeuten würde, dass nahezu keine Halbzeuge mehr für die Fertigung von Endprodukten vonnöten wären bzw. diese durch erneuerbare Materialien ersetzt werden könnten.

Fraglich ist weiterhin, inwieweit eine Steigerung der Energieeffizienz um jährlich 10% bzw. eine Substitution fossiler Energien durch erneuerbare von jährlich 10% möglich ist, um in die Nähe der auferlegten klimapolitischen Ziele zu kommen. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass etwaige Effizienzsteigerungen hinsichtlich der CH_4 -, N_2O -, HFC-, PFC- und SF_6 -Emissionen außer Acht gelassen wurden, welche in 2006 zwar nur 12%, in 2050 bei einer jährlichen Energieeffizienzsteigerung von 10% jedoch insgesamt 83% aller Treibhausgasemissionen repräsentieren.

Insgesamt gilt es somit einen Reduktionspfad zu finden, welcher allen Treibhausgasen und Sektoren gleichermaßen Rechnung trägt. Dies ist beispielhaft für den Fall konstanter Exporte in Abbildung 7.21 aufgezeigt. Während in den meisten Sektoren von jährlichen Energieeffizienzsteigerungen in Höhe von 5% ausgegangen wird, wird für die vornehmlich energieintensive Halbzeugherstellung eine Reduktion von 2% unterstellt. Letztere trägt der Tatsache Rechnung, dass in der Metallindustrie als wichtigster Vertreter dieser Sektoren bis zum Jahre 2030 keine umfassenden Emissionsreduktionen zu erwarten sind (vgl. Abschnitt 7.3.1) und ein Großteil der CO_2 -Emissionen prozessbedingt, bspw. durch die Nutzung von Kohlenstoff als Reduktionsmittel, entsteht. Weiterhin wird die nahezu vollständige Vermeidung aller weiteren Treibhausgase vorausgesetzt (Reduktion um 94%).

Im hier dargestellten Fall müsste somit ein großer Teil der Reduktionen in der Landwirtschaft ($i = 1$) erzielt werden, da diese in 2050 66% der CH_4 - und 68% der N_2O -Emissionen bedingt. Nehmen hingegen die Exporte zu, sind in allen Sektoren höhere jährliche Effizienzsteigerungen notwendig. Dies zeigt wiederum den großen Einfluss des zukünftigen Außenhandels auf das Erreichen der ambitionierten Minderungsziele und stellt die Sinn-

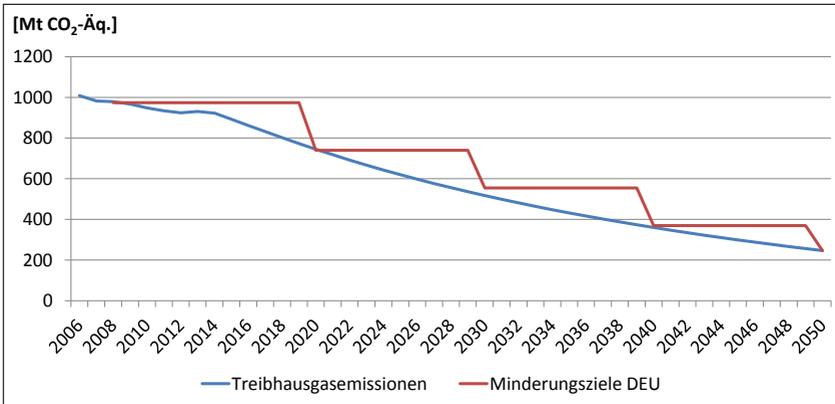


Abbildung 7.21.: Entwicklung der Treibhausgasemissionen $\sum_{i=1}^{n+1} \sum_b e_{i,b,t}$ bei Kombination der Szenarios $EXP_{100\%}$, $ENE-EFF-ET_{95\%}$, $ENE-EFF-HZ_{98\%}$, $ENE-EFF-EP_{95\%}$, $ENE-EFF-DL_{95\%}$ sowie $ENE-EFF-HH_{95\%}$ und bei einer Reduktion der Treibhausgase CH_4 , N_2O , HFC, PFC sowie SF_6 um 94%.

haftigkeit von allein auf nationaler Ebene definierten Zielen bzw. von unilateral betriebenen Klimapolitiken in Frage.

Unabhängig von den Annahmen über die zukünftigen gesamtwirtschaftlichen Entwicklungen erscheint es notwendig, die technischen und wirtschaftlichen Minderungspotenziale in den einzelnen Sektoren sowie die Voraussetzungen, unter denen diese genutzt werden, zu beziffern. Nur so können realistische Effizienzziele formuliert und klimapolitische Instrumente derart angepasst werden, dass eine faire Lastenverteilung zwischen den Sektoren ermöglicht wird. Im folgenden Abschnitt wird dies stellvertretend für die Metallerzeugung analysiert.

7.3.3. Analyse der Auswirkungen klimapolitischer Instrumente

Die drei zentralen ökonomischen klimapolitischen Instrumente (Zertifikatehandel, Ökosteuer und EEG-Umlage) werden sowohl im IO-Teilmodell

als auch im aktorsbasierten Teilmodell detailliert modelliert, wobei nur in letzterem deren Auswirkungen auf das Investitionsverhalten sowie die Wirtschaftlichkeit einzelner Betriebe analysiert werden können. Diese im Folgenden vorgenommene Analyse gründet auf den in Tabelle 7.3 spezifizierten Szenarios, für die wiederum jeweils zehn verschiedene Ausprägungen betrachtet werden. Die Verschärfungen der klimapolitischen Instrumente für energieintensive Industrien werden zwischen 90% und 0% variiert, wobei 0% mit einer vollständigen Aufhebung der Entlastungstatbestände gleichzusetzen ist. Die Preise für Emissionsberechtigungen werden zwischen $p_{t=2030}^{CO_2} = 50 \frac{EUR}{t CO_2 - \dot{A}q.}$ und $500 \frac{EUR}{t CO_2 - \dot{A}q.}$ variiert, während die Anhebung der Ökosteuern sowie der EEG-Umlage auf 150% bis 600% im Jahre 2030 erfolgt. Damit werden sowohl moderate Änderungen der Klimapolitik wie auch einige Extremszenarios betrachtet, um den größtmöglichen Einfluss klimapolitischer Instrumente beziffern zu können. Da die folgenden Betrachtungen vornehmlich auf dem aktorsbasierten Teilmodell beruhen, wird der Zeithorizont auf 2030 festgelegt.

Ähnlich zum vorherigen Abschnitt wird der Fokus zunächst auf die Ausprägungen der einzelnen Szenarios gelegt, welche im Sinne eines Extremszenarios den größten mindernden Einfluss auf die Emissionen aufweisen. Hierzu zeigt Abbildung 7.22 in Analogie zu Abbildung 7.12 die Entwicklung der einzelnen Kostenpositionen $k_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ sowie der Erlöse $erl_{pos,te,y,jj}^{ZP,s,t}$ in der Metallindustrie aggregiert über alle simulierten Werke s , falls die Entlastungstatbestände der vorhandenen klimapolitischen Instrumente bis zum Jahre 2020 vollständig aufgehoben werden. Weiterhin werden auch der resultierende Gewinn $gew_{te,y,jj}^{ZP,s,t}$ sowie die jeweiligen durch die Implementierung von BVT generierten Emissionsminderungen $e_{te,y,jj}^{AKT, Mind}^{ZP,s,t}$, $e_{te,y,jj}^{Mind, ges}^{ZP,s,t}$ bzw. $e_{te,y,jj}^{Welt, Mind, ges}^{ZP,s,t}$ dargestellt.

Im Gegensatz zum Szenario *BAU* (vgl. Abbildung 7.12) zeigt sich nun ein deutlicher Anstieg der klimabezogenen Ausgaben, sodass ein Gewinnrückgang von etwa 39% bis 2030 im Vergleich zum Basisjahr und von 55% im Vergleich zum Szenario *BAU* eintritt. Insgesamt fallen in 2030 etwa 1,9 Mrd. € für Emissionsberechtigungen, 0,7 Mrd. € für Strom- und Energiesteuern sowie 2,1 Mrd. € für die EEG-Umlage an, wodurch die klimabezogenen Ausgaben in der Größenordnung des im Szenario *BAU*

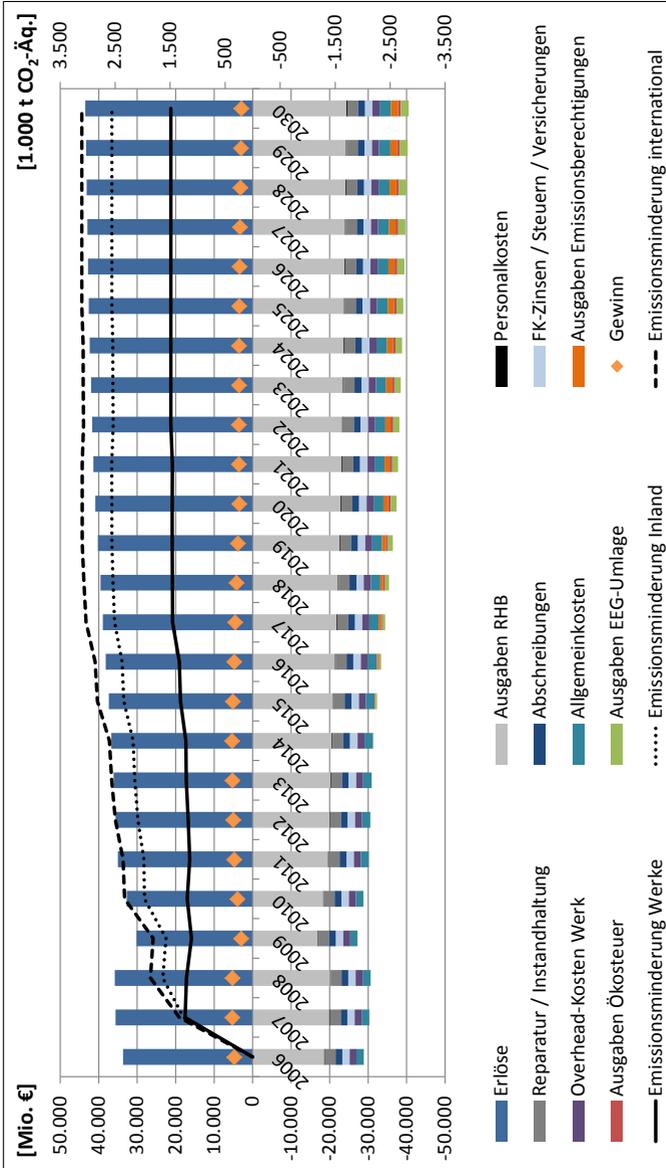


Abbildung 7.22.: Kosten, Erlöse und Emissionseinsparungen aller Werke *s* bei Kombination der Szenarios *RES-TEHG_{0%}*, *RES-ÖKO_{0%}* und *RES-EEG_{0%}*

erzielbaren Gewinns von etwa 6,4 Mrd. € liegen.⁹ Weniger restriktive Klimapolitiken, d.h. eine nur teilweise Aufhebung der Entlastungstatbestände, gehen mit entsprechend geringeren negativen Auswirkungen auf den in der deutschen Metallindustrie erzielbaren Gewinn einher, wie Abbildung 7.23 zeigt. Die Spannweite der klimabezogenen Ausgaben liegt zwischen 4,6 Mrd. € für die Kombination der Szenarios $RES-TEHG_{0\%}$, $RES-ÖKO_{0\%}$ und $RES-EEG_{0\%}$ sowie 0,3 Mrd. € für das Szenario BAU .

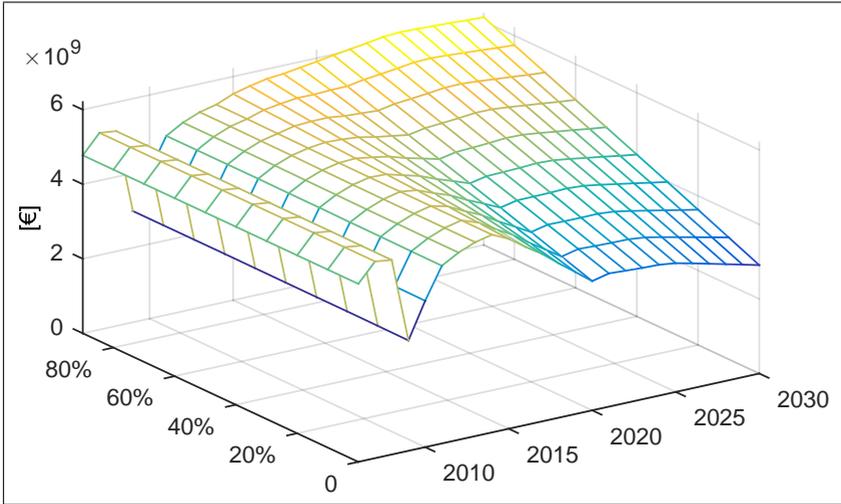


Abbildung 7.23.: Entwicklung des Gewinns $gew_{te,y,jj}^{zP,s,t}$ aggregiert über alle Werke s bei Variation der Entlastungstatbestände klimapolitischer Instrumente (Kombination der Szenarios $RES-TEHG_{xx\%}$, $RES-ÖKO_{xx\%}$ und $RES-EEG_{xx\%}$)

Allein den aggregierten Ergebnissen zufolge könnte eine Aufhebung der Entlastungstatbestände als sinnvoll erachtet werden, da positive Gewinne realisierbar erscheinen und somit die Gefahr des *Carbon Leakage* als eher gering interpretiert werden könnte. Zum einen müssen hierbei jedoch die einzelnen Werke detaillierter betrachtet werden, da modellseitig insgesamt bis zu 15 der 48 simulierten Werke in 2030 einen durch die restriktiveren

⁹Welche Verfahrensrouten wie stark von den klimapolitischen Instrumenten betroffen sind, zeigt Abbildung 7.29 im weiteren Verlauf dieses Abschnitts.

klimapolitischen Instrumente induzierten negativen Gewinn ausweisen. Zum anderen ist neben den Auswirkungen auf den Gewinn auch der positive Effekt klimapolitischer Instrumente auf die Emissionseinsparungen zu bewerten. Im weiteren Verlauf des Abschnitts wird daher, um dem ersten Punkt Rechnung zu tragen, eine differenziertere Bewertung hinsichtlich der vier modellierten Verfahrensrouten vorgenommen. Zunächst werden jedoch die Auswirkungen restriktiver Klimapolitiken auf die induzierten Emissionsminderungen evaluiert.

Ein Vergleich der Abbildungen 7.12 und 7.22 verdeutlicht, dass die werksseitigen Emissionsminderungen nicht durch die Aufhebung der Entlastungstatbestände beeinflusst werden, jedoch die insgesamt im Inland bzw. weltweit vermiedenen Emissionen etwa 69% bzw. 92% höher als im Basisszenario liegen. Dies liegt in einem geänderten Investitionsverhalten begründet, welches in Abbildung 7.24 dargestellt ist.

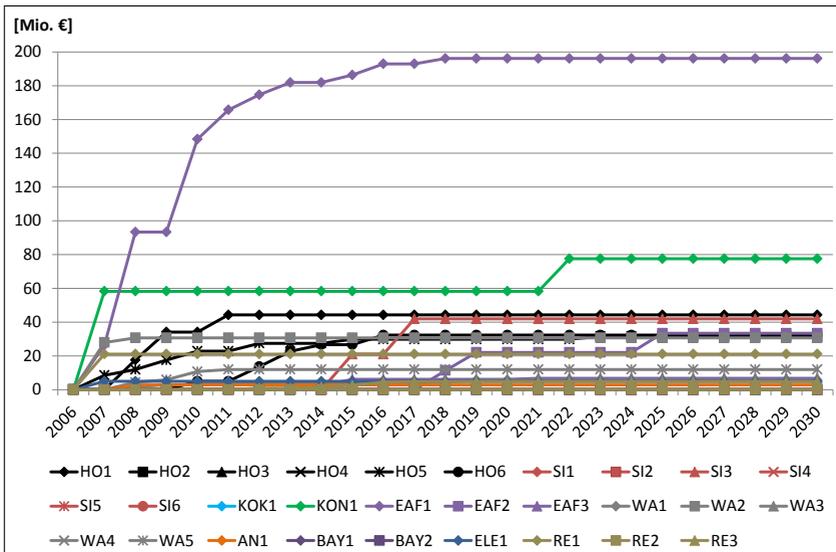


Abbildung 7.24.: Getätigte Investitionen $\sum_y \sum_s inv_{te,y,jj}^{Tech,ZP,s,t}$ bei Kombination der Szenarios $RES-TEHG_{0\%}$, $RES-ÖKO_{0\%}$ und $RES-EEG_{0\%}$

Bei einem Vergleich mit der in Abbildung 7.13 a für das Szenario *BAU* aufgezeigten Technologiediffusion fällt auf, dass vor allem die Schrottvorwärmung im Fingerschachtofen *EAF1* in deutlich größerem Umfang implementiert wird. Dies kann auf die von den Akteuren antizipierte Erhöhung der EEG-Umlage zurückgeführt werden, die vor allem zu Investitionen in stromsparende Technologien führt. Gemessen an den im Abschnitt 7.3.1 identifizierten Reduktionspotenzialen von 5,0 Mio. Tonnen (Metallsektor) bzw. 12,7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten (alle Sektoren) sind die durch eine Aufhebung der Entlastungstatbestände realisierten Emissionsminderungen von 1,5 Mio. bzw. 3,1 Mio. Tonnen als eher gering einzuschätzen, zumal ein Großteil der realisierten Investitionen auch ohne eine restriktivere Klimapolitik wirtschaftlich sinnvoll wäre (vgl. Abbildung 7.12).

Da die bestehenden Reduktionspotenziale auch bei restriktiveren Klimapolitiken weitgehend ungenutzt bleiben, stellt sich die Frage, welche zusätzlichen ökonomischen Anreize notwendig sind, um die Implementierung effizienzsteigernder Technologien zu beeinflussen. Zur Beantwortung dieser Frage werden im Folgenden die Energie- und Stromsteuersätze, die EEG-Umlage sowie die Preise für Emissionsberechtigungen variiert. Der größte Emissionsmindernde Einfluss zeigt sich dabei für sehr hohe Zertifikatspreise. Abbildung 7.25 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Zertifikatspreis und den induzierten Treibhausgasemissionseinsparungen.

Während bis zu einem Zertifikatspreis von 150 € im Jahr 2030 das Investitionsverhalten über die Jahre größtenteils unverändert gegenüber dem Basisszenario ist, folgen bei noch höheren Zertifikatspreisen die Investitionen immer stärker dem Pfad, welcher durch die Maximierung der werksseitigen Emissionseinsparungen $e_{te,y,jj}^{AKT, Mind ZP,s,t}$ (vgl. Abbildung 7.13 b) beschrieben wird. Abbildung 7.26 gibt diese über den Simulationszeitraum kumulierten Investitionen für verschiedene Zertifikatspreise wieder.

Es wird deutlich, dass die Direkteinblasung von Schweröl *HO2* bzw. Kokeigas *HO3* in den Hochofen mit steigendem Zertifikatspreis umfangreicher genutzt wird, was zu werksseitigen Emissionseinsparungen von etwa 4,7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten im Szenario *CO2-PR₅₀₀* führt. Da die Verwendung dieser alternativen Reduktionsmittel bereits in Abschnitt 7.3.1 als wichtigste BVT identifiziert wurde (vgl. Abbildung 7.14), entsprechen

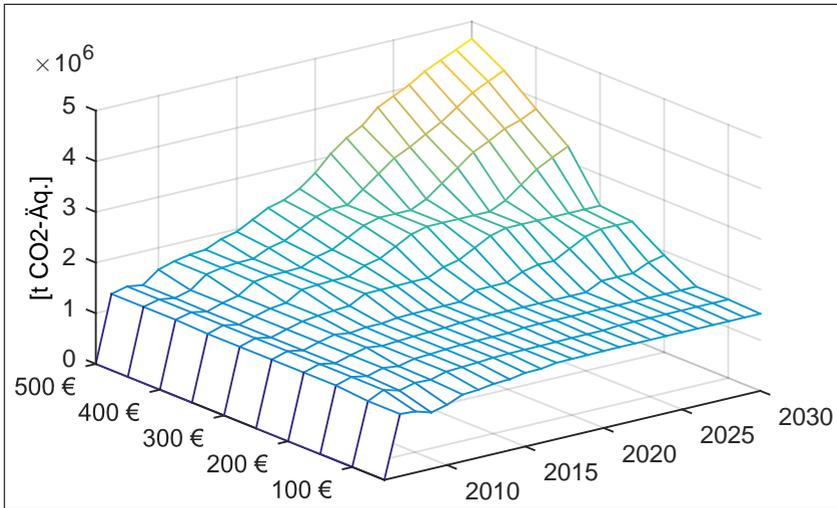


Abbildung 7.25.: Entwicklung der Treibhausgasemissionsminderungen $e_{te,y,jj}^{AKT, Mind ZP,s,t}$ aller Werke bei Variation des Zertifikatspreises (Szenario CO_2-PR_{xx} ; Der im Diagramm angegebene Preis bezieht sich auf das Jahr 2030)

die im Szenario CO_2-PR_{500} eingesparten Emissionen nahezu dem Idealfall der maximalen werksseitigen Emissionseinsparungen von 5,0 Mio. t CO_2 -Äq. Neben den Investitionen in den Hochofen wird bei steigenden Zertifikatspreisen ebenfalls die Schrottvorwärmung im Fingerschachtofen $EAF1$ umfassend implementiert. Letzteres ist auf den erhöhten Preis für Elektrizität zurückzuführen, der im Szenario CO_2-PR_{500} bis zum Jahre 2030 um 170% gegenüber dem Basisjahr steigt. Die Preissteigerung liegt vor allem in den hohen Ausgaben des Elektrizitätssektors i^{El} für Emissionsberechtigungen begründet, welcher ab 2013 von der kostenlosen Zuteilung ausgenommen ist. Diese Ausführungen zeigen wiederum die Notwendigkeit auf, auch intersektorale Abhängigkeiten abzubilden und die Evaluierung klimapolitischer Instrumente in konsistente gesamtwirtschaftliche Rahmenbedingungen einzubinden. Abbildung 7.27 stellt die zusätzlichen indirekt induzierten Emissionsminderungen kumuliert über den betrachteten Zeithorizont dar.

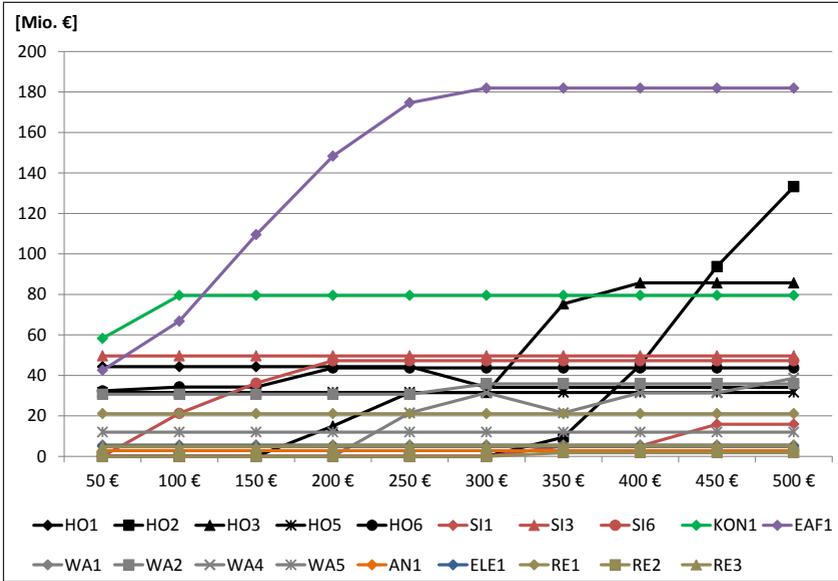


Abbildung 7.26.: Bis zum Jahr 2030 getätigte kumulierte Investitionen $\sum_y \sum_s \sum_t inv_{te,y,jj}^{Tech ZP,s,t}$ bei verschiedenen Zertifikatspreisen (Szenario CO_2-PR_{xx})

Während die werksseitigen Emissionsminderungen für das Jahr 2030 um 213% über denen des Basisszenarios liegen, zeigt sich für die im Inland bzw. international eingesparten Treibhausgasemissionen ein Anstieg von 357% bzw. 361% gegenüber *BAU*. Die großen zusätzlichen indirekten Emissionseinsparungen gehen dabei vor allem auf die Schrottvorwärmung im Fingerschachtofen *EAF1* zurück, welche den Stromverbrauch der Elektrolichtbogenöfen deutlich senkt (vgl. hierzu auch Tabelle 7.6). Mit den 7,5 Mio. Tonnen weltweit eingesparten CO_2 -Äquivalenten liegen die insgesamt im Szenario CO_2-PR_{500} vermiedenen Emissionen aber immer noch merklich unter dem identifizierten Potenzial von 12,7 Mio. Tonnen. Hier zeigt sich, dass durch den Zertifikatehandel kein direkter Anreiz besteht, um Emissionen auch in vor- oder nachgelagerten Sektoren einzusparen. Steigen ebenfalls die Preise der Vorprodukte durch den Zertifikatehandel, so besteht zumindest ein indirekter Anreiz, dieses Vorprodukt in geringerem

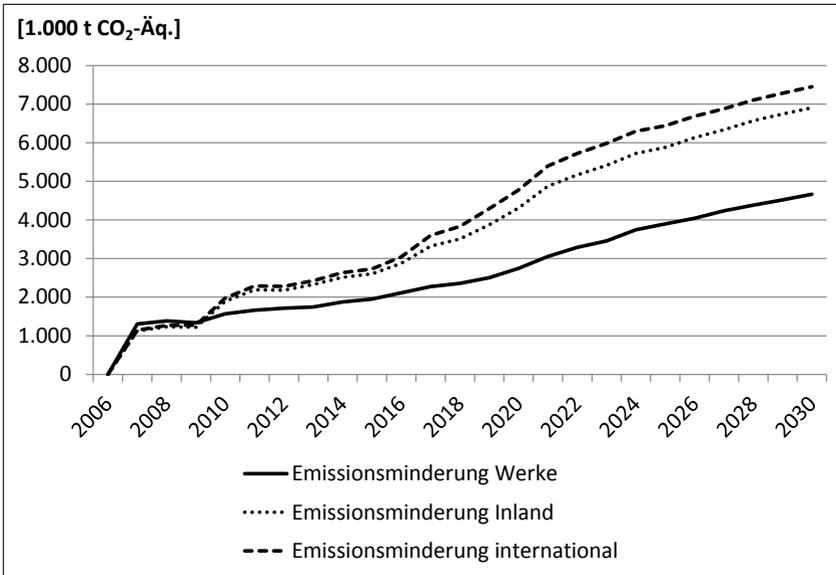


Abbildung 7.27.: Durch die Implementierung von BVT generierte Emissionsminderungen $e_{te,y,jj}^{AKT, Mind, ZP, s, t}$, $e_{te,y,jj}^{Mind, ges, ZP, s, t}$ bzw. $e_{te,y,jj}^{Welt, Mind, ges, ZP, s, t}$ im Szenario CO_2-PR_{500}

Umfang zu beziehen (vgl. Implementierung *EAF1*). Die zusätzliche Erzeugung von veräußerbaren Nebenprodukten wie bspw. Strom oder Dampf, welche durch Substitutionseffekte den Treibhausgasausstoß in anderen Sektoren mindern können, bleibt hiervon jedoch unbeeinflusst.

Während hohe Zertifikatspreise den größten Einfluss auf die Emissionsminderungen haben und somit im Vergleich zu den anderen untersuchten Instrumenten die beste Lenkungswirkung zeigen, stellt sich die Frage, inwiefern die Wirtschaftlichkeit einzelner Werke durch die höheren Ausgaben für Zertifikate beeinträchtigt wird. Hierzu stellt Abbildung 7.28 die Entwicklung des Gewinns in Abhängigkeit des Zertifikatspreises dar, sowohl für den Fall der Beibehaltung aktueller Zuteilungsregeln als auch für den Fall der vollständigen Aufhebung vorhandener Entlastungstatbestände.

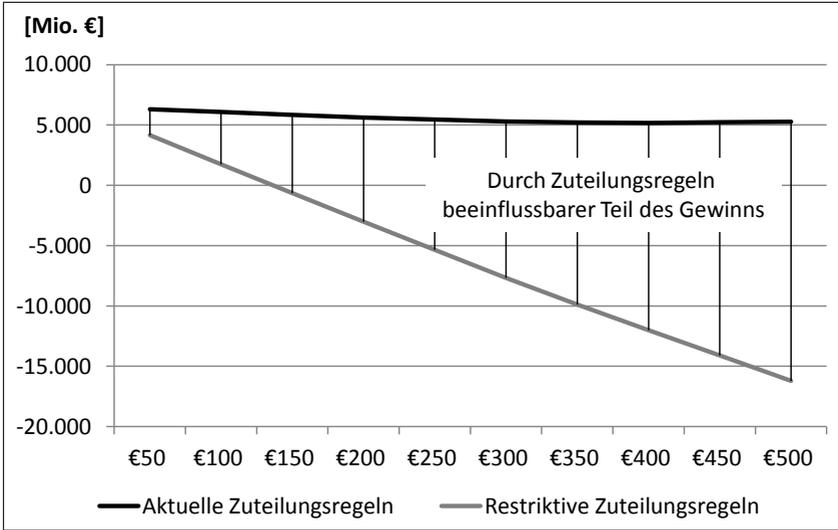


Abbildung 7.28.: Entwicklung des Gewinns $gew_{te,y,jj^{ZP},s,t}$ im Jahre $t = 2030$ aggregiert über alle Werke s bei Variation des Zertifikatspreises und der Zuteilungsregeln (Szenario $CO2-PR_{xx}$ bzw. Kombination aus $CO2-PR_{xx}$ und $RES-TEHG_0\%$; Der im Diagramm angegebene Preis bezieht sich auf das Jahr 2030)

Die getätigten Investitionen sind in beiden Fällen nahezu identisch, da es bei der Berechnung des Kapitalwerts keinen Unterschied macht, ob zusätzliche Gewinne durch den Verkauf von kostenlos zugewiesenen Zertifikaten realisiert werden können oder ob, im Falle einer Aufhebung der kostenlosen Zuteilung, Kosten für den Kauf von Zertifikaten vermieden werden können. Der über alle Werke aufsummierte Gewinn, welcher im Falle der kostenlosen Zuteilung bei knapp über 5,0 Mrd. € liegt, nimmt jedoch mit steigendem Zertifikatspreis rapide ab, insofern alle Zertifikate käuflich erworben werden müssen. Bei Zertifikatspreisen von 150 € und höher in 2030 lässt sich sogar ein im Durchschnitt negativer Gewinn feststellen. Während bei Zertifikatspreisen von 500 € in 2030 die meisten Stahl- und Primäraluminiumproduzenten Verluste ausweisen, werden die Sekundäraluminiumproduzenten nicht negativ beeinflusst, da die Emissio-

nen der Refiner und Remelter in der Regel unterhalb der Emissionsschwelle von 25.000 t CO₂-Äq. pro Jahr liegen und damit nicht unter das TEHG fallen [285].

Die in Abbildung 7.28 dargestellte Gewinnschere stellt auch ein Indiz für die in der Metallerzeugung generierten Windfall-Profits, d.h. für den Gewinn, welcher durch den Verkauf kostenlos zugeteilter Zertifikate erzielt wird, dar. Während in der Aluminiumindustrie im Durchschnitt keine Windfall-Profits anfallen, betragen diese in der Eisen- und Stahlindustrie etwa 70 Mio. € bei einem Zertifikatspreis von 50 € in 2030 und 960 Mio. € im Extremszenario *CO₂-PR₅₀₀*.¹⁰

Für realistischere Zertifikatspreisniveaus - im Szenario *BAU* beträgt der Preis 30 € in 2030 - sind ebenfalls negative Auswirkungen bei einer Aufhebung der Entlastungstatbestände festzustellen, wenn auch in deutlich geringerem Umfang. Ähnliches gilt für die Ökosteuern und die EEG-Umlage, wobei hier der Anreiz zur Emissionsminderung selbst in den betrachteten Extremszenarios mit höheren Steuersätzen deutlich geringer ausfällt als bei einer Variation der Zertifikatspreise. Den Einfluss moderater und ambitionierter Änderungen einzelner klimapolitischer Instrumente auf die Emissionsminderungen und die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahrensrouten zeigt zusammenfassend Abbildung 7.29.

Die Variation der Entlastungstatbestände im TEHG sowie der Zertifikatspreise, welche bereits eingehend diskutiert wurden, beeinflussen die Primärstahlproduktion im integrierten Hüttenwerk (Abbildung 7.29 a) deutlich stärker als eine Variation der anderen ökonomischen Instrumente. Die Aufhebung der Entlastungstatbestände für die Strom- und Energiesteuern bzw. die EEG-Umlage schmälern den jährlichen Gewinn um 4% bzw. 1% gegenüber *BAU*, die zusätzliche Erhöhung der zugehörigen Steuersätze auf 600% in 2030 sorgen für einen weiteren Rückgang um 14% bzw. 2%. Nennenswerte Emissionsminderungen sind bei den letztgenannten Instrumenten jedoch nicht zu verzeichnen.

Hinsichtlich der Sekundärstahlproduktion (Abbildung 7.29 b) zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hier wirkt sich vor allem eine höhere EEG-Umlage

¹⁰Bei der Berechnung der Windfall-Profits ist zu beachten, dass auch die für das Kraftwerk benötigten Zertifikate mit einberechnet wurden, ohne die die Windfall-Profits deutlich höher ausfallen würden (vgl. Gleichung 5.39 in Abschnitt 5.2.2).

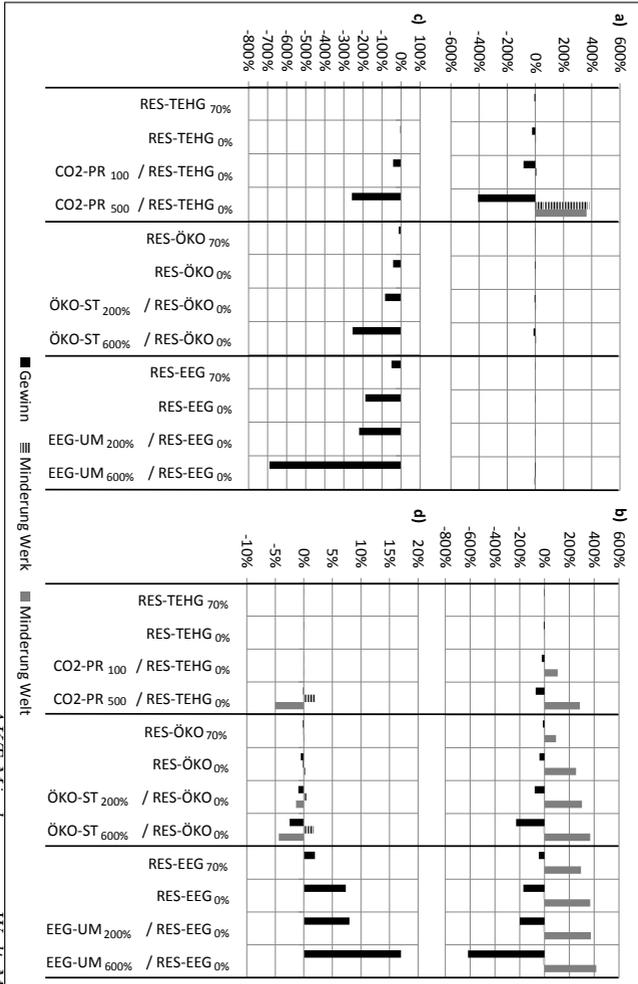


Abbildung 7.29.: Gewinn $gew_{te,g,j,zp,s,t}$ und Emissionsminderungen $et_{g,j,zp,s,t}$ bzw. $et_{te,g,j,zp,s,t}$ der Verfahrensrouten a) Primärstahl-, b) Sekundärstahl-, c) Primäraluminium- und d) Sekundäraluminiumproduktion, induziert durch verschiedene klimapolitische Instrumente (Werte sind über alle Werke s aufsummiert, beziehen sich auf das Jahr 2030 und geben die Abweichung zum Szenario BAU wieder)

bzw. eine Abkehr von den Entlastungstatbeständen im EEG sehr stark auf den jährlich realisierten Gewinn aus, welcher in der Szenariokombination $EEG-UM_{600\%} / RES-EEG_{0\%}$ mit -2,6 Mrd. €, bedingt durch den hohen Stromverbrauch der Elektrolichtbogenöfen und durch die Ausgaben für die EEG-Umlage in Höhe von 3,2 Mrd. €, um 618% niedriger ausfällt als im Basisszenario. Für die Extremszenarios bezüglich Zertifikatehandel und Ökosteuern lassen sich ebenfalls deutliche Gewinnreduktionen von 72% bzw. 229% feststellen. Demgegenüber stehen jedoch für nahezu alle moderaten und ambitionierten Änderungen der Klimapolitik zusätzliche indirekte Emissionsminderungen im Vergleich zum Basisszenario. Die umfassende Implementierung der beiden Technologien zur Schrottvorwärmung $EAF1$ und $EAF2$ sorgt für Stromeinsparungen und damit für die Vermeidung von bis zu 1,6 Mio. Tonnen CO_2 -Äquivalenten im Elektrizitätssektor in der Szenariokombination $EEG-UM_{600\%} / RES-EEG_{0\%}$.

In der Primäraluminiumproduktion (Abbildung 7.29 c) werden keine zusätzlichen Emissionsminderungen durch eine Variation der klimapolitischen Instrumente induziert. Dies liegt darin begründet, dass die Technologien $AN1$ (Regenerativbrenner) und $ELE1$ (verbesserte Prozesssteuerung) schon im Basisszenario wirtschaftlich sind und die Technologien $BAY1$ (Rohrreaktor) und $BAY2$ (Wirbelschichttechnik) bereits im einzigen in Deutschland befindlichen Tonerdewerk implementiert sind. Die negativen ökonomischen Auswirkungen einer Variation der einzelnen Instrumente sind jedoch bedeutend. Die Ausgaben für die EEG-Umlage steigen auf bis zu 3,5 Mrd. €, die Ausgaben für die Ökosteuern auf bis zu 1,2 Mrd. € und für die Emissionsberechtigungen auf bis zu 0,8 Mrd. €, wodurch die jeweiligen Werke Verluste schreiben.

Bezüglich der Sekundäraluminiumproduktion (Abbildung 7.29 d) lassen sich deutlich geringere Auswirkungen der klimapolitischen Instrumente feststellen. Auffällig ist, dass hier eine Gewinnsteigerung im Falle einer erhöhten EEG-Umlage eintritt, welche durch den Anstieg des Aluminiumpreises begründet ist. Dieser Preisanstieg entsteht durch die Rückkopplung zum IO-Teilmodell (vgl. Tabelle 5.3 in Abschnitt 5.3). Die hohen Ausgaben für die EEG-Umlage in der Primäraluminiumproduktion sorgen für einen Preisanstieg um etwa 22% im Aluminiumsektor im Vergleich zum Basisjahr (vgl. Preismodell in Gleichung 4.44 des Abschnitts 4.2.1). Der Preis wird dabei implizit sowohl durch die inländischen Kostenentwicklungen als auch durch die Preise der importierten Güter, abhängig vom importierten Anteil,

beeinflusst. Somit wird eine Kostenerhöhung nur teilweise an die Endkonsumenten weitergegeben, weshalb eine Verschärfung klimapolitischer Instrumente, wie bereits dargestellt, zu Verlusten führen kann. Weiterhin zeigt sich in der Sekundäraluminiumproduktion in zwei Szenarios ein Anstieg der werksseitigen Emissionseinsparungen, die jedoch durch eine Zunahme der Emissionen in den vorgelagerten Sektoren überkompensiert werden. Die Implementierung des Oxy-Fuel-Brenners *RE1* führt zwar zu einem geringeren Erdgasverbrauch und daher zu geringeren CO₂-Emissionen, jedoch geht die Bereitstellung des ebenfalls notwendigen Sauerstoffs mit zusätzlichen Treibhausgasemissionen einher. Hierbei werden die Emissionen der Sauerstoffbereitstellung modellseitig etwas überschätzt, da das Produkt Sauerstoff dem sehr heterogenen Chemiesektor $i = 27$ zuordenbar ist (vgl. Tabelle A.3 in Anhang A.2) und die sektoral gemittelten Emissionsfaktoren zur Ableitung des *Carbon Footprints* herangezogen werden (vgl. Abschnitt 5.3.2).

Die bisher in diesem Abschnitt aufgezeigten Ergebnisse resultieren zum Großteil aus dem im Kapitel 5 beschriebenen detaillierten werks- bzw. anlagenspezifischen Bottom-up-Ansatz und wurden aus Gründen der Interpretierbarkeit verhältnismäßig stark aggregiert dargestellt.¹¹ Um die Effekte einzelner klimapolitischer Instrumente auch auf Anlagenebene analysieren zu können, werden im Folgenden die induzierten Änderungen in der durchschnittlichen Technologiemarkt TEC_t^{avg} genauer betrachtet. Den Einfluss einiger ausgewählter Szenarios auf die durchschnittlichen Inputs und Emissionen einzelner Anlagen zeigt Abbildung 7.30.

Aus Abbildung 7.30 a wird deutlich, dass vor allem die Inputs an Reduktionsmitteln in den Hochofen *HO* stark variieren. Im Szenario *BAU* wird, sowohl für den Fall, in dem die Akteure die werksseitigen Emissionsminderungen $e_{te,y,jj}^{AKT,Min d ZP,s,t}$ maximieren, als auch für den Fall der Maximierung direkt und indirekt induzierter weltweiter Emissionsminderungen $e_{te,y,jj}^{Welt,Min d,ges ZP,s,t}$, der minimal mögliche Input an Koks von $ik_{ii}^{min Koks,jj Eisen} = 282 \frac{kg \ Koks}{t \ Eisen}$ erreicht. Weitere Reduktionen sind nicht möglich, da Koks neben seiner Funktion als Reduktionsmittel ebenfalls als Stützgerüst in der Möllersäule

¹¹Die in diesem Abschnitt ebenfalls betrachteten indirekt induzierten Emissionsminderungen sowie die für die Berechnung des Gewinns essentiellen Preis- und Nachfrageentwicklungen werden hingegen durch das IO-Teilmodell vorgegeben (vgl. Abschnitt 5.3).

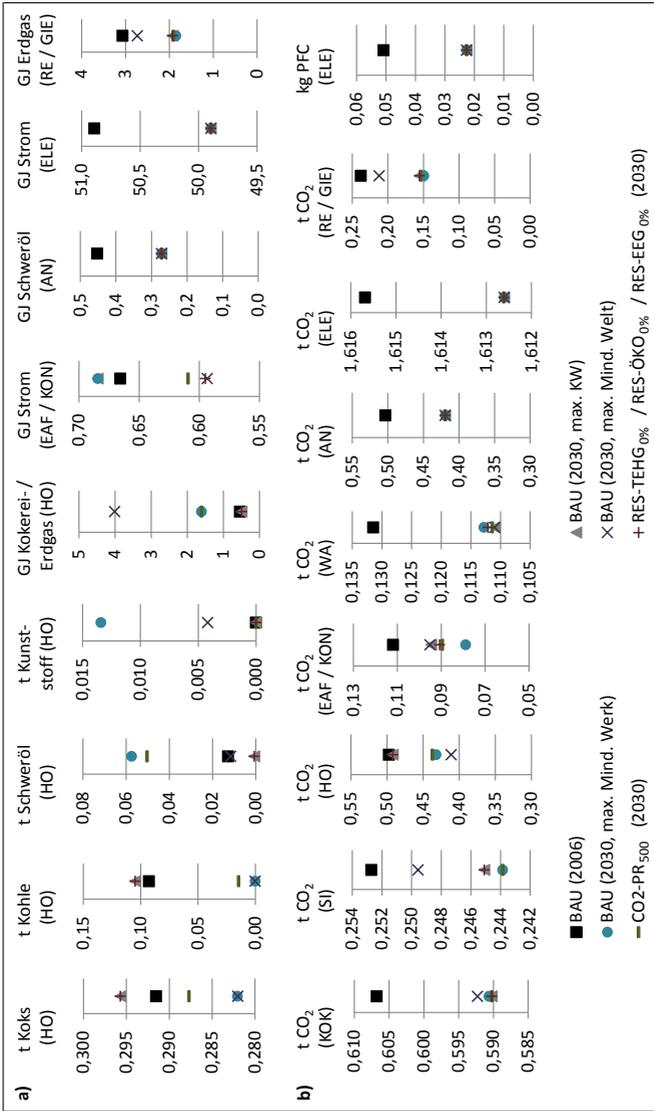


Abbildung 7.30.: Ausgewählte, über die Produktionsmengen gemittelte Inputs (a) und Emissionen (b) pro t Zwischenprodukt für verschiedene Szenarios, abgeleitet aus der durchschnittlichen Technologiematrix TEC_t^{avg} (KW: $k^{w,y,j}ZP_{,s,t}$; Mind. Werk: $c_{te,y,j}^{AKT,Mind}$; Mind. Welt: $c_{te,y,j}^{Welt,Mind,ges}$)

fungiert (vgl. Abschnitt 6.2.2). In beiden Fällen werden diese Reduktionen gegenüber dem Basisjahr durch eine Abkehr von Kohle als alternativem Reduktionsmittel hin zu Schweröl, Kunststoff und Kokereigas realisiert. Ein hoher Zertifikatspreis begünstigt ebenfalls die Direkteinblasung von Schweröl und Kokereigas. Handeln die Akteure hingegen rational (*homo oeconomicus*), findet sogar eine Reduktion der Nutzung von Schweröl - im Basisjahr nutzt lediglich ein Werk Schweröl als Reduktionsmittel - und eine Anhebung der Direkteinblasung von Kohle statt. Selbiges kann auch für die Szenariokombination *RES-TEHG*_{0%} / *RES-ÖKO*_{0%} / *RES-EEG*_{0%} festgestellt werden.

Der zur Herstellung von Rohstahl benötigte Strom wird in der Technologiematrix TEC_t^{avg} über die Produktionsmengen der einzelnen Elektrolichtbogenöfen *EAF* und der Konverter *KON* gemittelt. Es zeigt sich, dass die Szenariokombination *RES-TEHG*_{0%} / *RES-ÖKO*_{0%} / *RES-EEG*_{0%} sowie die Maximierung der weltweiten Emissionseinsparungen mit dem geringsten Stromverbrauch einhergehen, während hohe Zertifikatspreise ebenfalls zu deutlichen Reduktionen im Stromeinsatz führen. Als bedeutende Technologie, welche maßgeblich zur Senkung des Stromverbrauchs in der Rohstahlproduktion beiträgt, wurde im vorliegenden Abschnitt bereits die Schrottvorwärmung im Elektrolichtbogenofen *EAF1* bzw. *EAF2* identifiziert (vgl. auch Tabelle 7.6).

Der Schweröleinsatz in der Anodenproduktion *AN* wird, analog zum Stromeinsatz in der Elektrolyse *ELE*, in jedem der Szenarios gleichermaßen gegenüber dem Basisszenario reduziert, da die zugehörigen Technologien (Regenerativbrenner *AN1* und verbesserte Prozesssteuerung *ELE1*) ohnehin einen positiven Kapitalwert besitzen.

Hinsichtlich des Erdgasinputs in der Rohaluminiumproduktion, bestehend aus Refinern, Remeltern *RE* sowie Blockgießanlagen *GIE*, zeigt sich, dass in fast allen Szenarios der Oxy-Fuel-Brenner *RE1* implementiert wird und damit den Erdgasverbrauch in der Sekundäraluminiumproduktion deutlich senkt. Werden jedoch die gesamten direkt und indirekt induzierten Emissionseinsparungen maximiert, wird von einer Implementierung dieser Technologie abgesehen, da die Treibhausgasemissionen der Vorketten steigen (s. obige Ausführungen).

Bezüglich der in Abbildung 7.30 b dargestellten Emissionsfaktoren lässt sich feststellen, dass in fast allen Szenarios die pro Tonne Zwischenpro-

dukt emittierten Treibhausgase gegenüber dem Basisjahr reduziert werden. Auffällig ist, dass, im Falle einer Maximierung der weltweiten Emissionseinsparungen durch die Akteure, teilweise höhere CO₂-Emissionen am Standort in Kauf genommen werden, um die Emissionen in den Vorketten zu mindern. Dies spiegelt sich zum einen in der Implementierung der abschnittswisen Abgasrückführung inkl. Abhitzekeessel *SI6* wider, welche den Koksverbrauch in geringerem Ausmaß senkt als andere Abgasrückführungen (vgl. Tabelle 6.8 in Abschnitt 6.2.2), jedoch zusätzlichen Dampf bereitstellt und damit zu Substitutionseffekten im Fernwärmesektor beiträgt. Weiterhin wird aus den bereits oben genannten Gründen auf die Implementierung des Oxy-Fuel-Brenners *RE1* verzichtet.¹²

Nachdem die Effekte einzelner klimapolitischer Instrumente auf die technischen Koeffizienten, die induzierten Emissionseinsparungen und die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Verfahrensrouten eingehend analysiert wurden, stellt sich die Frage, welches Bündel klimapolitischer Instrumente nun sinnvoll erscheint, um in der deutschen Metallherzeugung die „richtigen“ zukünftigen Anreize zu setzen. Zunächst ist festzuhalten, dass die identifizierten Reduktionspotenziale in Anbetracht der ambitionierten klimapolitischen Ziele als eher gering einzustufen sind. Selbst wenn eine nur 2%-ige jährliche Reduktion der fossilen Energieträgerinputs für die energieintensiven Industrien angestrebt wird (vgl. Abbildung 7.21), bedeutet dies eine notwendige Reduktion der CO₂-Emissionen in der Metallindustrie um 28% bis 2030 im Vergleich zu 2014 bzw. um 17 Mio. t CO₂.¹³ Weiterhin zeigt sich nur für die betrachteten Extremszenarios eine deutliche Beeinflussbarkeit der Nutzung der identifizierten Reduktionspotenziale durch ökonomische klimapolitische Instrumente. Somit bringt eine Verschärfung der vorhandenen Instrumente kaum zusätzliche Emissionseinsparungen mit sich. Jedoch können hinsichtlich der Fairness der Lastenverteilung moderate Verschärfungen in Betracht gezogen werden, so dass bspw. die Kosten zur Umstellung des Energiesystems, die EEG-Umlage, nicht allein durch die nicht-energieintensiven Industrien getragen werden. So induziert die 20%-ige Aufhebung der Entlastungstatbestände in der Szenariokombi-

¹²Allgemein ist bei Betrachtung der über die Produktionsmengen gemittelten Ergebnisse in Abbildung 7.30 anzumerken, dass ein Teil der Abweichungen auch auf Verschiebungen der Produktionsanteile zwischen einzelnen Anlagen zurückzuführen ist.

¹³Im Abschnitt 7.3.1 wurde ein Reduktionspotenzial von etwa 5 Mio. t CO₂-Äq. identifiziert (vgl. Abbildung 7.14).

nation $RES-TEHG_{80\%}$ / $RES-ÖKO_{80\%}$ / $RES-EEG_{80\%}$ nur bei insgesamt einem Elektrolichtbogenofen dauerhaft negative Gewinne, während die klimabezogenen Ausgaben der Metallerzeugung auf 1,1 Mrd. € ansteigen und damit knapp 800 Mio. € mehr staatliche Einnahmen generieren als im Basisszenario.

Weitere Ansatzpunkte zukünftiger Klimapolitiken können auch in der Förderung von Emerging Techniques liegen. Bspw. versprechen die Verfahren ULCORED, Midrex oder HYL, welche allesamt auf der Direktreduktion von Eisenpellets in einem Schachtofen basieren, bei Kombination mit CCS Emissionsreduktionen von etwa 0,9 bis 1,0 t CO₂ pro Tonne Roheisen (vgl. Pardo et al. [223]). Hochgerechnet auf eine Produktionsmenge von etwa 30 Mio. t Roheisen im Jahr 2006 ergibt sich ein Reduktionspotenzial von insgesamt 28,5 Mio. t CO₂, welches deutlich über den durch die Implementierung von BVT ermöglichten Emissionsreduktionen liegt. Somit könnte zur Diskussion gestellt werden, inwiefern die metallerzeugende Industrie bei der Entwicklung und Implementierung dieser Technologien finanziell unterstützt werden sollte, da aufwendige Prozessrestrukturierungen zu erfolgen hätten, welche mit großen technischen und ökonomischen Risiken verbunden sind.

Über die Metallerzeugung hinaus lassen sich mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Modellsystem auch durch klimapolitische Instrumente induzierte Auswirkungen auf andere Sektoren aufzeigen. So gibt Tabelle 7.7 die im IO-Teilmodell berechneten Preissteigerungen für die betrachteten Extremszenarios wieder.

Analog zum aktorsbasierten Teilmodell zeigen sich deutliche Preissteigerungen für einzelne energieintensive Sektoren, insofern eine ambitionierte Verschärfung klimapolitischer Instrumente vollzogen wird. Hierdurch wird auch nochmals die Notwendigkeit konsistenter makroökonomischer Rahmenbedingungen, unter denen die Investitionsentscheidungen metall-erzeugender Werke getroffen werden, verdeutlicht. Denn klimapolitische Instrumente wirken nicht nur direkt auf den betroffenen Sektor, sondern beeinflussen diesen ebenfalls indirekt über gestiegene Preise für Vorleistungen. Bezüglich des Preisindex nach Laspeyres $p_{t=2030}^{Las}$ lässt sich feststellen, dass die Preissteigerungen gegenüber dem Basisszenario eher gering ausfallen. Dies liegt zum einen darin begründet, dass ein Großteil der Sektoren

Tabelle 7.7.: Auswirkungen verschiedener Szenarios auf ausgewählte Preisindizes $p_{i,t=2030}$ in 2030

Sektor	<i>BAU</i>	<i>CO2-PR</i> ₅₀₀ / <i>RES-TEHG</i> _{0%}	<i>ÖKO-ST</i> _{600%} / <i>RES-ÖKO</i> _{0%}	<i>EEG-UM</i> _{600%} / <i>RES-EEG</i> _{0%}
Roheisen <i>i</i> = 32	1,11	1,54	1,19	1,18
Aluminium <i>i</i> = 33	1,06	1,12	1,13	1,22
Keramik <i>i</i> = 31	1,19	1,71	1,30	1,29
Chemische Erzeugnisse <i>i</i> = 27	1,17	1,33	1,27	1,27
Kunststoff- waren <i>i</i> = 29	1,14	1,20	1,22	1,23
Elektrizitäts- versorgung <i>i</i> = 47	1,38	2,74	1,58	1,62
Fernwärme- versorgung <i>i</i> = 49	1,28	3,91	1,69	1,29
Laspeyres <i>L</i> _{<i>a</i>s} <i>p</i> _{<i>t</i>=2030}	1,17	1,23	1,23	1,20

nicht unter das europäische Emissionshandelssystem fällt und zum anderen darin, dass für viele Sektoren die Ausgaben für Energieträger von untergeordneter Relevanz sind.

Inwiefern klimapolitische Instrumente die Investitionsstrategien in den Sektoren, welche nicht der Metallindustrie zuordenbar sind, beeinflussen, kann mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Modell nicht analysiert werden. Die Integration weiterer Sektoren stellt jedoch einen wichtigen Ansatzpunkt dar, der in zukünftigen Forschungsarbeiten verfolgt werden sollte (vgl. Kapitel 8).

8. Zusammenfassung

Angesichts der ambitionierten klimapolitischen Ziele Deutschlands besteht eine der zentralen Regierungsaufgaben darin, die derzeitigen klimapolitischen Instrumente derart anzupassen, dass zukünftig ausreichend Anreize zur Treibhausgasemissionsminderung gesetzt werden. Auf der anderen Seite ist hierbei jedoch sicherzustellen, dass die Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industrien gesichert bleibt und keine Verlagerung der Emissionen in das Ausland (*Carbon Leakage*) induziert wird. Konkret stellt sich z.B. die Frage, inwiefern die derzeitigen Entlastungstatbestände, welche für energieintensive Industrien hinsichtlich dem Handel mit Emissionsberechtigungen, der Strom- und Energiesteuern sowie der EEG-Umlage gewährt werden, zukünftig weiter bestehen sollten.

Um eine Bewertung der zukünftigen Ausgestaltung klimapolitischer Instrumente vorzunehmen, werden in dieser Arbeit zunächst die Rahmenbedingungen der deutschen Klimapolitik sowie der Metallindustrie als wichtigster Vertreter der energieintensiven Industrien dargelegt (Kapitel 2). Die einzelnen Entlastungstatbestände, welche bei den energieintensiven Industrien zu jährlichen Entlastungen von etwa 8 Mrd. € führen, werden dabei genau spezifiziert und im Lichte der ambitionierten klimapolitischen Ziele als diskussionswürdig erachtet. Weiterhin werden die in Deutschland praktizierten Herstellungsprozesse für Aluminium und Stahl hinsichtlich deren Treibhauspotenzialen analysiert und herausgestellt, dass eine werks- bzw. anlagenspezifische Betrachtungsweise vonnöten ist, um die technischen und wirtschaftlichen Reduktionspotenziale adäquat abschätzen zu können. Daneben zeigt sich die Wichtigkeit einer sektorübergreifenden Betrachtungsweise, um auch indirekte Effekte wie Emissionsminderungen in vorgelagerten Wertschöpfungsstufen quantifizieren zu können. Letztlich verdeutlicht eine Analyse des Außenhandels sowie der vergangenen Entwicklungen in der deutschen Metallerzeugung die derzeitige schwierige

wirtschaftliche Lage dieser Industrie, was bei einer Bewertung klimapolitischer Instrumente ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Die Analyse existierender Ansätze im Bereich klima- und umweltpolitischer Fragestellungen, welche vor allem sogenannte Integrated Assessment Modelle (IAM) umfassen, zeigt, dass nahezu kein Ansatz den benötigten Detaillierungsgrad hinsichtlich der Modellierung von Produktionsprozessen sowie von klimapolitischen Instrumenten aufweist (Kapitel 3). Da jedoch das otello-Modell den gestellten Anforderungen am ehesten entspricht, wird die Grundidee von otello, welche die Kopplung eines makroökonomischen Input-Output-Modells mit einem akteursbasierten Ansatz vorsieht, auch in der vorliegenden Arbeit verfolgt. Zur Entwicklung des in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Modellsystems sind jedoch umfassende Erweiterungen der gegebenen Grundidee vonnöten. Diese Erweiterungen werden dabei vor allem hinsichtlich einer detaillierteren Abbildung der Produktionsprozesse, einer detaillierteren Abbildung der effizienzsteigernden Technologien, einer präzisen Modellierung der Entlastungstatbestände klimapolitischer Instrumente sowie hinsichtlich einer Betrachtung indirekter Emissionen (EEIO-Ansatz) vorgenommen.

Das makroökonomische IO-Teilmodell dient der Simulation (zukünftiger) sektorübergreifender, gesamtwirtschaftlicher Effekte und stellt einen hinsichtlich wirtschaftlicher und ökologischer Entwicklungen konsistenten Rahmen dar, den die Metallindustrie in ihren Entscheidungen berücksichtigt und gleichzeitig durch ihre Entscheidungen beeinflusst (Kapitel 4). Nach einer Darstellung der Grundlagen der statischen IO-Rechnung wird der IO-Ansatz zunächst dynamisch erweitert. Hierzu wird das Teilmodell u.a. hinsichtlich des privaten Konsums, der Investitionen, der Abschreibungen und der klimapolitischen Instrumente teildogenisiert. Darüber hinaus wird an diesem dynamischen Ansatz eine umweltökonomische Erweiterung vorgenommen, um auch indirekte Effekte hinsichtlich der Treibhausgasemissionen und des fossilen Ressourcenverbrauchs abhängig von der zukünftigen Entwicklung der Energie- und Materialeffizienz abbilden zu können. Die entwickelte Modellstruktur ermöglicht so neben der Prognose zukünftiger Preisänderungen oder zukünftiger Konsumausgaben auch bspw. die Bestimmung des *Carbon Footprints* einzelner Güter und liefert die Rahmenbedingungen zur Evaluation klimapolitischer Instrumente sowie die Prämissen, welche für die Erreichung der klimapolitischen Ziele erfüllt sein müssen.

Das aktorsbasierte Teilmodell umfasst die wesentlichen deutschen Stahl und Aluminium produzierenden Werke, welche als Akteure modelliert werden und abhängig von den jeweiligen technischen, wirtschaftlichen und klimapolitischen Rahmenbedingungen Investitionsentscheidungen hinsichtlich der Implementierung energieeffizienzsteigernder Technologien fällen (Kapitel 5). Zur Modellierung der Produktionsprozesse wird ein um verfahrenstechnische Parameter erweiterter Input-Output-Ansatz entwickelt, der auf Anlagenebene die Stoff- und Energieflüsse einzelner Werke simuliert. Diese Stoff- und Energieflüsse werden wiederum durch die Implementierung energieeffizienzsteigernder Technologien beeinflusst, wobei technische Restriktionen sowie Kohlenstoff- und Energiebilanzen die technische Fundierung des Ansatzes sicherstellen und eine detaillierte Berechnung werkspezifischer Treibhausgasemissionen abhängig von der eingesetzten Technologie ermöglichen. Weiterhin wird der aktorsbasierte Ansatz um betriebswirtschaftliche Parameter erweitert, welche der Berechnung der Investitionen sowie der durch die Technologien beeinflussten Kosten und Erlöse dienen. Ein besonderer Fokus der insgesamt 13 berücksichtigten Kostenarten wird dabei auf eine detaillierte Berechnung klimabezogener Ausgaben gelegt, welche direkt von der Ausgestaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen (TEHG, ZuV, EnergieStG, StromStG, EEG) abhängen. Als Entscheidungskriterien der modellierten Akteure werden das Kapitalwertkriterium sowie die Maximierung der (direkten und indirekten) Emissionsminderungen herangezogen, welche einerseits die Abschätzung der wirtschaftlichen und andererseits der technischen Treibhausgasreduktionspotenziale ermöglichen.

Aufgrund der detaillierten Modellierung der Produktionsprozesse auf Anlagenebene und des gleichzeitigen Einbezugs sämtlicher relevanter Werke der deutschen Metallindustrie sowie der wirtschaftlichen Wechselwirkungen letzterer zu allen anderen Sektoren der deutschen Volkswirtschaft, erfordert das entwickelte Modellsystem eine umfassende Datenbasis hinsichtlich technischer, betriebswirtschaftlicher sowie volkswirtschaftlicher Parameter (Kapitel 6). Neben der Entwicklung bzw. Anpassung der benötigten IO-Tabellen, welche für das eingesetzte makroökonomische IO-Teilmodell disaggregiert werden, stellt vor allem die Abschätzung der anlagenspezifischen Koeffizienten einen wichtigen Bestandteil des aktorsbasierten Teilmodells zur Ableitung von Treibhausgasreduktionspotenzialen dar. Diese Koeffizienten werden daher über ein separates Teilmodell (NLP) unter

der Verwendung öffentlich verfügbarer werkspezifischer Informationen sowie technischer Restriktionen bestimmt. Die zukünftigen Treibhausgasemissionen der einzelnen Werke werden im Wesentlichen durch die Implementierung zusätzlicher effizienzsteigernder Technologien beeinflusst, weshalb weiterhin insgesamt 29 vielversprechende Technologien identifiziert werden, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen. Dabei werden deren Auswirkungen auf die anlagenspezifischen Input- und Outputkoeffizienten sowie deren Investitionen spezifiziert und die Daten im Sinne einer Technologiedatenbank für das aktorsbasierte Teilmodell aufbereitet.

Im Anschluss an die Analyse der entwickelten Datenbasis werden die zu untersuchenden Szenarios definiert, welche zum einen eine Variation der makroökonomischen Rahmenbedingungen wie Exportentwicklungen, Energie- oder Materialeffizienzsteigerungen und zum anderen eine Variation der klimapolitischen Instrumente vorsehen (Kapitel 7). Durch die Anwendung des Modellsystems auf diese Szenarios können die unten aufgelisteten wesentlichen Erkenntnisse erlangt werden. Auf volkswirtschaftlicher Ebene zeigt sich u.a. Folgendes:

- Die Fortschreibung aktueller Trends hinsichtlich der Entwicklungen von Energie- und Materialeffizienz sowie der Exporte verdeutlicht, dass die klimapolitischen Ziele ohne weitergehende Anpassungsmaßnahmen weit verfehlt und die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 lediglich 9% betragen würden.
- Die Erreichbarkeit der klimapolitischen Ziele wird sehr stark durch die Exportentwicklungen beeinflusst. Bleiben die Exporte konstant auf demselben Niveau, so ist in den meisten Sektoren eine 5%-ige jährliche Steigerung der Energieeffizienz oder eine 5%-ige Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare notwendig um die Erreichbarkeit sicherzustellen.

Auf technisch-betriebswirtschaftlicher Ebene werden u.a. folgende Erkenntnisse erlangt:

- Die Analyse der 48 betrachteten deutschen Stahl und Aluminium produzierenden Werke zeigt, dass teilweise große Unterschiede hinsichtlich der emittierten Treibhausgase zwischen den einzelnen Standorten existieren. Diese Unterschiede belaufen sich auf bis zu 25% bei integrierten Hüttenwerken, 13% bei Aluminiumhütten, 78% bei

Elektrolichtbogenöfen und auf bis zu 17% bei Aluminium-Refinern bzw. Remelttern. Die größte Bandbreite der Treibhausgasemissionen lässt sich auf Anlagenebene bei den Kokereien, den Schmelzflusselektrolysen, den Hochöfen sowie den Walzwerken feststellen.

- Während Einsparungen von etwa 1,5 Mio. t CO₂-Äquivalenten mit positivem Kapitalwert realisiert werden könnten, existiert in der deutschen Metallerzeugung ein maximales (technisches) Reduktionspotenzial von etwa 5,0 Mio. t CO₂-Äquivalenten durch Investitionen in zusätzliche BVTs in Höhe von 607 Mio. €. Unter Berücksichtigung der indirekt in den Vorketten der Metallerzeugung vermeidbaren Emissionen ergibt sich ein Reduktionspotenzial von etwa 12,7 Mio. t CO₂-Äquivalenten bei Investitionen in Höhe von 1.418 Mio. €.
- Die größten Emissionsminderungen können am Hochofen durch die Verwendung alternativer Reduktionsmittel erzielt werden. Im Falle der Direkteinblasung von Kokereigas *HO3* geht der Kapitalwert jedoch um 1.488 € pro eingesparter Tonne CO₂-Äq. zurück, während für zwei weitere vielversprechende Technologien, die abschnittsweise Abgasrückführung inkl. Abhitzeessel *SI6* und die Schrottvorwärmung im Fingerschachtofen *EAF1*, der Kapitalwert lediglich um 91 bzw. 188 € pro eingesparter Tonne CO₂-Äq. abnimmt.
- Die Variation der klimapolitischen Instrumente zeigt nur geringfügige Effekte auf das Investitionsverhalten, so dass der größte Teil des identifizierten technischen Reduktionspotenzials in den betrachteten Szenarios ungenutzt bleibt. Nur sehr hohe Zertifikatspreise (> 150 €) gehen mit zusätzlichen signifikanten Emissionsreduktionen von bis zu 7,5 Mio. t CO₂-Äq. einher.
- Die wirtschaftlichen Auswirkungen bei einer (teilweisen) Aufhebung der Entlastungstatbestände sind vor allem hinsichtlich der Profitabilität von Aluminiumhütten sowie von Elektrolichtbogenöfen äußerst kritisch zu sehen. Bei einer vollständigen Aufhebung der Entlastungstatbestände im TEHG, EnergieStG, StromStG und EEG schreiben, bedingt durch zusätzliche jährliche Ausgaben in Höhe von etwa 4,3 Mrd. €, 15 der 48 Werke Verluste. Eine moderate 20%-ige Aufhebung der Entlastungstatbestände wäre jedoch wirtschaftlich tragbar und könnte staatliche Mehreinnahmen in Höhe von 0,8 Mrd. € generieren.

Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass der durch die Metallerzeugung leistbare Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Anbetracht ambitionierter klimapolitischer Ziele zumindest bis zum Jahre 2030 als eher gering einzuschätzen ist. Eine moderate Verschärfung existierender klimapolitischer Instrumente könnte jedoch seitens der Regierung hinsichtlich einer faireren Lastenverteilung zwischen energieintensiven Industrien und kleineren Verbrauchern in Erwägung gezogen werden. Da mit der Erlangung der Marktreife einiger *Emerging Techniques* in Zukunft voraussichtlich deutlich höhere Emissionsreduktionen realisiert werden können, stellt eine weitere Option für zukünftige Klimapolitiken eine Innovationsförderung dar, um die Risiken, die mit der Entwicklung und Implementierung dieser Technologien einhergehen, abmildern zu können.

Die Vorteile des zur Analyse der gegebenen Fragestellung entwickelten Modellsystems liegen in der vergleichsweise detaillierten Modellierung einzelner Prozesse der Metallerzeugung bei gleichzeitiger, nahezu vollständiger Berücksichtigung des gesamten deutschen Anlagenbestandes.¹ Weiterhin ermöglicht die Integration makroökonomischer Parameter die Einbettung der Investitionsentscheidungen in konsistente wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie die Berücksichtigung indirekter Effekte hinsichtlich Preissteigerungen und Emissionsminderungen in vorgelagerten Wertschöpfungsstufen. Die Integration all dieser Aspekte in einem Modellsystem wurde bisher in keinem anderen Ansatz umgesetzt, weshalb die vorliegende Arbeit diese wissenschaftliche Lücke schließt.

Neben den genannten Vorteilen werden in den Abschnitten 4.3 und 5.4 auch die Defizite des integrierten Ansatzes wie die zeitverzögerten Auswirkungen einiger Rückkopplungen zwischen den Teilmodellen aufgezeigt, die jedoch zugunsten einer detaillierten Modellierung der Produktionsprozesse sowie der makroökonomischen Entwicklungen vernachlässigbar erscheinen. Einige dieser Defizite führen weiterhin zu dem im Folgenden dargestellten zukünftigen methodischen und inhaltlichen Forschungsbedarf.

Auf methodischer Seite stellen die vergleichsweise einfachen Entscheidungs-routinen der Akteure, welche im aktorsbasierten Teilmodell entweder

¹Das NLP zur Abschätzung der anlagenspezifischen Koeffizienten wird derzeit in einem Folgeprojekt weiterentwickelt und zukünftig bei insgesamt fünf Automobilproduzenten bzw. -zulieferern eingesetzt, um die Effizienz einzelner Stahllieferanten abschätzen zu können und einen Vergleich zwischen diesen zu ermöglichen.

rational handeln oder die Treibhausgasemissionseinsparungen maximieren, einen Ansatzpunkt zur Weiterentwicklung dar. In der Realität gründen Investitionsentscheidungen auch auf weitergehenden Überlegungen, die bspw. wirtschaftliche Risiken oder Marketingstrategien umfassen können. Diese zusätzlichen Faktoren sowie deren Einfluss auf die Investitionsentscheidung gilt es somit in zukünftigen Forschungsarbeiten zu analysieren.

Hinsichtlich des IO-Teilmodells besteht auf methodischer Seite weiterhin die Möglichkeit die nationale IO-Tabelle durch eine multiregionale (MRIO) zu ersetzen. Damit könnten die durch Importe im Ausland induzierten Treibhausgasemissionen genauer als bei Verwendung der *domestic technology assumption* bestimmt werden. Problematisch ist hierbei jedoch die Integration nationaler Statistiken, wie bspw. hinsichtlich der Konsumdaten oder der Energieträgerrechnung, da diese analog zur Sektorstruktur der nationalen IO-Tabelle differenziert werden. Die vereinfachte Abbildung der anthropogenen Kohlenstoffflüsse mittels der durchgeführten Sektorklassifizierung stellt einen weiteren Ansatzpunkt für zukünftige Forschungsarbeiten dar. Hierbei zeigt sich jedoch die Verfügbarkeit physischer IO-Daten als limitierender Faktor, weshalb gegebenenfalls die Integration weiterer Statistiken oder gesonderter Erhebungen notwendig ist.

Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf den Technologien liegt, welche dem Stand der Technik (BVT) entsprechen, stellt eine mögliche inhaltliche Erweiterung die Integration von *Emerging Techniques* und die Erweiterung des Zeithorizonts über 2030 hinaus dar. Hierzu sind technologiespezifische Daten auf demselben Detailniveau wie für die modellierten BVT in das Modell zu integrieren. Diese Daten sind jedoch nicht für alle *Emerging Techniques* verfügbar und teilweise mit großen Unsicherheiten behaftet, da die Anlagen noch nicht im großtechnischen Maßstab genutzt werden. Des Weiteren erscheint eine Integration dieser Technologien nur dann sinnvoll, wenn auch die Entscheidungsprotokolle der Akteure entsprechend erweitert werden (s.o.), so dass auch wirtschaftliche Risiken, welche mit einer umfassenden Restrukturierung der Produktionsprozesse einhergehen, sowie die zukünftigen strategischen Ausrichtungen der Unternehmen adressiert werden.

Da das in dieser Arbeit entwickelte Modellsystem die detaillierte Abschätzung der Treibhausgasreduktionspotenziale eines gesamten Sektors sowie

den Einfluss einzelner klimapolitischer Instrumente auf die Investitionsentscheidung zu beziffern vermag, sollten zukünftige Forschungsarbeiten das bestehende Modellsystem nutzen und die Integration weiterer energieintensiver Industrien, wie die Zement- oder Papierherstellung, vorantreiben. Auf diese Weise könnten analog zu den Ausführungen dieser Arbeit vergleichende Analysen durchgeführt werden, welche der modellierten Sektoren durch welche klimapolitischen Strategien inwieweit zur Erreichung der klimapolitischen Ziele beitragen sollten.

A. Anhang

A.1. In der Modellierung verwendete Indizes, Parameter und Variablen

Tabelle A.1.: In der Modellierung verwendete Indizes (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: akteursbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Index- mengen	Teilmenge von		Teilmodell	Bezeichnung
<i>abs</i>	$\subset g$	-	IO	Abschreibungen
<i>ae</i>	$\subset g$	-	IO	Arbeitnehmerentgelt
<i>b</i>	-	-	IO	Treibhausgase des Kyoto-Protokolls
<i>b^{ETS}</i>	$\subset b$	-	IO	Handelspflichtige Treibhausgase nach TEHG
<i>ch4</i>	$\subset b$	-	IO	CH ₄
<i>co2</i>	$\subset b^{ETS}$	$\subset b$	IO	CO ₂
<i>em</i>	-	-	NLP	CO ₂ -Emissionsberichte des PRTR
<i>exp</i>	$\subset h$	-	IO	Exporte
<i>g</i>	-	-	IO	Primärinputs
<i>gst</i>	$\subset g$	-	IO	Gütersteuern abzüglich Gütersubventionen
<i>h</i>	-	-	IO	Endnachfragebereich (letzte Verwendung)
<i>hfc</i>	$\subset b$	-	IO	HFC
<i>i (= j)</i>	-	-	IO	Sektor (Produktionsbereich), Gut (Produkt)
<i>i'</i>	$(\subset i)^1$	-	IO	ursprüngliche Sektoreinteilung Energieträgerrechnung (statistisches Bundesamt)

Tabelle A.1.: In der Modellierung verwendete Indizes (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: akteursbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Index- mengen	Teilmenge von		Teilmodell	Bezeichnung
i''	$(\supset i)^1$	-	IO	ursprüngliche Sektoreinteilung IO-Tabelle (statistisches Bundesamt)
i^{AKT}	$\subset i$	-	IO	Sektoren, welche auch im AB vertreten sind
i^{DL}	$\subset i$	-	IO	Dienstleistungen und Sektoren, die kein Element von i^{ET} , i^{HZ} oder i^{EP} sind
i^{El}	$\subset i^{ET}$	$\subset i$	IO	Elektrizitätsversorgung
i^{EP}	$\subset i$	-	IO	Sektoren zur Herstellung von Endprodukten
i^{ET}	$\subset i$	-	IO	Energieträger
$i^{ET'}$	$(\subset i^{ET})^1$	$\subset i$	IO	ursprüngliche Einteilung der Energieträgerrechnung (statistisches Bundesamt)
$i^{ET''}$	$(\supset i^{ET})^1$	$\subset i$	IO	ursprüngliche Einteilung der IO-Tabelle für Energieträger (statistisches Bundesamt)
i^{ETS}	$\subset i$	-	IO	Handelspflichtige Sektoren nach TEHG
i^{FW}	$\subset i^{ET}$	$\subset i$	IO	Fernwärmesektor
i^{HZ}	$\subset i$	-	IO	Sektoren zur Herstellung von Halbzeugen
i^{INT}	$\subset i^{PG}$	$\subset i$	IO	energieintensive Sektoren nach EnergieStG und StromStG
i^{Lis}	$\subset i$	-	IO	Sektoren der Branchenliste nach EEG
i^{Lis1}	$\subset i^{Lis}$	$\subset i$	IO	Sektoren der Branchenliste 1 nach EEG
i^{Lis2}	$\subset i^{Lis}$	$\subset i$	IO	Sektoren der Branchenliste 2 nach EEG
i^{NEM}	$\subset i^{Lis1}$	$\subset i^{Lis}$	IO	Nicht-Eisen-Metallindustrie nach EEG
i^{PG}	$\subset i$	-	IO	Sektoren des produzierenden Gewerbes
$ii (= jj)$	-	-	AB, NLP	Stoff
ii^*	$\subset ii$	-	AB	Substitut für Kuppelprodukte ii^{KP}
ii^{AlO}	$\subset ii^{ZP}$	$\subset ii$	AB, NLP	Aluminiumoxid

Tabelle A.1.: In der Modellierung verwendete Indizes (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: akteursbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Indexmengen	Teilmenge von	Teilmodell	Bezeichnung	
i^{Alu}	$\subset i^{ZP} \subset ii$	AB, NLP	Rohaluminium	
i^{BS}	$\subset i^{ET} \subset ii$	AB, NLP	Brennstoffe	
i^{CO2}	$\subset i^{ext} \subset ii$	AB, NLP	CO ₂	
i^{Da}	$\subset i^{KP} \subset ii$	AB	Dampf	
i^{EG}	$\subset i^{ext}$ und $\subset i^{BS}$	$\subset ii$	AB, NLP	Erdgas
i^{Eisen}	$\subset i^{ZP} \subset ii$	AB, NLP	Roheisen	
i^{El}	$\subset i^{KP}$ und $\subset i^{ET}$	$\subset ii$	AB	Elektrizität
i^{EP}	$\subset i^{ZP} \subset ii$	AB	Endprodukt	
i^{ET}	$\subset ii$	-	AB	Energieträger
i^{ext}	$\subset ii$	-	AB	Stoff, der nicht als Zwischen- oder im Werk nutzbares Kuppelprodukt klassifiziert ist ($\neq i^{ZP}, i^{KP}$)
i^{Koks}	$\subset i^{ZP}$ und $\subset i^{ET}$	$\subset ii$	AB, NLP	Koks
i^{Kon}	$\subset i^{PG}$ und $(\subset i^{BS})^2$	$\subset i^{KP}$	AB, NLP	Konvertergas
i^{KP}	$\subset ii$	-	AB	Kuppelprodukt
i^{PFC}	$\subset i^{THG} \subset ii^{ext}$	AB	AB	PFC
i^{PG}	$\subset i^{KP}$ und $(\subset i^{BS})^2$	$\subset ii$	AB, NLP	Prozessgas, Kuppelgas
i^{Ref}	$\subset i^{ZP} \subset ii$	NLP	NLP	Referenzprodukt
i^{Sinter}	$\subset i^{ZP} \subset ii$	AB, NLP	AB, NLP	Sinter
i^{Stahl}	$\subset i^{ZP} \subset ii$	AB, NLP	AB, NLP	Rohstahl
i^{Sub}	$\subset ii$	-	AB, NLP	Substitut bei kontinuierlichen Maßnahmen
i^{THG}	$\subset i^{ext}$	-	AB	Treibhausgase
i^{WS}	$\subset i^{EP} \subset i^{ZP}$	AB, NLP	AB, NLP	Walzstahl
i^{ZP}	$\subset ii$	-	AB, NLP	Zwischenprodukt
imp	$\subset g$	-	IO	Importe

Tabelle A.1.: In der Modellierung verwendete Indizes (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: akteursbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Index- mengen	Teilmenge von		Teilmodell	Bezeichnung
inv	$\subset h$	-	IO	Anlageinvestitionen
$j (= i)$	-	-	IO	Sektor (Produktionsbereich)
$jj (= ii)$	-	-	AB, NLP	Stoff
nbu	$\subset g$	-	IO	Nettobetriebsüberschuss
$n2o$	$\subset b^{ETS}$	$\subset b$	IO	N ₂ O
$pf c$	$\subset b^{ETS}$	$\subset b$	IO	PFC
pos	-	-	AB	Kosten- bzw. Erlösposition
pri	$\subset h$	-	IO	Konsumausgaben privater Haushalte
$r (= v)$	-	-	IO	Verwendungszweck
s	-	-	AB, NLP	Werk
s^{Lis1}	$\subset s$	-	AB	Werk der Branchenliste 1 nach EEG
s^{NEM}	$\subset s^{Lis1}$	$\subset s$	AB	Werke der Nicht-Eisen-Metallindustrie nach EEG
$sf6$	$\subset b$	-	IO	SF ₆
sop	$\subset g$	-	IO	sonstige Produktionsabgaben
t	-	-	IO, AB	Zeitpunkt (Jahr)
t^{BAS}	$\subset t$	-	IO, AB, NLP	Basisjahr
te	-	-	AB	Technologie
τ	-	-	IO, AB	Folgejahre der Investitionsentscheidung
$v (= r)$	-	-	IO	Verwendungszweck
vor	$\subset h$	-	IO	Vorratsveränderungen
y	-	-	AB, NLP	Anlage
zer	$\subset g$	-	IO	Zertifikate

¹ Die angegebene Untermenge bezieht sich in diesem Fall auf die unterschiedlichen Aggregationsniveaus. Falls gilt $i' \subset i$, bedeutet dies, dass i' die Elemente von i weiter in bspw. i'_1 und i'_2 untergliedert.

² Vereinzelt werden Prozessgase nicht als Brennstoff i^{BS} , sondern als Reduktionsmittel genutzt, vgl. Tabelle A.4.

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$a_{i,j} \in A$	€	IO	Input aus Sektor i zur Produktion von 1 € Output des Sektors j (technischer Koeffizient)
a^{reg}	MW	AB	Regressionsparameter (Achsenabschnitt) zur Ableitung der Leistung einer GET
$abs_{s,t}^{AKT}$	€	AB	Abschreibungen des Werkes s im Jahr t
abq	-	IO	Quote, mit der sich die Abschreibungen, bezogen auf die Änderung der Energieeinsparungen, ändern
alf^{GET}	-	AB	Auslastungsfaktor einer GET
$Ant_{iET}^{KW,El}$	-	IO, AB	Anteil der in den simulierten Industriekraftwerken eingesetzten Energieträger i^{ET} am gesamten Elektrizitätssektor
$Ant_{iET,s}^{KW,El,Werk}$	-	IO, AB	Anteil der in den Industriekraftwerken eines Werkes s eingesetzten Energieträger i^{ET} am gesamten Elektrizitätssektor
$Ant_{iET}^{KW,FW}$	-	IO, AB	Anteil der in den simulierten Industriekraftwerken eingesetzten Energieträger i^{ET} am gesamten Fernwärmesektor
$Ant_{iET,s}^{KW,FW,Werk}$	-	IO, AB	Anteil der in den Industriekraftwerken eines Werkes s eingesetzten Energieträger i^{ET} am gesamten Fernwärmesektor
anz_{jPG}^U	-	IO	Anzahl der Unternehmen im Sektor j^{PG}
α_v	-	IO	Anteil des Verwendungszwecks v am Konsum
b^{reg}	$\frac{MW}{t}$	AB	Regressionsparameter (Steigung) zur Ableitung der Leistung einer GET
beg_t^{max}	-	IO, AB	Obere Begrenzung der EEG-Umlage im Jahr t
beg_t^{min}	$\frac{€}{GJ}$	IO, AB	Untere Begrenzung der EEG-Umlage im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$beg_t^{min, NEM}$	$\frac{\text{€}}{\text{GJ}}$	IO, AB	Untere Begrenzung der EEG-Umlage im Jahr t für die NE-Metallindustrie
Δbev_t	-	IO	Änderung der Bevölkerung im Jahr t ($1 \hat{=}$ keine Änderung)
$bin_{em,y,jj}^{CO2 ZP,s}$	binär	NLP	gibt an, ob sich der im PRTR berichtete Wert $geg_{em,s}^{CO2}$ auf die das Zwischenprodukt jj^{ZP} herstellende Anlage y bezieht
$bm_{jj}^{Prod ZP,t}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{\text{t}}$	AB	Produkt-Emissionswert für Zwischenprodukt jj^{ZP} im Jahr t
bm_t^{Brenn}	$\frac{\text{t CO}_2}{\text{TJ}}$	AB	Brennstoff-Emissionswert im Jahr t
$bm_t^{Wärme}$	$\frac{\text{t CO}_2}{\text{TJ}}$	AB	Wärme-Emissionswert im Jahr t
$c_{i,j,t} \in C_t$	$\frac{\text{phys. Einh.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Input aus Sektor i zur Produktion von einer Einheit des Sektors j im Jahr t (technischer Koeffizient)
$\Delta c_{i,j,t}$	-	IO	prozentuale jährliche Änderungsrate von $c_{i,j,t}$ ($1 \hat{=}$ keine Änderung)
$\widehat{\Delta c}_{iET,j,t}$	-	IO	prozentuale jährliche Änderungsrate des Energieträgereinsatzes i^{ET} zur Energiebereitstellung im Sektor j und Jahr t
$C_t^{Inverse}$	$\frac{\text{phys. Einh.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Inverse zu C_t
$C_t^{Inverse,Tech}$	$\frac{\text{phys. Einh.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO, AB	Inverse zu $C_{s,t}^{Tech}$
$c_{i,j,s,t}^{Tech} \in C_{s,t}^{Tech}$	$\frac{\text{phys. Einh.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO, AB	Input aus Sektor i zur Produktion von einer Einheit des Sektors j nach Implementierung einer Technologie am Werk s im Jahr t
$\Delta c_{i,j,s,t}^{Tech}$	-	IO, AB	Durch das Implementieren einer Technologie am Werk s im Jahr t geänderter Input des Sektors i in den Sektor j
$c_{i,j,t}^{Welt} \in C_t^{Welt}$	$\frac{\text{phys. Einh.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Input aus Sektor i (Inland und Ausland) zur Produktion von einer Einheit des Sektors j im Jahr t (technischer Koeffizient)

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$c_{i,j,s,t}^{Welt,Tech} \in C_{s,t}^{Welt,Tech}$	$\frac{\text{phys. Einh.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO, AB	Input aus Sektor i (Inland und Ausland) zur Produktion von einer Einheit des Sektors j nach Implementierung einer Technologie am Werk s im Jahr t
$caf_{te,y,jj^{ZP},s,t+\tau}$	€	AB	Cashflow für die Folgejahre τ der Investitionsentscheidung in t bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s
$caf_{s,t+\tau}^{oTe}$	€	AB	Cashflow für die Folgejahre τ der Investitionsentscheidung in t falls im Werk s keine zusätzliche Technologie implementiert wird
$cf_{i,t}^{BES}$	t C	IO	Im Bestand der Volkswirtschaft verbleibender Kohlenstoff des Sektors i im Jahr t
$cf_{i,t}^{BES,ind}$	$\frac{\text{t C}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts i im Jahr t induzierte Bestandszunahme
$cf_{i,t}^{BES,LeV}$	t C	IO	direkt und indirekt durch die gesamte Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t induzierte Bestandszunahme
$cf_{i,t}^{BES,Welt,ind}$	$\frac{\text{t C}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts i im Jahr t weltweit induzierte Bestandszunahme
$cf_{i,t}^{BES,Welt,LeV}$	t C	IO	direkt und indirekt durch die gesamte nationale Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t weltweit induzierte Bestandszunahme
$cf_{i,t}^{CH4}$	t C	IO	Durch den Sektor i im Jahr t in Form von CH ₄ emittierter Kohlenstoff
$cf_{i,t}^{CO2}$	t C	IO	Durch den Sektor i im Jahr t in Form von CO ₂ emittierter Kohlenstoff
$cf_{i,t}^{EXP}$	t C	IO	Exportierter Kohlenstoff des Sektors i im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
cge_{ii}	$\frac{t\ C}{t}$ bzw. GJ	AB, NLP	Kohlenstoffgehalt des Stoffes ii
cge_{iET}^{ET}	$\frac{t\ C}{t}$	IO	Kohlenstoffgehalt des Energieträgers i^{ET}
cge_b^{THG}	$\frac{t\ C}{t}$	IO, AB	Kohlenstoffgehalt des Treibhausgases b
$clf_{jj}^{ZP,t}$	-	AB	Carbon-Leakage-Faktor für das Zwischenprodukt jj^{ZP} im Jahr t
$clf_t^{Wärme}$	-	AB	Carbon-Leakage-Faktor für die Wärmeauskopplung im Jahr t
$cw_{j,t}^{BES}$	t C	IO	Aus dem Bestand der Volkswirtschaft durch den Sektor j im Jahr t entnommener Kohlenstoff
$cw_{i,t}^{BES,ind}$	$\frac{t\ C}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts i im Jahr t induzierte Bestandsabnahme
$cw_{i,t}^{BES,LeV}$	t C	IO	direkt und indirekt durch die gesamte Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t induzierte Bestandsabnahme
$cw_{i,t}^{BES,Welt,ind}$	$\frac{t\ C}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts i im Jahr t weltweit induzierte Bestandsabnahme
$cw_{i,t}^{BES,Welt,LeV}$	t C	IO	direkt und indirekt durch die gesamte nationale Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t weltweit induzierte Bestandsabnahme
$cw_{j,t}^{IMP}$	t C	IO	Importierter Kohlenstoff des Sektors j im Jahr t
$cw_{i,t}^{IMP,ind}$	$\frac{t\ C}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts i im Jahr t induzierte Kohlenstoff-Importe
$cw_{i,t}^{IMP,LeV}$	t C	IO	direkt und indirekt durch die gesamte Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t induzierte Kohlenstoff-Importe

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$cw_{i,t}^{IMP, Welt}$	t C	IO	Importierter Kohlenstoff des Sektors i (Inland und Ausland) im Jahr t
$cw_{j,t}^{UMW}$	t C	IO	Aus der Umwelt durch den Sektor j im Jahr t entnommener Kohlenstoff
$cw_{i,t}^{UMW, ind}$	$\frac{t \text{ C}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts i im Jahr t induzierte Umweltentnahmen
$cw_{i,t}^{UMW, LeV}$	t C	IO	direkt und indirekt durch die gesamte Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t induzierte Umweltentnahmen
$cw_{i,t}^{UMW, Welt}$	t C	IO	Im Sektor i und Jahr t durch Herstellung bzw. Import des Produkts i insgesamt induzierte weltweite Umweltentnahmen
$cw_{i,t}^{UMW, Welt, ind}$	$\frac{t \text{ C}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts i im Jahr t induzierte weltweite Umweltentnahmen
$cw_{i,t}^{Umw, Welt, LeV}$	t C	IO	direkt und indirekt durch die gesamte nationale Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t induzierte weltweite Umweltentnahmen
$cwf_{i,t}^{UMW, Welt}$	$\frac{t \text{ C}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Im Sektor i induzierte weltweite Umweltentnahmen pro hergestellter bzw. importierter Einheit des Produkts i im Jahr t
cx_i	t C	IO	gesamtes Aufkommen / gesamte Verwendung von Kohlenstoff im Sektor i
$cz_{i,j,t} \in CZ_t$	t C	IO	Kohlenstofffluss von Sektor i in Sektor j im Jahr t
$cz_j^{ges}{}_{j^{HZ}, t}^{BAS}$	t C	IO	gesamter im Halbzeug j^{HZ} im Basisjahr t^{BAS} gebundener Kohlenstoff
$d_{i,h,t} \in D_t$	phys. Einh.	IO	Endnachfrage des Abnehmers h für das Produkt i im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$\Delta d_{i,h,t}$	-	IO	prozentuale jährliche Änderungsrate von $d_{i,h,t}$ ($1 \hat{=}$ keine Änderung)
$d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT} \in \bar{d}_{s,t}^{AKT}$	t	AB	Jährliche Verkaufsmenge des Zwischenprodukts ii^{ZP} von Werk s im Jahr t (Endnachfrage)
$d_{ii^{ZP},s,t}^{AKT,Ziel} \in \bar{d}_{s,t}^{AKT,Ziel}$	t	AB	Jährliche dem Werk s durch das IO-Teilmodell vorgegebene Verkaufsmenge des Zwischenprodukts ii^{ZP} im Jahr t
$d_{ii^{ZP},t}^{AKT,Ziel,ges} \in \bar{d}_t^{AKT,Ziel,ges}$	t	IO, AB	Jährliche durch das IO-Teilmodell vorgegebene gesamte Verkaufsmenge des Zwischenprodukts ii^{ZP} im Jahr t
$d_{b,j}^{THG} \in D^{THG}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{\text{€}}$	IO	Emissionsfaktor des Treibhausgases b bezogen auf 1 € Output des Sektors j
$dif_{i,t}$	t C	IO	Differenz zwischen Aufkommen und Verwendung von Kohlenstoff im Sektor i und Jahr t
$e_{i,b,t}$	t CO ₂ -Äq.	IO	Emissionen des Treibhausgases b im Sektor i und Jahr t
$e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{AKT, Mind}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{\text{a}}$	AB	Treibhausgasemissionseinsparungen bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s und Jahr t
$e_{j^{AKT},s,t}^{dir, Mind}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{\text{a}}$	IO, AB	Im Werk s und Sektor j^{AKT} direkt am Standort realisierte Treibhausgasemissionseinsparungen nach Implementierung einer Technologie im Jahr t
$e_{j^{AKT},s,t}^{ind, Mind}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{\text{a}}$	IO, AB	Im Werk s und Sektor j^{AKT} indirekt in den Vorketten im Inland realisierte Treibhausgasemissionseinsparungen nach Implementierung einer Technologie im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$e_{s,t}^{ind,Sub}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{a}$	IO, AB	Im Werk s durch die Veräußerung von Kuppelprodukten und Substitution von primären Produkten in anderen Sektoren indirekt realisierte Treibhausgasemissionseinsparungen nach Implementierung einer Technologie im Jahr t
$e_{i,b,t}^{LeV}$	$\text{t CO}_2\text{-Äq.}$	IO	<i>Carbon Footprint</i> bezüglich des Treibhausgases b bei der Herstellung der gesamten Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t
$e_{te,y,jj^{ZP},s,t}^{Mind,ges}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{a}$	IO, AB	Im Inland realisierte Treibhausgasemissionseinsparungen (<i>Carbon Footprint</i>) bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s und Jahr t
\bar{e}^{THG}	$\text{t CO}_2\text{-Äq.}$	IO	Gesamtausstoß Treibhausgase
$e_{b,t}^{THG,Welt}$	$\text{t CO}_2\text{-Äq.}$	IO	Durch die nationale Endnachfrage weltweit induzierte Emissionen des Treibhausgases b im Jahr t
$e_{j^{AKT},s,t}^{Welt,dir,Mind}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{a}$	IO, AB	Im Werk s und Sektor j^{AKT} direkt am Standort realisierte Treibhausgasemissionseinsparungen nach Implementierung einer Technologie im Jahr t
$e_{j^{AKT},s,t}^{Welt,ind,Mind}$	$\frac{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}{a}$	IO, AB	Im Werk s und Sektor j^{AKT} indirekt in den Vorketten weltweit realisierte Treibhausgasemissionseinsparungen nach Implementierung einer Technologie im Jahr t
$e_{i,b,t}^{Welt,LeV}$	$\text{t CO}_2\text{-Äq.}$	IO	Weltweit induzierter <i>Carbon Footprint</i> bezüglich des Treibhausgases b bei der Herstellung der gesamten nationalen Endnachfrage nach Produkt i im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$e_{te,y,jj}^{Welt, Mind, ges ZP, s, t}$	$\frac{t \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{a}$	IO, AB	Weltweit realisierte Treibhausgasemissionseinsparungen (<i>Carbon Footprint</i>) bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s und Jahr t
$eeg_{j,t}$	€	IO	vom Sektor j im Jahr t zu entrichtende EEG-Umlage
$eeg_{j^{Lis},t}^{Lis} / eeg_{s^{Lis1},t}^{Lis1}$	€	IO, AB	vom Sektor j^{Lis} bzw. Werk s^{Lis1} im Jahr t zu entrichtende EEG-Umlage, unabhängig der gegebenen Begrenzungen
$eeg_{j^{Lis},t}^{max} / eeg_{s^{Lis},t}^{max}$	€	IO, AB	Begrenzung der EEG-Umlage (Maximum) im Sektor j^{Lis} bzw. im Werk s^{Lis} und Jahr t
$eeg_{j^{Lis},t}^{min} / eeg_{s^{Lis},t}^{min}$	€	IO, AB	Begrenzung der EEG-Umlage (Minimum) im Sektor j^{Lis} bzw. im Werk s^{Lis} und Jahr t
eeu_t	$\frac{€}{GJ}$	IO, AB	EEG-Umlage (Steuersatz) im Jahr t
$eeu_t^{BWS, Lis1}$	-	IO, AB	Anteil an der Bruttowertschöpfung, welcher zur Bestimmung der EEG-Umlage für Branchen der Liste 1 im Jahr t dient
$eeu_t^{BWS, Lis2}$	-	IO	Anteil an der Bruttowertschöpfung, welcher zur Bestimmung der EEG-Umlage für Branchen der Liste 2 im Jahr t dient
$ef_{i,b,t} \in \bar{ef}_{b,t}$	$\frac{t \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Emissionsfaktor des Treibhausgases b bei der Herstellung von Produkt i im Jahr t
$ef_{i,b,t}^{ind} \in \bar{ef}_{b,t}^{ind}$	$\frac{t \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	<i>Carbon Footprint</i> bezüglich des Treibhausgases b bei der Herstellung von Produkt i im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$e_{i,b,s,t}^{ind,Tech} \in \frac{\overline{\gamma}_{i,b,s,t}^{ind,Tech}}{e_{b,s,t}}$	$\frac{t \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO, AB	<i>Carbon Footprint</i> (Inland) bezüglich des Treibhausgases b bei der Herstellung von Produkt i nach Implementierung einer Technologie am Werk s im Jahr t
$e_{i,b,s,t}^{Welt,ind,Tech} \in \frac{\overline{\gamma}_{i,b,s,t}^{Welt,ind,Tech}}{e_{b,s,t}}$	$\frac{t \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO, AB	<i>Carbon Footprint</i> (weltweit) bezüglich des Treibhausgases b bei der Herstellung von Produkt i nach Implementierung einer Technologie am Werk s im Jahr t
$e_{i,b,t}^{Welt,ind} \in \frac{\overline{\gamma}_{i,b,t}^{Welt,ind}}{e_{b,t}}$	$\frac{t \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Weltweit induzierter <i>Carbon Footprint</i> bezüglich des Treibhausgases b bei der Herstellung von Produkt i im Jahr t
$\Delta eff_{i,t}^H$	-	IO	Effizienzänderungen beim privaten Konsum des Produkts i im Jahr t ($1 \hat{=}$ keine Änderung)
eff^{Da}	-	AB	Wirkungsgrad der Dampferzeugung im Kraftwerk (ohne den zur Elektrizitätserzeugung verwendeten Dampf)
eff^{El}	-	AB	Wirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung im Kraftwerk
ekq	-	AB	Durchschnittliche Eigenkapitalquote
$ela_{j,t}^{St1}$	€	IO	Entlastung (Ökosteuer, Stufe 1) für Sektor j im Jahr t
$ela_{j,t}^{St2}$	€	IO	Entlastung (Ökosteuer, Stufe 2) für Sektor j im Jahr t (Spitzenausgleich)
$ene_{j,t}^C$	-	IO	Energetisch genutzter Anteil des Kohlenstoffs im Sektor j und Jahr t
eng_{ii}^{ET}	$\frac{GJ}{t}$	AB	Energiegehalt des Energieträgers ii^{ET}
$ent_{iET,j,t} \in ENT_t$	TJ	IO	Input des Energieträgers i^{ET} in Sektor j im Jahr t (Energieträgermatrix)

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$ent'_{iET',j',tBAS} \in ENT'_{tBAS}$	TJ	IO	Input des Energieträgers $i^{ET'}$ in Sektor j' im Basisjahr t^{BAS} (ursprüngliche Energieträgermatrix des Statistischen Bundesamtes)
$erl_{pos,te,y,jjZP,s,t}$	€	AB	Erlösposition pos bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s und Jahr t
ers_t^{SPA}	-	IO	Erstattungssatz im Spitzenausgleich für Jahr t
$ev_{iET,jHZ,tBAS}^{Verb}$	TJ	IO	Emissionsrelevanter Verbrauch des Energieträgers i^{ET} im Sektor j^{HZ} im Basisjahr t^{BAS}
$ev_{iET,jHZ,tBAS}^{Verw}$	TJ	IO	Verwendung des Energieträgers i^{ET} im Sektor j^{HZ} im Basisjahr t^{BAS}
E^{spez}	$\frac{MJ}{kg}$	AB	spezifischer Energiebedarf der Aluminiumelektrolyse
η	-	AB	Stromausbeute Aluminiumelektrolyse
$f_{i,h,t} \in F_t$	Mio. €	IO	Endnachfrage des Abnehmers h für das Produkt i im Jahr t
fak^{Aufs}	-	AB	Faktor zur Berücksichtigung des Aufsichtspersonals in den Personalkosten
fak^{BeS}	-	AB	Faktor zur Berücksichtigung des Verbrauchs an Betriebsstoffen in den Kosten für Reparatur und Instandhaltung
fak^{Lab}	-	AB	Faktor zur Berücksichtigung des Personals für Laborarbeiten in den Personalkosten
fix_i	€	IO	fixer, von klimapolitischen Instrumenten unabhängiger Teil der Gütersteuern im Sektor i
$geg_{em,s}^{CO2}$	t	NLP	Für das Werk s im PRTR berichtete CO ₂ -Emissionen em

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$gew_{te,y,jj}^{ZP,s,t}$	€	AB	Gewinn bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s und Jahr t
hw_i^{ET}	$\frac{MJ}{kg}$	IO	Heizwert des Energieträgers i^{ET}
\vec{i}	-	IO	Spaltenvektor der Dimension n , bestehend aus Einsen
$ik_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	AB, NLP	Input des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y im Werk s und Jahr t
$ik_{ii,jj}^{max,ZP}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	AB, NLP	Maximaler Input des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} (technische Grenze)
$ik_{ii,jj}^{med,ZP}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	NLP	Durchschnittlicher Input des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP}
$ik_{ii,jj}^{min,ZP}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	AB, NLP	Minimaler Input des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} (technische Grenze)
$\Delta ik_{te,ii,jj}^{tech,ZP}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	AB	Durch die Implementierung der Technologie te hervorgerufene Inputänderung des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP}
$ik_{ii,y,jj}^{Werk,ZP,s}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	NLP	Input des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y bezogen auf das Referenzprodukt des Werks s
$ik_{ii,y,jj}^{Werk,ext,ZP,s}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	NLP	extern zugekaufter Input des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y bezogen auf das Referenzprodukt des Werks s
$ik_{ii,y,jj}^{Werk,int,ZP,s}$	$\frac{kg \text{ bzw. MJ}}{t}$	NLP	werksintern produzierter Input des Stoffes ii zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y bezogen auf das Referenzprodukt des Werks s

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$imz_{jAKT,t}$	-	IO, AB	Zusätzlich notwendige Importe aufgrund nicht ausreichender Kapazitäten des Sektors j^{AKT} im Jahr t
$in_{ii,y,s,t}^{KW}$	GJ	AB, NLP	Jährlicher Input des Stoffes ii in das Kraftwerk y am Standort des Werks s im Jahr t
$in_{ii,y,s,t}^{KW,Tech}$	GJ	AB	Jährlicher Input des Stoffes ii in das Kraftwerk y am Standort des Werks s im Jahr t nach Implementierung einer Technologie
inv_{te}^{Ref}	€	AB	Referenzinvestition für Technologie te
$inv_{te,y,jjZP,s,t}^{Tech}$	€	AB	Investitionen für die Implementierung der Technologie te an der Anlage y , welche das Zwischenprodukt jj^{ZP} produziert, im Werk s und Jahr t
$inv_{s,t}^{Werk}$	€	AB	gesamte Anlageinvestitionen eines Werks s im Jahr t
I	-	IO	Einheitsmatrix der Dimensionen $n \times n$
\vec{j}	-	IO	Spaltenvektor der Dimension m , bestehend aus Einsen
$k_{pos,te,y,jjZP,s,t}$	€	AB	Kostenposition pos bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s und Jahr t
\vec{k}	-	IO	Spaltenvektor der Dimension l , bestehend aus Einsen
$kap_{y,jjZP,s}$	$\frac{t}{a}$	AB, NLP	Kapazität der Anlage y zur Produktion des Zwischenprodukts jj^{ZP} im Werk s
$kap_{iiZP,s,t}^{frei}$	$\frac{t}{a}$	AB	Ungenutzte Kapazität des Werkes s zur Produktion des Zwischenprodukts ii^{ZP} im Jahr t
kap_{te}^{Ref}	$\frac{t}{a}$ bzw. $\frac{GJ}{a}$ bzw. MW	AB	Referenzkapazität der Technologie te
$kap^{Ref,Per}$	$\frac{t}{d}$	AB	Referenzkapazität (Personal)

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$kon_{v,t}^{soll}$	Mio. €	IO	In der Vergangenheit beobachteter Konsum des Verwendungszwecks v im Jahr t
kst	-	AB	Körperschaftssteuersatz
$kvt_{i,v} \in KVT$	Mio. €	IO	Monetäre Ströme der Sektoren i an die Verwendungszwecke v (Konsumverflechtungstabelle)
$kw_{te,y,jj^{ZP},s,t}$	€	AB	Kapitalwert bei Implementierung der Technologie te an der das Zwischenprodukt jj^{ZP} produzierenden Anlage y im Werk s und Jahr t
κ	-	AB	Größendegressionsexponent (Investition)
κ^{Per}	-	AB	Größendegressionsexponent (Personal)
l	-	IO	Anzahl Wertschöpfungskategorien
ld_{te}	a	AB	Lebensdauer der Technologie te
ld^{Werk}	a	AB	durchschnittliche Lebensdauer aller Anlagen eines Werkes
lkf_t	-	AB	linearer Kürzungsfaktor im Jahr t
L	$\frac{€}{€}$	IO	Leontief-Inverse
$\lambda_{i,ii} \in \Lambda$	binär	IO, AB	gibt an, ob der Stoff ii dem Sektor i zuordenbar ist oder nicht
m	-	IO	Anzahl Endnachfragebereiche (Abnehmer)
$mar_{jj^{ZP},s}$	$\frac{t}{a}$	AB	maßgebliche Aktivitätsrate zur Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} im Werk s (ZuV)
meq	-	IO	Quote Masseneinkommen bezogen auf Nettolohn
μ_v	Mio. €	IO	Mindestkonsum des Verwendungszwecks v
n	-	IO	Anzahl Sektoren
nlq	-	IO	Quote Nettolohn bezogen auf Brutto-Arbeitsentgelt

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
nm_s^{KW}	-	AB	Anzahl der Kraftwerke am Standort des Werks s
o	-	IO	Anzahl Stoffe
$oek_{j,t}$	€	IO	vom Sektor j im Jahr t zu entrichtende Ökosteuern
$ok_{ii,y,jj}^{ZP,s,t}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	AB, NLP	Output des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y im Werk s und Jahr t
$ok_{ii,jj}^{max,ZP}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	AB, NLP	Maximaler Output des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} (technische Grenze)
$ok_{ii,jj}^{med,ZP}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	NLP	Durchschnittlicher Output des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP}
$ok_{ii,jj}^{min,ZP}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	AB, NLP	Minimaler Output des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} (technische Grenze)
$\Delta ok_{te,ii,jj}^{tech,ZP}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	AB	Durch die Implementierung der Technologie te hervorgerufene Outputänderung des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP}
$ok_{ii,y,jj}^{Werk,ZP,s}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	NLP	Output des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y bezogen auf das Referenzprodukt des Werks s
$ok_{ii,y,jj}^{Werk,ext,ZP,s}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	NLP	nicht im Werk genutzter Output des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y bezogen auf das Referenzprodukt des Werks s
$ok_{ii,y,jj}^{Werk,int,ZP,s}$	$\frac{\text{kg bzw. MJ}}{t}$	NLP	werksintern genutzter Output des Stoffes ii bei der Herstellung des Zwischenprodukts jj^{ZP} in Anlage y bezogen auf das Referenzprodukt des Werks s
$ost_{i,ET,t}$	$\frac{€}{GJ}$	IO	Normalsteuersatz (Ökosteuern) auf Energieträger i^{ET} im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$ost_{iET,t}^{INT}$	$\frac{\text{€}}{\text{GJ}}$	IO, AB	Steuersatz (Ökoststeuer) auf Energieträger i^{ET} im Jahr t für energieintensive Sektoren
$ost_{iET,t}^{PG}$	$\frac{\text{€}}{\text{GJ}}$	IO	Steuertentlastungssatz (Ökoststeuer, Stufe 1) auf Energieträger i^{ET} im Jahr t
$ost_{iET,t}^{SPA}$	$\frac{\text{€}}{\text{GJ}}$	IO	Maximaler Steuertentlastungssatz (Ökoststeuer, Stufe 2) auf Energieträger i^{ET} im Jahr t
$ou_{ii,y,s,t}^{KW}$	GJ bzw. t	AB, NLP	Jährlicher Output des Stoffes ii des Kraftwerks y am Standort des Werks s im Jahr t
$\omega_{s,iiEP} \in \Omega$	binär	IO, AB	gibt an, ob das Endprodukt ii^{EP} im Werk s hergestellt wird oder nicht
\tilde{p}	-	IO	Preise der jeweiligen Produkte (Preisindex)
$p_{i,t} \in \tilde{p}$	-	IO	Herstellungspreis für Produkt i im Jahr t (Preisindex)
$p_{v,t}^{AN}$	-	IO	Anschaffungspreis für Verwendungszweck v im Jahr t (Preisindex)
p_t^{CO2}	$\frac{\text{€}}{\text{t CO}_2\text{-Äq.}}$	IO, AB	Preis für Emissionszertifikate im Jahr t
$\bar{p}_{ii,t}^{Ein} \in \tilde{p}_t^{Ein}$	$\frac{\text{€}}{\text{t bzw. GJ}}$	AB	Einkaufspreis für Stoff ii im Jahr t
$p_{iET',tBAS}^{ET}$	$\frac{\text{Mio. €}}{\text{TJ}}$	IO	Preis auf Energieträger $i^{ET'}$ im Basisjahr t^{BAS}
p_t^{Las}	-	IO	Preisindex nach Laspeyres für das Jahr t
$p_{v,t}^{norm}$	-	IO	auf das Basisjahr normierter Preis für Verwendungszweck v im Jahr t (Preisindex)
$p_{ii,t}^{Ver} \in \tilde{p}_t^{Ver}$	$\frac{\text{€}}{\text{t bzw. GJ}}$	AB	Verkaufspreis für Stoff ii im Jahr t
pe_z^{Ref}	$\frac{\text{h}}{\text{d}}$	AB	Referenzpersonaleinsatz
$pk_{s,t}$	$\frac{\text{€}}{\text{h}}$	AB	Personalkostensatz im Werk s und Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
prs^{Adm}	-	AB	Ausgaben für die Administration abhängig von den Personalkosten (Prozentsatz)
prs^{Dis}	-	AB	Ausgaben für die Distribution und das Marketing abhängig von den Herstellkosten (Prozentsatz)
prs^{FK}	-	AB	Fremdkapitalzinssatz
prs^{FuE}	-	AB	Ausgaben für die Forschung und Entwicklung abhängig von den Herstellkosten (Prozentsatz)
prs^{OH}	-	AB	Overhead-Kosten abhängig von den Personalkosten und den Kosten für Reparatur und Instandhaltung (Prozentsatz)
prs^{Rep}	-	AB	Kosten für Reparatur und Instandhaltung abhängig von den Anlageinvestitionen (Prozentsatz)
prs^{Ste}	-	AB	Lokalsteuern abhängig von den Anlageinvestitionen (Prozentsatz)
prs^{Vers}	-	AB	Sachversicherungen abhängig von den Anlageinvestitionen (Prozentsatz)
$pw_{j,t}^{BAS}$	Mio. €	IO	Produktionswert des Sektors j im Basisjahr t^{BAS}
$\pi_{g,j,t} \in \Pi_t$	-	IO	Preis für Primärintput g des Produkts j im Jahr t (Preisindex)
$\Delta\pi_{g,j,t}$	-	IO	prozentuale jährliche Änderungsrate von $\pi_{g,j,t}$ ($1 \hat{=}$ keine Änderung)
$q_{j,t} \in \vec{q}_t$	phys. Einh.	IO	Im Sektor j und Jahr t produzierte Menge (Output, Gesamtbedarf)
$q_{ii,s,t}^{AKT} \in \vec{q}_{s,t}^{AKT}$	t bzw. GJ	AB	Jährliche Inputs (> 0) bzw. Outputs (< 0) des Stoffes ii zur Befriedigung der Verkaufsmenge von Werk s im Jahr t (Gesamtbedarf)

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$q_{ii,s,t}^{AKT,oKP} \in \bar{q}_{s,t}^{AKT,oKP}$	t bzw. GJ	AB	Jährliche Inputs (> 0) bzw. Outputs (< 0) des Stoffes ii zur Befriedigung der Verkaufsmenge von Werk s im Jahr t (Gesamtbedarf) ohne Berücksichtigung der Entstehung von Kuppelprodukten, welche in unzureichendem Umfang anfallen würden
$q_{ii,s,t}^{AKT,oTe}$	t bzw. GJ	AB	Jährliche Inputs (> 0) bzw. Outputs (< 0) des Stoffes ii zur Befriedigung der Verkaufsmenge von Werk s im Jahr t , falls keine zusätzliche Technologie implementiert wird
$q_{j,t}^{Welt} \in \bar{q}_t^{Welt}$	phys. Einh.	IO	Im Sektor j (Inland und Ausland) und Jahr t produzierte Menge (Output) zur Befriedigung der nationalen Endnachfrage
Q^{spez}	$\frac{As}{kg}$	AB	Spezifische elektrische Ladung bei der Aluminiumelektrolyse
rvb_t^{nach}	-	IO	Rentenversicherungsbeitrag nach ökologischer Steuerreform
rvb_t^{vor}	-	IO	Rentenversicherungsbeitrag vor ökologischer Steuerreform
sbh_t^{PG}	€	IO	Selbstbehalt im Jahr t (Ökosteuer, Stufe 1)
$scj_{i,t}^{EXP}$	$\frac{t C}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Kohlenstoffgehalt des Produkts i , welches im Jahr t exportiert wird
$scw_{j,t}^{IMP}$	$\frac{t C}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Kohlenstoffgehalt des Produkts j , welches im Jahr t importiert wird
$scz_{i,j,t} \in SCZ_t$	$\frac{t C}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Kohlenstoffgehalt des Produkts i , welches in den Sektor j im Jahr t geliefert wird
sk_t^{Lis1}	€	IO, AB	Stromkostenintensität nach Branchenliste 1 des EEG im Jahr t
sk_t^{Lis2}	€	IO	Stromkostenintensität nach Branchenliste 2 des EEG im Jahr t
sob_t^{SPA}	€	IO	Sockelbetrag im Jahr t (Ökosteuer, Stufe 2)
spq	-	IO	Sparquote

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
st	-	AB	Anzahl Implementierungsschritte für kontinuierliche Maßnahmen
ste_i	-	IO	Quote Anschaffungspreise bezogen auf Herstellungspreise für Sektor i (Steuern)
$suk_{ii}^{int}{}_{jj}{}^{ZP},s$	$\frac{t}{t}$	NLP	Im Werk s hergestellte Menge des Zwischenprodukts ii^{ZP} pro hergestellter Menge des Zwischenprodukts jj^{ZP} (werksinterner SUK)
$suk_{ii}^{int,Anlage}{}_{jj}{}^{ZP},s$	$\frac{t}{t}$	NLP	Im Werk s und Anlage y hergestellte Menge des Zwischenprodukts ii^{ZP} pro hergestellter Menge des Zwischenprodukts jj^{ZP} (werksinterner SUK)
$suk_{ii}{}_{jj}{}^{ZP},s$	$\frac{t}{t}$	NLP	Für die Produktion von jj^{ZP} im Werk s benötigte Menge an Zwischenprodukt ii^{ZP} (technischer SUK)
$tec_{ii,jj,s,t} \in TEC_{s,t}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	AB	Input bzw. Output des Stoffes ii zur Produktion von jj im Werk s und Jahr t (Technologiematrix)
$tec_{ii,jj,t}^{avg} \in TEC_t^{avg}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	AB	durchschnittlicher Input bzw. Output des Stoffes ii zur Produktion von jj im Jahr t (durchschnittliche Technologiematrix)
$tec_{ii,jj,s,t}^{avg,Tech} \in TEC_{s,t}^{avg,Tech}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	AB	durchschnittlicher Input bzw. Output des Stoffes ii zur Produktion von jj im Jahr t nach Implementierung einer zusätzlichen Technologie am Werk s
$tec_{i,j,t}^{PB,PB} \in TEC_t^{PB,PB}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	IO, AB	durchschnittliche Technologiematrix im Jahr t , die zeilen- und spaltenweise den Sektoren i und j entspricht

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$tec_{i,j,s,t}^{PB,PB,Tech} \in TEC_{s,t}^{PB,PB,Tech}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	IO, AB	durchschnittliche Technologiematrix nach Implementierung einer zusätzlichen Technologie am Werk s im Jahr t , die zeilen- und spaltenweise den Sektoren i und j entspricht
$tec_{ii,jj,s,t}^{oKP} \in TEC_{s,t}^{oKP}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	AB	Input bzw. Output des Stoffes ii zur Produktion von jj im Werk s und Jahr t (Technologiematrix) ohne Berücksichtigung der Entstehung von Kuppelprodukten, welche in unzureichendem Umfang anfallen würden
$tec_{ii,j,t}^{Stoff,PB} \in TEC_t^{Stoff,PB}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	IO, AB	durchschnittliche Technologiematrix im Jahr t , die zeilenweise die Stoffe ii und spaltenweise die Sektoren j enthält
$tec_{ii,jj,s,t}^{Tech} \in TEC_{s,t}^{Tech}$	$\frac{t \text{ bzw. GJ}}{t}$	AB	Input bzw. Output des Stoffes ii zur Produktion von jj im Werk s und Jahr t nach Implementierung einer Technologie
trw_b / trw_{ii}^{THG}	$\frac{t \text{ CO}_2\text{-Äq.}}{t}$	IO, AB	Treibhauswirksamkeit des Treibhausgases b bzw. ii^{THG}
typ_{te}	-	AB	Typ der Technologie te
$u_{g,j,t} \in U_t$	$\frac{\text{phys. Einh.}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	Primärinput (Wertschöpfung) der Kategorie g zur Produktion von einer Einheit des Sektors j im Jahr t (technischer Koeffizient)
$\Delta u_{g,j,t}$	-	IO	prozentuale jährliche Änderungsrate von $u_{g,j,t}$ ($1 \hat{=}$ keine Änderung)
$U_{Spannung}$	V	AB	Zellspannung bei der Aluminiuelektrolyse
vek_t	Mio. €	IO	im Jahr t für Konsumzwecke zur Verfügung stehendes Einkommen
$w_{g,j,t} \in W_t$	Mio. €	IO	Primärinput (Wertschöpfung) der Kategorie g für das Produkt j im Jahr t

Tabelle A.2.: In der Modellierung verwendete Parameter und Variablen (IO: Input-Output-Teilmodell, AB: aktorsbasiertes Teilmodell, NLP: nichtlineares Optimierungsmodell)

Notation	Einheit	Teilmodell	Bezeichnung
$w_{g,j,t}^{ind} \in W_t^{ind}$	$\frac{\text{€}}{\text{phys. Einh.}}$	IO	direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einer Einheit des Produkts j im Jahr t induzierter Einsatz von Primärinput g
$w_{g,j,t}^{LeV} \in W_t^{LeV}$	Mio. €	IO	direkt und indirekt durch die gesamte Endnachfrage nach Produkt j im Jahr t induzierter Einsatz von Primärinput g
\bar{w}_g^x	$\frac{\text{€}}{\text{€}}$	IO	Einsatz Primärinput g pro 1 € Output der jeweiligen Sektoren
$x_{i,t} \in \bar{x}_t$	Mio. €	IO	Im Sektor i und Jahr t produzierte Menge (Output, Gesamtbedarf)
$z_{i,j,t} \in Z_t$	Mio. €	IO	Güterstrom von Sektor i zu Sektor j im Jahr t
$z''_{i'',j'',tBAS} \in Z''_{tBAS}$	Mio. €	IO	Güterstrom von Sektor i'' zu Sektor j'' im Basisjahr t^{BAS} (ursprüngliche IO-Tabelle des statistischen Bundesamtes)
$z^{vorl}_{iET,j,tBAS} \in Z^{vorl}_{tBAS}$	Mio. €	IO	Güterstrom von Sektor i^{ET} zu Sektor j im Basisjahr t^{BAS} (vorläufige, nicht konsistente IO-Tabelle)
z_i	-	AB	Zinssatz (Renditeerwartung beim Kapitalwertkriterium)
$zut_{jETS,t}$	t CO ₂ -Äq.	IO	Im Sektor j^{ETS} kostenlos für das Jahr t zugeteilte Emissionsberechtigungen
$zut_{jjZP,s,t}^{AKT}$	t CO ₂ -Äq.	AB	Zur Produktion von jj^{ZP} an das Werk s kostenlos für das Jahr t zugeteilte Emissionsberechtigungen
$zut_{s,t}^{AKT,KW}$	t CO ₂ -Äq.	AB	Den Industriekraftwerken am Standort des Werks s kostenlos für das Jahr t zugeteilte Emissionsberechtigungen

A.2. Im makroökonomischen Teilmodell berücksichtigte Sektoren

Tabelle A.3.: Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im akteursbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen (StaBa: Statistisches Bundesamt [65])

Sektor- klassifi- zierung (StaBa)	Sektor- klassifi- zierung (IO-Teil- modell)	Bezeichnung	Index	enthaltene Stoffe des aktorsbasierten Teilmodells
1	1	Erzeugnisse der Landwirtschaft und Jagd	i^{DL}	-
2	2	Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und DL ¹	$(i^{ET})^2$	-
3	3	Fische und Fischereierzeugnisse	i^{DL}	-
4	4	Steinkohlenbergbau u. -brikettherstellung	$i^{ET}, i^{PG},$ i^{Lis1}	Kohle
	5	Braunkohlenbergbau u. -brikettherstellung	i^{ET}, i^{PG}	-
	6	Torfgewinnung u. -veredlung	i^{DL}, i^{PG}	-
5	7	Erdöl, DL für Erdölgewinnung	$i^{ET}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
	8	Erdgas, DL für Erdgasgewinnung	$i^{ET}, i^{PG},$ i^{Lis2}	Erdgas
6	9	Uran- und Thoriumerze	i^{DL}, i^{PG}	-
7	10	Erze	$i^{DL}, i^{PG},$ i^{Lis2}	Eisenerz, Bauxit
8	11	Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	$(i^{ET})^3, i^{PG},$ i^{Lis1}	-
9	12	Nahrungs- und Futtermittel	$i^{DL}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
10	13	Getränke	$i^{DL}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-

Tabelle A.3.: Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im aktorsbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen (StaBa: Statistisches Bundesamt [65])

Sektor- klassifi- zierung (StaBa)	Sektor- klassifi- zierung (IO-Teil- modell)	Bezeichnung	Index	enthaltene Stoffe des aktorsbasierten Teilmodells
11	14	Tabakerzeugnisse	$i^{DL}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
12	15	Textilien	$i^{DL}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
13	16	Bekleidung	$i^{DL}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
14	17	Leder und Lederwaren	$i^{DL}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
15	18	Holz; Holz-, Kork-, Flechtwaren (ohne Möbel)	$i^{HZ}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
16	19	Holzstoff, Zellstoff, Papier, Karton und Pappe	$i^{HZ}, i^{ETS},$ i^{PG}, i^{Lis1}	-
17	20	Papier-, Karton- und Pappwaren	$i^{EP}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
18	21	Verlagserzeugnisse	i^{EP}, i^{PG}	-
19	22	Druckerzeugnisse, bespielte Ton-, Bild- und Datenträger	$i^{EP}, i^{PG},$ i^{Lis2}	-
20	23	Kokerei	$i^{ET}, i^{ETS},$ i^{PG}, i^{Lis2}	Koks, Teer
	24	Mineralölverarbeitung	$i^{ET}, i^{ETS},$ i^{PG}, i^{Lis1}	Schweröl, Diesel, Petrolkoks, Leichtöl
	25	H. u. Verarb. v. Spalt- u. Brutstoffen	i^{DL}, i^{PG}	-
21	26	Pharmazeutische Erzeugnisse	$i^{HZ}, i^{PG},$ i^{Lis1}	-

Tabelle A.3.: Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im akteursbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen (StaBa: Statistisches Bundesamt [65])

Sektor- klassifi- zierung (StaBa)	Sektor- klassifi- zierung (IO-Teil- modell)	Bezeichnung	Index	enthaltene Stoffe des aktorsbasierten Teilmodells
22	27	Chemische Erzeugnisse (ohne pharmazeutische Erzeugnisse)	$i^{HZ}, i^{ETS}, i^{PG}, i^{Lis1}$	Steinkohlenteerpech, Benzol, Sauerstoff, Stickstoff, Natriumhydroxid, Calciumoxid, Aluminiumfluorid, Argon
23	28	Gummiwaren	i^{HZ}, i^{PG}, i^{Lis2}	-
24	29	Kunststoffwaren	$(i^{EP})^4, i^{PG}, i^{Lis1}$	Kunststoff
25	30	Glas und Glaswaren	$i^{HZ}, i^{ETS}, i^{INT}, i^{PG}, i^{Lis1}$	-
26	31	Keramik, bearbeitete Steine und Erden	$i^{HZ}, i^{ETS}, i^{INT}, i^{PG}, i^{Lis1}$	Kalk
27	32	Roheisen, Stahl, Rohre und Halbzeug daraus	$i^{HZ}, i^{ETS}, i^{INT}, i^{PG}, i^{Lis1}$	Sinter, Roheisen, Rohstahl, Walzstahl, Stahlschrott
28	33	Aluminium und Halbzeug daraus	$i^{HZ}, i^{ETS}, i^{INT}, i^{PG}, i^{Lis1}, i^{NEM}$	Aluminiumoxid, Flüssigaluminium, Rohaluminium, Aluminiumprod., Aluminiumschrott
	34	NE-Metalle und Halbzeug daraus (ohne Aluminium)	$i^{HZ}, i^{ETS}, i^{INT}, i^{PG}, i^{Lis1}, i^{NEM}$	Stahllegierungen (Nickel), Aluminiumlegierungen (Magnesium)
29	35	Gießereierzeugnisse	$i^{HZ}, i^{INT}, i^{PG}, i^{Lis1}$	-
30	36	Metallerzeugnisse	$i^{EP}, i^{INT}, i^{PG}, i^{Lis2}$	-

Tabelle A.3.: Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im aktorsbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen (StaBa: Statistisches Bundesamt [65])

Sektor- klassifi- zierung (StaBa)	Sektor- klassifi- zierung (IO-Teil- modell)	Bezeichnung	Index	enthaltene Stoffe des aktorsbasierten Teilmodells
31	37	Maschinen	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
32	38	Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräte und -einrichtungen	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
33	39	Elektroden	$i_{i^{EP}, i^{PG}}$	Anode, Anodenstumpf, Graphitelektrode, Kathode
	40	Geräte der Elektrizitätserzeugung, -verteilung u.Ä.	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
34	41	Nachrtechn., Rundf- und Fernsehgeräte, elektron. Bauelemente	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
35	42	Medizin-, mess-, regelungstechn., optische Erzeugnisse; Uhren	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
36	43	Kraftwagen und Kraftwagenteile	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
37	44	Sonstige Fahrzeuge (Wasser-, Schienen-, Luftfahrzeuge u.a.)	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
38	45	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte, Spielwaren u.Ä.	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis2}}$	-
39	46	Sekundärrohstoffe	$i_{i^{EP}, i^{PG}, i^{Lis1}}$	-
40	47	Elektrizitätsversorgung (i^{El})	$i_{i^{ET}, i^{ETS}, i^{PG}}$	Elektrizität

Tabelle A.3.: Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im aktorsbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen (StaBa: Statistisches Bundesamt [65])

Sektor- klassifi- zierung (StaBa)	Sektor- klassifi- zierung (IO-Teil- modell)	Bezeichnung	Index	enthaltene Stoffe des aktorsbasierten Teilmodells
	48	Fernwärmeversorgung (i^{FW})	i^{ET} , i^{ETS} , i^{PG}	Dampf
41	49	Gase, DL der Gasversorgung	i^{ET} , i^{PG}	Gichtgas, Kokereigas, Konvertergas
42	50	Wasser und DL der Wasserversorgung	i^{DL} , i^{PG}	-
43	51	Vorb. Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten	i^{HZ} , i^{PG}	-
44	52	Bauinstallations- und sonstige Bauarbeiten	i^{HZ} , i^{PG}	-
45	53	Handelsleist. mit Kfz; Rep. an Kfz; Tankleistungen	i^{DL}	-
46	54	Handelsvermittlungs- und Großhandelsleistungen	i^{DL}	-
47	55	Einzelhandelsleistun- gen; Reparatur an Gebrauchsgütern	i^{DL}	-
48	56	Beherbergungs- und Gaststätten-DL	i^{DL}	-
49	57	Eisenbahn-DL	i^{DL}	-
50	58	Sonst. Landv.leistungen, Transportleistungen in Rohrfernleitungen	i^{DL}	-
51	59	Schifffahrtsleistungen	i^{DL}	-
52	60	Luftfahrtsleistungen	i^{DL}	-

Tabelle A.3.: Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im akteursbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen (StaBa: Statistisches Bundesamt [65])

Sektor- klassifi- zierung (StaBa)	Sektor- klassifi- zierung (IO-Teil- modell)	Bezeichnung	Index	enthaltene Stoffe des aktorsbasierten Teilmodells
53	61	DL bezüglich Hilfs- und Nebentätigkeiten für den Verkehr	i^{DL}	-
54	62	Nachrich- tenübermittlungs-DL	i^{DL}	-
55	63	DL der Kreditinstitute	i^{DL}	-
56	64	DL der Versicherungen (ohne Sozialversicherung)	i^{DL}	-
57	65	DL des Kredit- und Versicherungshilfsge- werbes	i^{DL}	-
58	66	DL des Grundstücks- und Wohnungswesens	i^{DL}	-
59	67	DL der Vermietung beweglicher Sachen (ohne Personal)	i^{DL}	-
60	68	DL der Datenverarbeitung und von Datenbanken	i^{DL}	-
61	69	Forschungs- und Ent- wicklungsleistungen	i^{DL}	-
62	70	Unternehmensbezoge- ne DL	i^{DL}	-
63	71	DL der öffentlichen Verwaltung, Verteidigung	i^{DL}	-
64	72	DL der Sozialversicherung	i^{DL}	-

Tabelle A.3.: Im IO-Teilmodell berücksichtigte Sektoren und deren Abgrenzungen zur regulären IO-Tabelle des Statistischen Bundesamtes sowie zu den im akteursbasierten Teilmodell verwendeten Stoffen (StaBa: Statistisches Bundesamt [65])

Sektor- klassifi- zierung (StaBa)	Sektor- klassifi- zierung (IO-Teil- modell)	Bezeichnung	Index	enthaltene Stoffe des aktorsbasierten Teilmodells
65	73	Erziehungs- und Unterrichts-DL	i^{DL}	-
66	74	DL des Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesens	i^{DL}	-
67	75	Abwasser-, Abfallbeseitigungs- u. sonst. Entsorgungsleistungen	i^{DL}	-
68	76	DL von Interessenver- tretungen, Kirchen u.Ä.	i^{DL}	-
69	77	Kultur-, Sport- und Unterhaltungs-DL	i^{DL}	-
70	78	Sonstige DL	i^{DL}	-
71	79	DL privater Haushalte	i^{DL}	-
	80	(Private Haushalte) ⁵	i^{DL}	-

¹ DL: Dienstleistungen

² Dem Sektor *Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und DL* wird auch die zur energetischen Nutzung bereitgestellte Biomasse zugerechnet, weshalb der Sektor in der KIO-Tabelle als Kohlenstofflieferant unter die Teilmenge i^{ET} fällt, jedoch nicht im Rahmen der Ökosteuer (monetäre IO-Tabelle) adressiert wird.

³ Der Sektor *Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse* repräsentiert eigentlich keinen Energieträger. Da jedoch das Brennen von Calciumcarbonat (CaCO_3), welches diesem Sektor zugeordnet werden kann, maßgeblich die CO_2 -Emissionen in der Zementindustrie beeinflusst, wird ersterer als bedeutender Kohlenstofflieferant betrachtet und in der KIO-Tabelle der Teilmenge i^{ET} zugeordnet.

⁴ Eine andere Möglichkeit stellt die Klassifikation des Sektors *Kunststoffwaren* als Halbzeug i^{HZ} dar. Da jedoch Kunststoff als das wichtigste Vorprodukt durch die Chemieindustrie bereitgestellt und der darin enthaltene Kohlenstoff zum größten Teil chemisch in den Kunststoffwaren gebunden wird, erscheint eine Klassifizierung als Endprodukt i^{EP} sinnvoller.

⁵ Die privaten Haushalte werden nur innerhalb der KIO-Tabelle als zusätzlicher Sektor betrachtet. In der monetären IO-Tabelle werden sie hingegen dem Endnachfragebereich zugeordnet.

A.3. Im technisch-betriebswirtschaftlichen Teilmodell berücksichtigte Stoffe

Tabelle A.4.: Im aktorsbasierten Teilmodell berücksichtigte Stoffe und deren Preise im Basisjahr (St-P: Stahl primär, St-S: Stahl sekundär, Al-P: Aluminium primär, Al-S: Aluminium sekundär)

Bezeichnung	Index	Verfahrensrouten				Einkaufspreis ¹ $p_{ii,t}^{EinBAS}$	Quelle
		St-P	St-S	Al-P	Al-S		
Koks (ii^{Koks})	ii^{ZP}, ii^{ET}	x				156 $\frac{EUR}{t}$	[331]
Sinter (ii^{Sinter})	ii^{ZP}	x				61 $\frac{EUR}{t}$	Annahme
Roheisen (ii^{Eisen})	ii^{ZP}	x				286 $\frac{EUR}{t}$	[271]
Rohstahl (ii^{Stahl})	ii^{ZP}	x	x			357 $\frac{EUR}{t}$	[271]
Walzstahl (ii^{WS})	ii^{ZP}	x	x			571 $\frac{EUR}{t}$	[271]
Anode	ii^{ZP}			x		4.250 $\frac{EUR}{t}$	[266]
Aluminiumoxid (ii^{AlO})	ii^{ZP}			x		298 $\frac{EUR}{t}$	[283]
Flüssigaluminium ²	ii^{ZP}			x		1.667 $\frac{EUR}{t}$	Annahme
Rohaluminium ³ (ii^{Alu})	ii^{ZP}			x	x	1.852 $\frac{EUR}{t}$	[304]
Aluminiumprod. ⁴	ii^{ZP}			x	x	2.942 $\frac{EUR}{t}$	[304]
Eisenerz	ii^{ext}	x				51 $\frac{EUR}{t}$	[331]
Bauxit	ii^{ext}			x		21 $\frac{EUR}{t}$	[17]
Stahlschrott	ii^{ext}	x	x			214 $\frac{EUR}{t}$	[271]
Aluminiumschrott	ii^{ext}			x	x	1260 $\frac{EUR}{t}$	[304]
Elektrizität (ii^{El})	ii^{KP}, ii^{ET}	x	x	x	x	(10,8) ⁵ $\frac{EUR}{GJ}$	[32]
Dampf (ii^{Da})	ii^{KP}	x	x	x		1,2 $\frac{EUR}{GJ}$	[228]
Gichtgas	ii^{PG}, ii^{BS}	x				-	-
Kokereigas (Brennstoff)	ii^{PG}, ii^{BS}	x				-	-
Kokereigas (Reduktionsmittel)	ii^{PG}, ii^{ET}	x				-	-
Konvertergas (ii^{Kon})	ii^{PG}, ii^{BS}	x				-	-
Anodenstumpf	ii^{KP}			x		3.400 $\frac{EUR}{t}$	Annahme

Tabelle A.4.: Im aktorsbasierten Teilmodell berücksichtigte Stoffe und deren Preise im Basisjahr (St-P: Stahl primär, St-S: Stahl sekundär, Al-P: Aluminium primär, Al-S: Aluminium sekundär)

Bezeichnung	Index	Verfahrensrouten				Einkaufspreis ¹ $P_{ii,t}^{EinBAS}$	Quelle
		St-P	St-S	Al-P	Al-S		
Hochfenstaub	ii^{KP}	x				-	-
Erdgas (ii^{EG})	ii^{ext}, ii^{BS}	x	x	x	x	$7,1 \frac{EUR}{GJ}$	[71]
Kohle	ii^{ext}, ii^{ET}	x				$68 \frac{EUR}{t}$	[331]
Schweröl (Brennstoff)	ii^{ext}, ii^{BS}			x	x	$6,1 \frac{EUR}{GJ}$	[71]
Schweröl (Reduktionsmittel)	ii^{ext}, ii^{ET}	x				$251 \frac{EUR}{t}$	[71]
Diesel	ii^{ext}, ii^{BS}			x	x	$13 \frac{EUR}{GJ}$	[71]
Leichtöl	ii^{ext}, ii^{ET}	x				$485 \frac{EUR}{t}$	[71]
Benzol	ii^{ext}	x				$576 \frac{EUR}{t}$	[178]
Teer	ii^{ext}	x				$300 \frac{EUR}{t}$	Annahme
Steinkohlenteerpech	ii^{ext}			x		$300 \frac{EUR}{t}$	Annahme
Petrolkoks	ii^{ext}, ii^{ET}			x		$51 \frac{EUR}{t}$	[276, 331]
Kalk	ii^{ext}	x	x		x	$76 \frac{EUR}{t}$	[160]
Graphitelektrode	ii^{ext}		x			$4.250 \frac{EUR}{t}$	[266]
Kathode	ii^{ext}			x		$4.250 \frac{EUR}{t}$	[266]
Kunststoff	ii^{ext}	x				$350 \frac{EUR}{t}$	Annahme
Sauerstoff	ii^{ext}	x	x		x	$41 \frac{EUR}{1.000Nm^3}$	[236]
Sauerstoff (Direkteinblasung)	ii^{ext}	x				$41 \frac{EUR}{1.000Nm^3}$	[236]
Stickstoff	ii^{ext}	x	x	x	x	$53 \frac{EUR}{1.000Nm^3}$	[151]
Stahllegierungen (Nickel)	ii^{ext}	x	x			$7874 \frac{EUR}{t}$	[172]
Aluminiumlegierungen (Magnesium)	ii^{ext}			x	x	$1429 \frac{EUR}{t}$	[238]
Natriumhydroxid	ii^{ext}			x		$214 \frac{EUR}{t}$	[284]
Calciumoxid	ii^{ext}			x		$76 \frac{EUR}{t}$	Annahme
Aluminiumfluorid	ii^{ext}			x	x	$938 \frac{EUR}{t}$	[204]
Argon	ii^{ext}	x	x	x	x	$637 \frac{EUR}{1.000Nm^3}$	[86]

Tabelle A.4.: Im aktorsbasierten Teilmodell berücksichtigte Stoffe und deren Preise im Basisjahr (St-P: Stahl primär, St-S: Stahl sekundär, Al-P: Aluminium primär, Al-S: Aluminium sekundär)

Bezeichnung	Index	Verfahrensrouten				Einkaufspreis ¹ $p_{ii,tBAS}^{Ein}$	Quelle
		St-P	St-S	Al-P	Al-S		
CO ₂ (ii^{CO_2})	ii^{THG}	x	x	x	x	-	-
CO	ii^{ext}	x	x			-	-
PFC (ii^{PFC})	ii^{THG}			x		-	-
Hochofenschlacke	ii^{ext}	x				-	-
Staub (Elektrolichtbogenofen)	ii^{ext}	x				-	-
Kohlenstoff-Abfall	ii^{ext}			x		-	-
Verbrauchte Tiegelauskleidungen	ii^{ext}			x		-	-

¹ Der Verkaufspreis $p_{ii,tBAS}^{Ver}$ stimmt für alle Stoffe, abgesehen vom verkauften Strom, mit dem Einkaufspreis überein.

² Flüssigaluminium bezeichnet hier Aluminium, welches durch die Elektrolyse gewonnen, aber noch nicht zu Barren vergossen wurde.

³ Rohaluminium bezeichnet hier Aluminium, welches bereits zu Barren vergossen, aber noch nicht weiterverarbeitet, z.B. gewalzt, wurde.

⁴ Aluminiumprodukt bezeichnet das bereits weiterverarbeitete, z.B. gewalzte, Aluminium.

⁵ Angegebener Preis gilt für Sonderabnehmer, Verkaufspreis $p_{ii,tBAS}^{Ver}$ mit $21,6 \frac{EUR}{GJ}$ angenommen [71].

Literaturverzeichnis

- [1] ACKERMAN, Frank ; MUNITZ, Charles: Climate damages in the FUND model: A disaggregated analysis. In: *Ecological Economics* 77 (2012), S. 219–224
- [2] ADOLF, Jörg: Marktwirtschaftliche Instrumente - Königsweg der Klimapolitik? In: *Wirtschaftsdienst* 5 (2008), S. 326–333
- [3] AGEB: *Heizwerte der Energieträger und Faktoren für die Umrechnung von spezifischen Mengeneinheiten in Wärmeeinheiten zur Energiebilanz 2006*. AG Energiebilanzen e.V., 2006
- [4] AGRAWALA, Shardul ; BOSELLO, Francesco ; CARRARO, Carlo ; BRUIN, Kelly de ; CIAN, Enrica D. ; DELLINK, Rob ; LANZI, Elisa: Plan or React? Analysis of Adaptation Costs and Benefits Using Integrated Assessment Models. In: *OECD Environment Working Papers* (2010), Nr. 23
- [5] AHMAD, Q.K. ; ANISIMOV, Oleg ; ARNELL, Nigel ; BROWN, Sandra ; BURTON, Ian ; CAMPOS, Max ; CANZIANI, Osvaldo ; CARTER, Timothy ; COHEN, Stewart J. ; DESANKER, Paul ; EASTERLING, William ; FITZHARRIS, B. B. ; FORBES, Donald ; GITAY, Habiba ; GITHEKO, Andrew ; GONZALEZ, Patrick ; GUBLER, Duane ; GUPTA, Sujata ; HAINES, Andrew ; HARASAWA, Hideo ; HOLTEN, Jarle I. ; JALLOW, Bubu P. ; JONES, Roger ; KUNDZEWICZ, Zbigniew ; LAL, Murari ; ROVERE, Emilio Lebre L. ; LEARY, Neil ; LEEMANS, Rik ; LIU, Chunzhen ; MAGADZA, Chris ; MANNING, Martin ; MATA, Luis J. ; MCCARTHY, James ; MCLEAN, Roger ; MCMICHAEL, Anthony ; MILLER, Kathleen ; MILLS, Evan ; MIRZA, M. Monirul Q. ; MURDIYARSO, Daniel ; NURSE, Leonard ; PARMESAN, Camille ; PARRY, Martin ; PATZ, Jonathan ; PETIT, Michel ; PILIFOSOVA, Olga ; PITTOCK, Barrie ; PRICE, Jeff ; ROOT, Terry ; ROSENZWEIG, Cynthia ; SARUKHAN, Jose ; SCHELLNHUBER, John ; SCHNEIDER, Stephen ; SHOLES, Robert ; SCOTT, Michael ; SEM, Graham ; SMIT, Barry ; SMITH, Joel ; SOHNGEN, Brent ; TSYBAN, Alla ; YPERSELE, Jean-Pascal van ; VELLINGA, Pier ; WARRICK, Richard ; WILBANKS, Tom ; WOODWARD, Alistair ; WRATT, David: Summary for Policymakers. In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O.R. (Hrsg.) ; BOSCH, P.R. (Hrsg.) ; DAVE, R. (Hrsg.) ; MEYER, L.A. (Hrsg.): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2007
- [6] ALAIN CHAUVEL, Claude R. Gilles Fournier F. Gilles Fournier ; CHAUVEL, Alain (Hrsg.): *Manual of Process Economic Evaluation*. Editions Technip, 2003
- [7] ALBERTH, Stephan ; HOPE, Chris: Climate modelling with endogenous technical change: Stochastic learning and optimal greenhouse gas abatement in the PAGE2002 model. In: *Energy Policy* 35 (2007), Nr. 3, S. 1795 – 1807

- [8] ALERIS: *Gemeinsame Umwelterklärung 2009*. Aleris Recycling, 2009
- [9] ALTHAUS, Hans-Jörg ; BAUER, Christian ; DOKA, Gabor ; DONES, Roberto ; HISCHE, Roland ; HELLWEG, Stefanie ; HUMBERT, Sébastien ; KÖLLNER, Thomas ; LOERINCİK, Yves ; MARGNI, Manuele ; NEMECEK, Thomas: *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods / ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventories*. 2007. – Forschungsbericht
- [10] AMANN, Markus: *The GAINS Integrated Assessment Model / International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)*. 2012. – Forschungsbericht
- [11] AMANN, Markus ; COFALA, Janusz ; HEYES, Chris ; KLIMONT, Zbigniew ; MECHLER, Reinhard ; POSCH, Max ; SCHÖPP, Wolfgang: *The RAINS model. Documentation of the model approach prepared for the RAINS peer review 2004 / International Institute for Applied Systems Analysis*. 2004. – Forschungsbericht
- [12] ANDREW, Robbie ; PETERS, Glen P. ; LENNOX, James: *Approximation and regional aggregation in multi-regional input-output analysis for national carbon footprint accounting*. In: *Economic Systems Research* 21 (2009), Nr. 3, S. 311–335
- [13] ANTHOFF, David ; TOL, Richard S.: *The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using fund*. In: *Climatic Change* 117 (2013), S. 515–530
- [14] ANTHOFF, David ; TOL, Richard S.: *Climate policy under fat-tailed risk: an application of FUND*. In: *Annals of Operations Research* 220 (2014), Nr. 1, S. 223–237
- [15] APSIMON, H.M. ; WARREN, R.F. ; WILSON, J.J.N.: *The abatement strategies assessment model - ASAM: applications to reductions of sulphur dioxide emissions across Europe*. In: *Atmospheric Environment* 28 (1994), Nr. 4, S. 649–663
- [16] ARENS, M. ; BABROWSKI, S. ; BREUN, P. ; FRÖHLING, M. ; HUMMEN, T. ; JOCHEM, P. ; LIEDTKE, G. ; LIU, G. ; MÜLLER, D. ; OSTERTAG, K. ; SCHRÖDER, S. ; SCHULTMANN, F.: *DECARBONISE - Climate protection through decarbonisation of German industries / Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)*. 2015. – Forschungsbericht
- [17] AUSTRALIAN BAUXITE LIMITED: *Metallurgical Bauxite*. www.australianbauxite.com.au/Metallurgical-Bauxite.htm. Version: 2014
- [18] BALBI, Stefano ; GIUPPONI, Carlo: *Reviewing agent-based modelling of socio-ecosystems: a methodology for the analysis of climate change adaptation and sustainability*. In: *Working Papers Department of Economics Ca' Foscari University of Venice* (2009), Nr. 15
- [19] BARTUSCH, Hauke: *Ein Beitrag zur operativen Produktionsplanung metallurgischer Prozesse*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2012

- [20] BARTUSCH, Hauke ; FERNÁNDEZ ALCALDE, Ana M. ; FRÖHLING, Magnus ; SCHULTMANN, Frank ; SCHWADERER, Frank: *Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE)*. KIT Scientific Publishing, 2013 (Produktion und Energie)
- [21] BECKENBACH, Frank ; BRIEGEL, Ramón: Multi-agent modeling of economic innovation dynamics and its implications for analyzing emission impacts. In: *International Economics and Economic Policy* 7 (2010), S. 317–341
- [22] BEE: *Hintergrundpapier zur EEG-Umlage 2014: Bestandteile, Entwicklung und voraussichtliche Höhe*. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V., 2013
- [23] BINSWANGER, Mathias: Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect? In: *Ecological Economics* 36 (2001), Nr. 1, S. 119 – 132
- [24] BJERVE, Amund ; CARLIN, Anna ; FAGERLI, Hilde ; JONSON, Jan E. ; SIMPSON, David ; TARRASÓN, Leonor ; UKKELBERG Åsmund ; HJELLBREKKE, Anne-Gunn ; SCHAUG, Jan ; SOLBERG, Sverre ; AAS, Wenche ; AMANN, Markus ; COFALA, Janusz ; POSCH, Maximilian ; THUNIS, Philippe ; FRIEDRICH, Rainer ; REIS, Stefan ; UNGER, Steffen: *Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe / European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP)*. 2001. – Forschungsbericht
- [25] BMBF ; BMUB: *Energiewende ist Schlüssel für mehr Klimaschutz - Weltklimarat legt Bericht zur Treibhausgas-Minderung vor*. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Pressemitteilung), 2014
- [26] BMF: 24. Subventionsbericht: Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 2011 bis 2014 / Bundesministerium der Finanzen. 2013. – Forschungsbericht
- [27] BMU: *Bundeseinheitliche Liste der CO₂-Emissionsfaktoren (bezogen auf den unteren Heizwert)*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2003
- [28] BMU: *Nationaler Allokationsplan für die Bundesrepublik Deutschland 2005-2007*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2004
- [29] BMU: Klimakonferenz von Montreal: Erste Klimakonferenz seit Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls läutete Ära der Fortentwicklung des internationalen Klimaschutzregimes ein. In: *Umwelt* 1 (2006), S. 24–27
- [30] BMU: *Nationaler Allokationsplan 2008-2012 für die Bundesrepublik Deutschland*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2006
- [31] BMUB ; BMBF ; DEUTSCHE IPCC KOORDINIERUNGSSTELLE ; UBA: *Fünfter Sachstandsbericht des IPCC - Teilbericht 3 (Minderung des Klimawandels), Kernbotschaften des Berichts*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau

- und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Deutsche IPCC Koordinierungsstelle, Umweltbundesamt, 2014
- [32] BMWi: Energie in Deutschland: Trends und Hintergründe zur Energieversorgung / Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. BMWi, 2010. – Forschungsbericht
- [33] BMWi: Energie in Deutschland: Trends und Hintergründe zur Energieversorgung in Deutschland / Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2013. – Forschungsbericht
- [34] BMWi: *Zahlen und Fakten Energiedaten: Nationale und Internationale Entwicklung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014
- [35] BMWi ; BMU: Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm / Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2007. – Forschungsbericht
- [36] BODLE, Ralph ; HOMANN, Gesa: PRTR-Gesetz (SchadRegProtAG). Kommentar / Ecologic Institut, Umweltbundesamt. 2013. – Forschungsbericht
- [37] BÖHRINGER, Christoph ; LÖSCHEL, Andreas ; RUTHERFORD, Thomas F.: Decomposing the integrated assessment of climate change. In: *Journal of Economic Dynamics and Control* 31 (2007), Nr. 2, S. 683 – 702
- [38] BOLLEN, Johannes ; HERS, Sebastiaan ; ZWAAN, Bob van d.: An integrated assessment of climate change, air pollution, and energy security policy. In: *Energy Policy* 38 (2010), Nr. 8, S. 4021 – 4030
- [39] BOUSQUET, F. ; LE PAGE, C.: Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. In: *Ecological Modelling* 176 (2004), Nr. 3-4, S. 313 – 332
- [40] BREMEN: Klimaschutz- und Energieprogramm 2020 - Zugleich Vierte Fortschreibung des Landesenergieprogramms gemäß §13 des Bremischen Energiegesetzes / Freie Hansestadt Bremen, der Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa. 2010. – Forschungsbericht
- [41] BREUN, P. ; COMES, T. ; DOLL, C. ; FRÖHLING, M. ; HIETE, M. ; ILSEN, R. ; KRAIL, M. ; UNHOLZER, M. ; LÜTZKENDORF, T. ; SCHULTMANN, F. ; STENGEL, J.: *National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente: Entwicklung des Otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland*. KIT Scientific Publ., 2012 (Produktion und Energie)
- [42] BREUN, P. ; FRÖHLING, M. ; ZIMMER, K. ; SCHULTMANN, F.: Investment strategies of energy intensive industries under changing climate policies - An interdisciplinary bottom-up approach regarding German metal industries. In: *Journal of Business Economics (eingereicht in überarbeiteter Fassung)* (2015)

- [43] BREUN, Patrick ; FRÖHLING, Magnus ; SCHULTMANN, Frank: An actor-oriented approach to evaluate climate policies with regard to resource intensive industries. In: *Operations Research Proceedings 2014 (erscheint)*
- [44] BREUN, Patrick ; FRÖHLING, Magnus ; SCHULTMANN, Frank: Ein nichtlineares Optimierungsmodell zur Bestimmung der Stoffflüsse in der deutschen Eisen- und Stahlindustrie. In: KUNZE, Robert (Hrsg.) ; FICHTNER, Wolf (Hrsg.): *Einsatz von OR-Verfahren zur Analyse von Fragestellungen im Umweltbereich, Tagungsband zum Workshop der GOR-Arbeitsgruppe „OR im Umweltschutz“ am 07. und 08. März 2013 in Karlsruhe*, Shaker Verlag Aachen, 2014
- [45] BROUNS, Bernd ; LUHMANN, Hans-Jochen: Internationaler Flugverkehr und EU-Emissionshandel: Botschaft an den Rest der Welt. In: *Politische Ökologie 97/98* (2006), S. 93–94
- [46] BRUNKE, Jean-Christian ; BLESLE, Markus: A plant-specific bottom-up approach for assessing the cost-effective energy conservation potential and its ability to compensate rising energy-related costs in the German iron and steel industry. In: *Energy Policy 67* (2014), S. 431–446
- [47] BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN: *Steuern von A bis Z. 2013*
- [48] BUNDESREGIERUNG: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes): Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen - Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012 / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2012. – Forschungsbericht
- [49] BUTTERMANN, Hans G. ; HILLEBRAND, Bernhard: Die Bedeutung von Stahlwerkstoffen als „Rohstoff“ für die Wirtschaftsstruktur in Deutschland / EEFA - Energy Environment Forecast Analysis GmbH. 2005. – Forschungsbericht
- [50] CANTORE, Nicola: Distributional aspects of emissions in climate change integrated assessment models. In: *Energy Policy 39* (2011), Nr. 5, S. 2919 – 2924
- [51] CANTORE, Nicola ; PADILLA, Emilio: Equality and CO₂ emissions distribution in climate change integrated assessment modelling. In: *Energy 35* (2010), Nr. 1, S. 298 – 313
- [52] CLASSEN, Mischa ; ALTHAUS, Hans-Jörg ; BLASER, Silvio ; SCHARNHORST, Wolfram ; TUCHSCHMID, Matthias ; JUNGBLUTH, Niels ; EMMENEGGER, Mireille F.: Life Cycle Inventories of Metals, Data v2.1 (2009) /ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 2009. – Forschungsbericht
- [53] CO₂NCEPT PLUS: *Die wissenschaftliche Debatte um den Klimawandel - natürlich oder anthropogen?* co₂ncept plus - Verband der Wirtschaft für Emissionshandel und Klimaschutz e. V., 2012
- [54] COMES, Tina ; DOLL, Claus ; FRÖHLING, Magnus ; HIETE, Michael ; ILSSEN, Rebecca ; KRAIL, Michael ; LÜTZKENDORF, Thomas ; SCHULTMANN, Frank ; STENDEL, Julian ; UNHOLZER, Matthias: A national integrated assessment model for Germany -

- Challenges for national clean air policy. In: *Ökologisches Wirtschaften* 2 (2010), S. 34–38
- [55] COMMERZBANK: Metallerzeugung und -bearbeitung: Branchenbericht - Corporate Sector Report. 2014. – Forschungsbericht
- [56] CORSTEN, Hans: *Produktionswirtschaft*. R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1994
- [57] COYLE, Geoff: The practice of system dynamics: milestones, lessons and ideas from 30 years experience. In: *System Dynamics Review* 14 (1998), Nr. 4, S. 343–365
- [58] DEHST: Emissionshandel: Die Zuteilung von Emissionsberechtigungen in der Handelsperiode 2008-2012 / Deutsche Emissionshandelsstelle. 2008. – Forschungsbericht
- [59] D'ELIA, I. ; BENCARDINO, M. ; CIANCARELLA, L. ; CONTALDI, M. ; VIALETTA, G.: Technical and Non-Technical Measures for air pollution emission reduction: The integrated assessment of the regional Air Quality Management Plans through the Italian national model. In: *Atmospheric Environment* 43 (2009), Nr. 39, S. 6182 – 6189
- [60] DENA: *Initiative EnergieEffizienz - Herausragende Beispiele für effiziente Energienutzung (Projekt: Energieeffiziente Roheisenerzeugung durch Entspannungsturbine am Hochofen)*. Deutsche Energie-Agentur, 2015
- [61] DESTATIS: *Energieverbrauch laut Energiebilanz (2006) - Unveröffentlichte Tabelle des Statistischen Bundesamtes*
- [62] DESTATIS: *Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken, Ausgabe 2002 (GP 2002)*. Statistisches Bundesamt, 2001
- [63] DESTATIS: *Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2008, Teil 5: Energie, Berichtszeitraum 1995 - 2006*. Statistisches Bundesamt, 2008
- [64] DESTATIS: *Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2008, Teil 6: Treibhausgase (insgesamt, CO₂, CH₄, N₂O), Berichtszeitraum 1995 - 2006*. Statistisches Bundesamt, 2008
- [65] DESTATIS: *Fachserie 18, Reihe 2: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen: Input-Output-Rechnung 2006*. Statistisches Bundesamt, 2010
- [66] DESTATIS: *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen: Konsumverflechtungstabellen, Ergebnisse der Input-Output-Rechnung, 1991 bis 2004*. Statistisches Bundesamt, 2010
- [67] DESTATIS: *Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 3: Treibhausgase (insgesamt, CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆), Ausgabe 2011, Berichtszeitraum 1995 - 2009*. Statistisches Bundesamt, 2011

- [68] DESTATIS: Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Vorläufige Ergebnisse der Bevölkerungsfortschreibung / Statistisches Bundesamt. 2012. – Forschungsbericht
- [69] DESTATIS: *GENESIS-Online Datenbank: Ein- und Ausfuhr (Volumen) (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Ländergruppen, Warengruppen*. Statistisches Bundesamt, 2012
- [70] DESTATIS: *GENESIS-Online Datenbank: Produktionswert und Unternehmen der Vierteljährlichen Produktionserhebung: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis*. Statistisches Bundesamt, 2012
- [71] DESTATIS: *Preise - Daten zur Energiepreisentwicklung*. Statistisches Bundesamt, 2012
- [72] DESTATIS: *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen: Private Konsumausgaben und Verfügbares Einkommen, 1. Vierteljahr 2012*. Statistisches Bundesamt, 2012
- [73] DESTATIS: *Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 3: Luftemissionen, Ausgabe 2013*. Statistisches Bundesamt, 2013
- [74] DESTATIS: *GENESIS-Online Datenbank: Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warensystematik (2012)*. Statistisches Bundesamt, 2014
- [75] DESTATIS: *GENESIS-Online Datenbank: VGR des Bundes - Abschreibungen (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche*. Statistisches Bundesamt, 2014
- [76] DESTATIS: *GENESIS-Online Datenbank: VGR des Bundes - Exporte (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre, Gütergruppen*. Statistisches Bundesamt, 2014
- [77] DESTATIS: *GENESIS-Online Datenbank: VGR des Bundes - Nettobetriebsüberschuss (nominal): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche*. Statistisches Bundesamt, 2014
- [78] DESTATIS: *Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 3: Luftemissionen, Ausgabe 2014*. Statistisches Bundesamt, 2014
- [79] DIENHART, Matthias: *Ganzheitliche Bilanzierung der Energiebereitstellung für die Aluminiumherstellung*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2003
- [80] DIHK: *DIHK-Merkblatt Ökosteuer: Ermäßigungen für das Produzierende Gewerbe*. 2011
- [81] DIRECTIVE 2003/87/EC: *Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC*. 2003

- [82] DIRECTIVE 2009/29/EC: *Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community.* 2009
- [83] DOLIN, Eric J.: PFC Emissions Reductions: The Domestic and International Perspective. In: *Light Metal Age* (1999)
- [84] DÖLL, Sebastian: Climate Change Impacts in Computable General Equilibrium Models: An Overview / Hamburg Institute of International Economics (HWWI). 2009 (1-26). – HWWI Research Papers
- [85] DOWLATABADI, Hadi: Integrated assessment models of climate change - An incomplete overview. In: *Energy Policy* 23 (1995), Nr. 4/5, S. 289–296
- [86] DOWNIE, N.A.: *Industrial Gases.* Springer Netherlands, 2002
- [87] DUCHIN, F. ; SZYLD, D.B.: A dynamic input-output model with assured positive outcome. In: *Metroeconomica* 37 (1985), S. 269–282
- [88] DUCHIN, Faye: Input-Output Economics and Material Flows. In: SUH, Sangwon (Hrsg.): *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology.* Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009, S. 23–41
- [89] DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) NR. 1001/2013: *Durchführungsverordnung (EU) Nr. 1001/2013 der Kommission vom 4. Oktober 2013 zur Änderung von Anhang I der Verordnung (EWG) Nr. 2658/87 über die zolltarifliche und statistische Nomenklatur sowie den Gemeinsamen Zolltarif.* Amtsblatt der Europäischen Union, 2013
- [90] DÜRR, Dietmar: Carbon Capture and Storage (CCS) - Chancen und Risiken der Kohlendioxidabscheidung und -speicherung / Inagendo. 2009. – Forschungsbericht
- [91] EAA: Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry - April 2008 - Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe / European Aluminium Association. 2008. – Forschungsbericht
- [92] EAA: Sustainability of the European Aluminium Industry 2010 / European Aluminium Association. 2010. – Forschungsbericht
- [93] EAA: Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry - April 2013 - Data for the year 2010 - Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe / European Aluminium Association. 2013. – Forschungsbericht
- [94] EC: *Entscheidung der Kommission vom 17. Juli 2000 über den Aufbau eines Europäischen Schadstoffemissionsregisters (EPER) gemäß Artikel 15 der Richtlinie 96/61/EG des Rates über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IPPC) vom 17. Juli 2000 (ABl. EG L 192, S. 37).* 2000

- [95] EC: Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) - Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry / European Commission. 2001. – Forschungsbericht
- [96] EC: Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency / European Commission. 2009. – Forschungsbericht
- [97] EC: *Beschluss der Kommission vom 27. April 2011 zur Festlegung EU-weiter Übergangsvorschriften zur Harmonisierung der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten gemäß Artikel 10a der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.* 2011
- [98] EC: *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050.* 2011
- [99] EC: *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Energieeffizienzplan 2011.* 2011
- [100] EC: 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. 2012. – Forschungsbericht
- [101] EC: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metal Industries - Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / European Commission, Joint Research Centre. 2013. – Forschungsbericht
- [102] ECKERT-KÖMEN, Johanna ; MOHAUPT, Markus ; NEMARNIK, Nenad: *Metallindustrie 2020: Metalle müssen Flexibilität beweisen.* IKB Information, 2009
- [103] ECOFYS ; ISI ; ÖKO-INSTITUT: Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012 - Sector report for the aluminium industry / Ecofys, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Öko-Institut. 2009. – Forschungsbericht
- [104] EEA: *The European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR), Member States reporting under Article 7 of Regulation (EC) No 166/2006.* European Environment Agency, Database, 2012
- [105] EEG: *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S. 1634) geändert worden ist.* 2011
- [106] EEG: *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 20. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2730) geändert worden ist.* 2012

- [107] EEG: *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. Juli 2014 (BGBl. I S. 1218) geändert worden ist.* 2014
- [108] EGKS: Die Investitionen in den Kohle- und Stahlindustrien der Gemeinschaft / Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl, Europäische Kommission. 2003. – Forschungsbericht
- [109] EID: *Positionspapier der Energieintensiven Industrien (EID) zum Referentenentwurf eines Gesetzes zur Reduzierung von Subventionen aus der ökologischen Steuerreform (Haushaltsbegleitgesetz 2011) vom 12. August 2010.* Energieintensive Industrien in Deutschland, 2010
- [110] EID: *Positionspapier der Energieintensiven Industrien (EID) zum Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien (EEG).* Energieintensive Industrien in Deutschland, 2011
- [111] EID: *Argumente zur Energiekostendebatte.* Energieintensive Industrien in Deutschland, 2012
- [112] EKARDT, Felix: *Soziale Gerechtigkeit in der Klimapolitik.* Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf, 2010
- [113] ENERGIEStG: *Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534; 2008 I S. 660, 1007), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2436, 2725; 2013 I 488) geändert worden ist.* 2012
- [114] EPA: *Available And Emerging Technologies For Reducing Greenhouse Gas Emissions From The Iron And Steel Industry / United States Environmental Protection Agency.* 2012. – Forschungsbericht
- [115] FARRELL, Frank: *Specific Cost Data for Metal Production and Abatement / IPTS, Seville.* 2001. – Forschungsbericht
- [116] FORRESTER, Jay W.: System dynamics, systems thinking, and soft OR. In: *System Dynamics Review* 10 (1994), Nr. 2-3, S. 245–256
- [117] FRANKLIN, Stan ; GRAESSER, Art: Is It an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. In: MÜLLER, Jörg P. (Hrsg.) ; WOOLDRIDGE, Michael J. (Hrsg.) ; JENNINGS, Nicholas R. (Hrsg.): *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages* Bd. 1193. Springer, 1997, S. 21–35
- [118] FRÖHLING, M. ; BARTUSCH, H. ; SCHWADERER, F. ; SCHULTMANN, F.: An Inter-Company Approach to Improve Resource and Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in Metal Industries by Linking Flow Sheet Models. In: *World of Metallurgy - Erzmetall* 62 (2009), Nr. 5, S. 288–298
- [119] FRÖHLING, M. ; BARTUSCH, H. ; SCHWADERER, F. ; SCHULTMANN, F.: Analyzing energy and resource efficiency measures in the iron and steel industry combining flowsheet simulation with a linear material and energy flow model. In: *Revue de Métallurgie* 109 (2012), Nr. 1, S. 359–367

- [120] FRÖHLING, Magnus ; SCHWADERER, Frank ; BARTUSCH, Hauke ; RENTZ, Otto: Integrated planning of transportation and recycling for multiple plants based on process simulation. In: *European Journal of Operational Research* 207 (2010), Nr. 2, S. 958–970
- [121] FRÖHLING, Magnus ; SCHWADERER, Frank ; BARTUSCH, Hauke ; SCHULTMANN, Frank: A Material Flow-based Approach to Enhance Resource Efficiency in Production and Recycling Networks. In: *Journal of Industrial Ecology* 17 (2012), Nr. 1, S. 5–19
- [122] GARA, Stefan ; SCHRIMPF, Sabine: Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie / Umweltbundesamt. 1998. – Forschungsbericht
- [123] GERNER, D.: *Forum Wirtschaftsrecht*. Bd. 9: *Zuteilung der CO₂-Zertifikate in einem Emissionshandelssystem*. Kassel University Press, 2012
- [124] GERSPACHER, Andreas ; ARENS, Marlene ; EICHHAMMER, Wolfgang: Zukunftsmarkt Energieeffiziente Stahlherstellung / Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). 2011. – Forschungsbericht
- [125] GHENDA, Theo: 10. CO₂-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland - Berichtsjahr 2010 / Stahlinstitut VDEh. 2011. – Forschungsbericht
- [126] GÖRLACH, Benjamin ; KATHÖFER, Volker ; BUCHNER, Lisa ; GAGELMANN, Frank ; GUDDAS, Inga ; HOHMUTH, Timo ; HÖLZER-SCHOPOHL, Olaf ; KÜHLEIS, Christoph ; LANDGREBE, Jürgen ; LANGE, Sonja ; OLANIYON, Anke ; ROSENBOHM, Katja ; SCHMIDT, Yvonne ; SCHWALB, Oliver ; SEIDEL, Wolfgang ; STEEGMANN, Juliane ; THORNE, Christina ; WOLF, Matthias ; WOLKE, Frank: Emissionshandel: Auswertung der ersten Handelsperiode 2005-2007 / Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle. 2009. – Forschungsbericht
- [127] GOUGH, C.A. ; BAILEY, P.D. ; BIEWALD, B. ; KUYLENSTIERNA, J.C.I. ; CHADWICK, M.J.: Environmentally targeted objectives for reducing acidification in Europe. In: *Energy Policy* 22 (1994), Nr. 12, S. 1055–1066
- [128] GROSS, Dominique ; STRAND, Roger: Can agent-based models assist decisions on large-scale practical problems? A philosophical analysis. In: *Complexity* 5 (2000), Nr. 6, S. 26–33
- [129] GUINÉE, Jeroen B. ; HELJUNGS, Reinout ; HUPPES, Gjalt ; ZAMAGNI, Alessandra ; MASONI, Paolo ; BUONAMICI, Roberto ; EKVALL, Tomas ; RYDBERG, Tomas: Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. In: *Environmental Science and Technology* 45 (2011), Nr. 1, S. 90–96
- [130] GUPTA, S. ; TIRPAK, D. A. ; BURGER, N. ; GUPTA, J. ; HÖHNE, N. ; BONCHEVA, A. I. ; KANOAN, G. M. ; KOLSTAD, C. ; KRUGER, J. A. ; MICHAELOWA, A. ; MURASE, S. ; PERSHING, J. ; SAIJO, T. ; SARI, A.: Policies, Instruments and Co-operative Arrangements. In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O.R. (Hrsg.) ; BOSCH, P.R. (Hrsg.) ; DAVE, R. (Hrsg.) ; MEYER, L.A. (Hrsg.): *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment*

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
- [131] GUTENBERG, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion*. Bd. 1. Springer, 1972 (Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft)
- [132] HARE, M ; DEADMAN, P: Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 64 (2004), Nr. 1, S. 25 – 40
- [133] HASANBEIGI, Ali ; MORROWA, William ; SATHAYE, Jayant ; MASANET, Eric ; XU, Tengfang: A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry. In: *Energy* 50 (2013), S. 315–325
- [134] HASANBEIGI, Ali ; PRICE, Lynn K. ; MCKANE, Aimee T.: The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook (2nd Edition) / Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate. 2010. – Forschungsbericht
- [135] HASSELMANN, K.: Simulating Human Behavior in Macroeconomic Models Applied to Climate Change. In: *ECF Working Paper* 3 (2009)
- [136] HASSELMANN, K. ; LATIF, M. ; HOOSS, G. ; AZAR, C. ; EDENHOFER, O. ; JAEGER, C. C. ; JOHANNESSEN, O. M. ; KEMFERT, C. ; WELP, M. ; WOKAUN, A.: The challenge of long-term climate change. In: *Science* 302 (2003), S. 1923–1925
- [137] HASSELMANN, Klaus ; KOVALEVSKY, Dmitry V.: Simulating animal spirits in actor-based environmental models. In: *Environmental Modelling & Software* 44 (2013), S. 10 – 24
- [138] HAYNES, Paul ; LINDER, Sören ; SEWELL, Martin: Modelling Energy-Environment-Economy Interdependencies: A Comparative Analysis of Ten E3 Models. In: *Energy Law and Policy eJournal* 5 (2011), Nr. 19
- [139] HENNING, Hans-Martin ; PALZER, Andreas: Energiesystem Deutschland 2050: Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien / Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. 2013. – Forschungsbericht
- [140] HERMANN, Hauke ; GRAICHEN, Verena ; GAMMELIN, Christian ; MATTHES, Felix ; COOK, Vanessa: Kostenlose CO₂-Zertifikate und CDM/JI im EU-Emissionshandel - Analyse von ausgewählten Branchen und Unternehmen in Deutschland / Öko-Institut, Umweltstiftung WWF Deutschland. 2010. – Forschungsbericht
- [141] HERMANN, Hauke ; MATTHES, Felix C. ; ATHMANN, Uwe: Potenziale und Chancen der Technologie zur CO₂-Abtrennung und -Ablagerung (CCS) für industrielle Prozessemissionen / Öko-Institut. 2012. – Forschungsbericht
- [142] HERTIG, Elke: *Niederschlags- und Temperaturabschätzungen für den Mittelmeerraum unter anthropogen verstärktem Treibhauseffekt*, Bayerische Julius-Maximilians- Universität Würzburg, Diss., 2004

- [143] HETTELINGH, Jean-Paul ; VRIES, Bert J. M. ; HORDIJK, Leen: Integrated Assessment. In: BOERSEMA, Jan J. (Hrsg.) ; REIJNDERS, Lucas (Hrsg.): *Principles of Environmental Sciences*. Springer Science + Business Media B.V., 2009, S. 385–420
- [144] HOEKSTRA, Rutger ; JANSSEN, Marco: Environmental responsibility and policy in a two-country dynamic input-output model. In: *Economic Systems Research* 18 (2006), Nr. 1, S. 61 – 84
- [145] HOPE, Chris: The Marginal Impact of CO2 from PAGE2002: An Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern. In: *The Integrated Assessment Journal* 6 (2006), Nr. 1, S. 19–56
- [146] HOPE, Chris: Optimal carbon emissions and the social cost of carbon over time under uncertainty. In: *The Integrated Assessment Journal* 8 (2008), Nr. 1, S. 107–122
- [147] HOPE, Chris: The PAGE09 Integrated Assessment Model: A Technical Description. In: *Cambridge Judge Business School Working Papers* 4 (2011)
- [148] HOPE, Chris W.: The Social Cost of CO2 from the PAGE09 Model. In: *Economics Discussion Papers* 39 (2011)
- [149] HORDIJK, Leen ; KROEZE, Carolien: Integrated assessment models for acid rain. In: *European Journal of Operational Research* 102 (1997), Nr. 3, S. 405–417
- [150] HORST, Juri ; KLANN, Uwe ; LEPRICH, Uwe: Kurzstudie zur Bedeutung des Strompreises für den Erhalt und die Entwicklung stromintensiver Industrien in Deutschland / IZES gGmbH. 2009. – Forschungsbericht
- [151] HUMPHREYS, Paul: *The Benefits of On-site Nitrogen Generation*. www.airbestpractices.com. Version: 2014
- [152] HUY, Dieter ; ANDRULEIT, Harald ; BABIES, Hans-Georg ; HOMBERG-HEUMANN, Doris ; MESSNER, Jürgen ; NEUMANN, Wolfgang ; RÖHLING, Simone ; SCHAUER, Michael ; SCHMIDT, Sandro ; SCHMITZ, Martin ; SIEVERS, Henrike ; BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE BGR (Hrsg.): *Deutschland - Rohstoffsituation 2012*. 2013
- [153] HYDRO: *Annual Report - 2008*. Norsk Hydro ASA, 2009
- [154] IAI: Global Life Cycle Inventory Data For The Primary Aluminium Industry - 2010 Data / International Aluminium Institute. 2013. – Forschungsbericht
- [155] ICHA, Petra: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012 / Umweltbundesamt. 2013. – Forschungsbericht
- [156] IEA: Greenhouse gases from major industrial sources - IV - The aluminium industry / International Energy Agency. 2000. – Forschungsbericht

- [157] IHK: *Energie- und Stromsteuer: Ermäßigungen für das produzierende Gewerbe*. Merkblatt, 2014
- [158] IIP: *Industrial Efficiency Technology Database - Electric Arc Furnace*. Institute for Industrial Productivity. <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>. Version: 2015
- [159] ILSSEN, Rebecca: *Ein Beitrag zur modellgestützten Analyse umweltpolitischer Instrumente in den Bereichen Luftreinhaltung und Klimawandel*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2012
- [160] INDEX MUNDI: *Lime Prices*. www.indexmundi.com. Version: 2014
- [161] IOSIF, Ana-Maria ; HANROT, Francois ; ABLITZER, Denis: Process integrated modelling for steelmaking Life Cycle Inventory analysis. In: *Environmental Impact Assessment Review* 28 (2008), S. 429–438
- [162] IPCC: *Understanding climate change: 22 years of IPCC assessment*. 2010
- [163] IPCC: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: STOCKER, T.F. (Hrsg.) ; QUIN, D. (Hrsg.) ; PLATTNER, G.-K. (Hrsg.) ; TIGNOR, M. (Hrsg.) ; ALLEN, S.K. (Hrsg.) ; BOSCHUNG, J. (Hrsg.) ; NAUELS, A. (Hrsg.) ; XIA, Y. (Hrsg.) ; BEX, V. (Hrsg.) ; MIDGLEY, P.M. (Hrsg.): *Klimaänderung 2013: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe 1 zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. – Deutsche Übersetzung durch ProClim, Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, Bern, Bonn, Wien, 2014
- [164] JAEGER, Carlo C. ; JAEGER, Julia: Warum zwei Grad? In: *APuZ* 32-33 (2010), S. 7–15
- [165] JÄGER, Jill: Current thinking on using scientific findings in environmental policy making. In: *Environmental Modeling and Assessment* 3 (1998), S. 143–153
- [166] JOCHEM, Eberhard ; SCHÖN, Michael ; ANGERER, Gerhard ; BALL, Michael ; BRADKE, Harald ; CELIK, Birgül ; EICHHAMMER, Wolfgang ; MANNSBART, Wilhelm ; MARSCHIEDER-WEIDEMANN, Frank ; NATHANI, Carsten ; WALZ, Rainer ; WIETSCHEL, Martin: *Werkstoffeffizienz: Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe / Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI*. Fraunhofer IRB Verlag, 2004. – Forschungsbericht
- [167] JOSHI, Satish: Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques. In: *Journal of Industrial Ecology* 3 (1999), Nr. 2-3, S. 95–120
- [168] JUDA-REZLER, Katarzyna: Integrated assessment modelling of air pollution on a regional scale. In: *Environment Protection Engineering* 32 (2006), Nr. 3, S. 47–54
- [169] KARVOSENOJA, Niko: *Emission scenario model for regional air pollution*, Helsinki University of Technology, Diss., 2008

- [170] KELLY, David L. ; KOLSTAD, Charles D.: Integrated Assessment Models For Climate Change Control. In: *UC Santa Barbara Working Papers* 31 (1998)
- [171] KEMFERT, C.: Applied economic-environment-energy modeling for quantitative impact assessment. In: AMELUNG, B. (Hrsg.) ; ROTMANS, J. (Hrsg.) ; VALKERING, P. (Hrsg.): *Integrated Assessment for Policy Modelling*. 2003
- [172] KITCO: *Nickel Historical Charts - Spot*. www.kitcometals.com
- [173] KLAASSEN, Ger ; BERGLUND, Christer ; WAGNER, Fabian: The GAINS Model for Greenhouse Gases - Version 1.0: Carbon Dioxide (CO₂) / International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). 2005. – Forschungsbericht
- [174] KOCH, Matthias ; HARNISCH, Jochen ; BLOK, Kornelis: Systematische Analyse der Eigenschaften von Energiemodellen im Hinblick auf ihre Eignung für möglichst praktische Politik-Beratung zur Fortentwicklung der Klimaschutzstrategie / ECOFYS GmbH. 2003. – Forschungsbericht
- [175] KPMG: Kapitalkostenstudie 2013: Konjunktur im Wandel - Kapitalkosten auch? 2013. – Forschungsbericht
- [176] KREFT, Sönke ; BALS, Christoph: *Warschau, Lima, Paris - Im Dreisprung zum Klimaabkommen: Ausblick auf den Klimagipfel COP 19 in Warschau*. 2013
- [177] KUHN, Andreas ; STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Input-Output-Rechnung im Überblick*. Wiesbaden, 2010
- [178] KUNSTSTOFF-WEB: *Vorprodukte: Preise für Benzol und Styrol eingebrochen*. www.kunststoffweb.de. Version: 2014
- [179] LAVE, Lester B. ; COBAS-FLORES, Elisa ; HENDRICKSON, Chris T. ; McMICHAEL, Francis C.: Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges. In: *Environmental Science and Technology* 29 (1995), Nr. 9, S. 420A–426A
- [180] LECHTENBÖHMER, Stefan ; KNOPF, Brigitte ; BAUER, Nico ; DURAND, Antoine ; HANKE, Thomas ; LUHMANN, Hans-Jochen ; SAMADI, Sascha ; SCHMID, Eva ; SCHNEIDER, Clemens: Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade (bis 2050) : Endbericht / Umweltbundesamt. 2014. (Climate change). – Forschungsbericht. – 152 S.
- [181] LEHR, Ulrike ; MÖNNIG, Anke ; WOLTER, Marc I. ; LUTZ, Christian ; SCHADE, Wolfgang ; KRAIL, Michael: Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente - ein Vergleich. In: *gws Discussion Paper* 4 (2011)
- [182] LEICK, Barbara Cornelia E.: *Emission von Ammoniak (NH₃) und Lachgas (N₂O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen*, Universität Hohenheim, Diss., 2003
- [183] LEONTIEF, Wassily: Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. In: *The Review of Economics and Statistics* 52 (1970), Nr. 3, S. pp. 262–271

- [184] LEONTIEF, Wassily W.: Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. In: *The Review of Economics and Statistics* 18 (1936), Nr. 3, S. pp. 105–125
- [185] LORECK, Charlotte ; HALLER, Markus ; HERMANN, Hauke ; CLUDIUS, Johanna: Analyse der EEG-Umlage 2014 / Öko-Institut. 2013. – Forschungsbericht
- [186] LUHMANN, Hans-Jochen: Auf welche Wissenschaft beruft sich die Politik beim Zwei-Grad-Ziel? In: *GAIA* 19 (2010), Nr. 3, S. 175–177
- [187] LUO, Zheng ; SORIA, Antonio: Prospective Study of the World Aluminium Industry / Joint Research Centre - IPTS. 2008. – Forschungsbericht
- [188] LUTZ, C.: Energy scenarios for Germany: Simulations with the model PANTA RHEI. In: MULLINS, D. (Hrsg.) ; VILJOEN, J. (Hrsg.) ; LEEUWNER, H. (Hrsg.): *Interindustry based analysis of macroeconomic forecasting. Proceedings from the 19th INFORUM World Conference, Pretoria, 2011*, S. 203–224
- [189] LUTZ, Christian ; LEHR, Ulrike ; ULRICH, Philip: Economic Evaluation of Climate Protection Measures in Germany. In: *International Journal of Energy Economics and Policy* 4 (2014), Nr. 4, S. 693–705
- [190] LUTZ, Christian ; MEYER, Bernd ; NATHANI, Carsten ; SCHLEICH, Joachim: Endogenous technological change and emissions: the case of the German steel industry. In: *Energy Policy* 33 (2005), Nr. 9, S. 1143 – 1154
- [191] MACHADO, Giovani ; SCHAEFFER, Roberto ; WORRELL, Ernst: Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input-output approach. In: *Ecological Economics* 39 (2001), Nr. 3, S. 409 – 424
- [192] MAKSIMOV, Vyacheslav ; SCHRATTENHOLZER, Leo ; MINULLIN, Yaroslav: Computer Analysis of the Sensitivity of the Integrated Assessment Model MERGE-5I. In: WYRZYKOWSKI, Roman (Hrsg.) ; DONGARRA, Jack (Hrsg.) ; MEYER, Norbert (Hrsg.) ; WAŚNIEWSKI, Jerzy (Hrsg.): *Parallel Processing and Applied Mathematics* Bd. 3911. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 583–590
- [193] MANNE, Alan ; MENDELSON, Robert ; RICHEL, Richard: MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. In: *Energy Policy* 23 (1995), Nr. 1, S. 17 – 34
- [194] MANNE, AlanS. ; RICHEL, RichardG.: Merge: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change. In: LOULOU, Richard (Hrsg.) ; WAAUB, Jean-Philippe (Hrsg.) ; ZACCOUR, Georges (Hrsg.): *Energy and Environment*. Springer US, 2005. – ISBN 978-0-387-25351-0, S. 175–189
- [195] MARKEWITZ, Peter ; STEIN, Gotthard ; EICH, Regina ; WEBER, Karl-Heinz: IKARUS - Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien. In: MARKEWITZ, P. (Hrsg.) ; STEIN, G. .. (Hrsg.): *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland*. Schriften des Forschungszentrums Jülich, 2003, S. 1–16

- [196] MARKUS KNIGGE, Benjamin G.: Die Ökologische Steuerreform - Auswirkungen auf Umwelt, Beschäftigung und Innovation, Zusammenfassung des Endberichts für das Vorhaben: "Quantifizierung der Effekte der Ökologischen Steuerreform auf Umwelt, Beschäftigung und Innovation"/ Ecologic, Institut für Internationale und Europäische Umweltpolitik gGmbH. 2005. – Forschungsbericht
- [197] MARTINSEN, Dag ; MARKEWITZ, Peter ; MÜLLER, Dagmar ; VÖGELE, Stefan ; HAKE, Jürgen-Friedrich: IKARUS - Energieszenarien bis 2030. In: MARKEWITZ, P. (Hrsg.) ; STEIN, G. .. (Hrsg.): *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland*. Schriften des Forschungszentrums Jülich, 2003, S. 31–48
- [198] MATTHES, Felix C. ; BUSCHE, Julia ; DÖRING, Ulrike ; EMELE, Lukas ; GORES, Sabine ; HARTHAN, Ralph O. ; HERMANN, Hauke ; JÖRSS, Wolfram ; LORECK, Charlotte ; SCHEFFLER, Margarethe ; HANSEN, Patrick ; DIEKMANN, Jochen ; HORN, Manfred ; EICHHAMMER, Wolfgang ; ELSLAND, Rainer ; FLEITER, Tobias ; SCHADE, Wolfgang ; SCHLOMANN, Barbara ; SENSFUSS, Frank ; ZIESING, Hans-Joachim: Politiksznarien für den Klimaschutz VI - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030 / Umweltbundesamt. Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, März 2013. – Forschungsbericht
- [199] MATTHES, Felix C. ; GORES, Sabine ; HERMANN, Hauke: Zusatzserträge von ausgewählten deutschen Unternehmen und Branchen im Rahmen des EU-Emissionshandelsystems - Analyse für den Zeitraum 2005-2012 / WWF, Öko-Institut. 2011. – Forschungsbericht
- [200] MCINTYRE, E.H. ; LANDRY, E.R.: Electric Arc Furnace Efficiency / CMP - The EPRI Center for Materials Production. 1992. – Forschungsbericht
- [201] MEADOWS, Donella H. ; MEADOWS, Dennis L. ; RANDERS, Jørgen ; III, William W. B.: *The limits to growth*. Universe Books New York, 1972
- [202] MESSNER, Sabine ; SCHRATTENHOLZER, Leo: MESSAGE-MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively. In: *Energy* 25 (2000), Nr. 3, S. 267 – 282
- [203] MESSNER, Sabine ; STRUBEGGER, Manfred: User's Guide for MESSAGE III / International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). 1995. – Forschungsbericht
- [204] METALBULLETIN: *Aluminium fluoride prices boosted by supply shortage*. www.metalbulletin.com
- [205] MEYER, Bernd: The Economic-Environmental model PANTA RHEI and its Application. In: *GWS Discussion Paper* 3 (2005)
- [206] MEYER, Bernd ; DISTELKAMP, Martin ; WOLTER, Marc I.: Material efficiency and economic-environmental sustainability. Results of simulations for Germany with the model PANTA RHEI. In: *Ecological Economics* 63 (2007), S. 192–200

- [207] MICHAELIS, Peter: *Ein ökonomischer Orientierungsrahmen für die Umweltpolitik*. Institut für Weltwirtschaft, 1996 (Kieler Diskussionsbeiträge). – ISBN 9783894561178
- [208] MILLER, Ronald E. ; BLAIR, Peter D.: *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. 2nd. Cambridge University Press, New York, 2009
- [209] MINX, J.C. ; WIEDMANN, T. ; WOOD, R. ; PETERS, G.P. ; LENZEN, M. ; OWEN, A. ; SCOTT, K. ; BARRETT, J. ; HUBACEK, K. ; BAIOCCHI, G. ; PAUL, A. ; DAWKINS, E. ; BRIGGS, J. ; GUAN, D. ; SUH, S. ; ACKERMAN, F.: Input-output analysis and carbon footprinting: an overview of applications. In: *Economic Systems Research* 21 (2009), Nr. 3, S. 187–216
- [210] MNP ; BOUWMAN, A.F. (Hrsg.) ; KRAM, T. (Hrsg.) ; GOLDEWIJK, K. K. (Hrsg.): *Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE 2.4*. Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, The Netherlands, 2006
- [211] MONGELLI, I. ; TASSIELLI, G. ; NOTARNICOLA, B.: Global warming agreements, international trade and energy/carbon embodiments: an input-output approach to the Italian case. In: *Energy Policy* 34 (2006), Nr. 1, S. 88 – 100
- [212] MOSS, Richard H. ; EDMONDS, Jae A. ; HIBBARD, Kathy A. ; MANNING, Martin R. ; ROSE, Steven K. ; VUUREN, Detlef P. ; CARTER, Timothy R. ; EMORI, Seita ; KAINUMA, Mikiko ; KRAM, Tom ; MEEHL, Gerald A. ; MITCHELL, John F. B. ; NAKICENOVIĆ, Nebojsa ; RIAHI, Keywan ; SMITH, Steven J. ; STOUFFER, Ronald J. ; THOMSON, Allison M. ; WEYANT, John P. ; WILBANKS, Thomas J.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In: *Nature* 463 (2010), S. 747–756
- [213] NAKIĆENOVIĆ, Nebojsa ; ALCAMO, Joseph ; DAVIS, Gerald ; VRIES, Bert de ; FENHANN, Joergen ; GAFFIN, Stuart ; GREGORY, Kenneth ; GRÜBLER, Arnulf ; JUNG, Tae Y. ; KRAM, Tom ; ROVERE, Emilio Lebre L. ; MICHAELIS, Laurie ; MORI, Shunsuke ; MORITA, Tsuneyuki ; PEPPER, William ; PITCHER, Hugh ; PRICE, Lynn ; RIAHI, Keywan ; ROEHL, Alexander ; ROGNER, Hans-Holger ; SANKOVSKI, Alexei ; SCHLESINGER, Michael ; SHUKLA, Priyadarshi ; SMITH, Steven ; SWART, Robert ; ROOIJEN, Sascha van ; VICTOR, Nadejda ; DADI, Zhou: Special Report on Emissions Scenarios / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. – Forschungsbericht
- [214] NANSAI, Keisuke ; KAGAWA, Shigemi ; KONDO, Yasushi ; SUH, Sangwon ; INABA, Rokuta ; NAKAJIMA, Kenichi: Improving the completeness of product carbon footprints using a global link input-output model: the case of Japan. In: *Economic Systems Research* 21 (2009), Nr. 3, S. 267–290
- [215] NORDHAUS, William ; SZTORC, Paul: *DICE 2013R: Introduction and User's Manual*, 2013
- [216] NORDHAUS, William D.: Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem. In: *The American Economic Review* 67 (1977), Nr. 1, S. 341–346

- [217] NORDHAUS, William D.: Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (2010), Nr. 26, S. 11721–11726
- [218] NORDHAUS, William D. ; BOYER, Joseph G.: Requiem for Kyoto: An Economic Analysis of the Kyoto Protocol / Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University. 1999. – Forschungsbericht
- [219] OEA: *Structure of the EU 15 Refiners (Situation as per 2007)*. Organisation of the European Aluminium Recycling Industry. www.oea-alurecycling.org/en/recycling/eckdaten.php. Version: 2014
- [220] OXLEY, T. ; APSIMON, H. ; DORE, A. ; SUTTON, M. ; HALL, J. ; HEYWOOD, E. ; CAMPO, T. Gonzales d. ; WARREN, R.: The UK Integrated Assessment Model, UKIAM: A National Scale Approach to the Analysis of Strategies for Abatement of Atmospheric Pollutants Under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. In: *Integrated Assessment* 4 (2003), Nr. 4, S. 236–249
- [221] OXLEY, T. ; APSIMON, H.M.: Space, time and nesting Integrated Assessment Models. In: *Environmental Modelling & Software* 22 (2007), Nr. 12, S. 1732 – 1749
- [222] OXLEY, Tim ; DORE, Anthony J. ; APSIMON, Helen ; HALL, Jane ; KRYZA, Maciej: Modelling future impacts of air pollution using the multi-scale {UK} Integrated Assessment Model (UKIAM). In: *Environment International* 61 (2013), S. 17 – 35
- [223] PARDO, N. ; MOYA, J.A. ; VATOPOULOS, K.: Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO₂ Emissions in the EU Iron & Steel Industry / European Commission, Joint Research Centre. 2012. – Forschungsbericht
- [224] PARDO, Nicolás ; MOYA, José A.: Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the European Iron & Steel industry. In: *Energy* 54 (2013), S. 113 – 128
- [225] PATT, Anthony G. ; VUUREN, Detlef P. ; BERKHOUT, Frans ; AAHEIM, Asbjørn ; HOF, Andries F. ; ISAAC, Morna ; MECHLER, Reinhard: Adaptation in integrated assessment modeling: where do we stand? In: *Climatic Change* 99 (2010), Nr. 3-4, S. 383–402
- [226] PAULIUK, Stefan ; WOOD, Richard ; HERTWICH, Edgar G.: Dynamic Models of Fixed Capital Stocks and Their Application in Industrial Ecology. In: *Journal of Industrial Ecology* (2014)
- [227] PETERS, Glen P. ; HERTWICH, Edgar G.: Post-Kyoto greenhouse gas inventories: production versus consumption. In: *Climatic Change* 86 (2008), S. 51–66
- [228] PETERS, M. S. ; TIMMERHAUS, K. D. ; WEST, R. E.: *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, New York, 2004

- [229] PFAFFENBERGER, Wolfgang ; BORSZCZ, Ulrike ; VÖGELE, Stefan: Makroökonomisches Informationssystem. In: MARKEWITZ, P. (Hrsg.) ; STEIN, G. (Hrsg.): *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland*. Schriften des Forschungszentrums Jülich, 2003, S. 17–30
- [230] PFEIFER, Herbert ; HÖGNER, Werner ; FREDRIKSSON, Patrik ; SCHEELE, Joachim von ; PAUL, Reinhard: Energieeffizienz und Minderung des CO₂-Ausstoßes durch Sauerstoffverbrennung. In: *Stahl und Eisen* 129 (2009), Nr. 8, S. 51–62
- [231] PFLANZ, Wilhelm: *Ablösung der IVU-Richtlinie durch die Industrieemissionsrichtlinie IE-RL (2010/75/EU)*. 2012
- [232] PIGNATELLI, T. ; DE LAURETIS, R. ; CONTALDI, M. ; D'ELIA, I. ; ROMANO, D. ; VIALETTO, G.: Harmonization of National Inventory and Projections of Multi-pollutant Emission Scenarios. The Italian Experience within the European Context and the UN-ECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution. In: *Proc. of 16th Annual Int. Emissions Inventory Conference, Raleigh (North Carolina), May 14-17, 2007*
- [233] POLLAK, Robert A. ; WALES, Terence J.: Estimation of the Linear Expenditure System. In: *Econometrica* 37 (1969), Nr. 4, S. pp. 611–628
- [234] PORZIO, Giacomo F. ; FORNAL, Barbara ; AMATO, Alessandro ; MATARESE, Nicola ; VANNUCCI, Marco ; CHIAPPELLI, Lisa ; COLLA, Valentina: Reducing the energy consumption and CO₂ emissions of energy intensive industries through decision support systems - An example of application to the steel industry. In: *Applied Energy* 112 (2013), S. 818–833
- [235] QUINKERTZ, Rainer: *Optimierung der Energienutzung bei der Aluminiumherstellung*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2002
- [236] RAO, Prakash ; MULLER, Michael: Industrial Oxygen: Its Generation and Use. In: *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry* (2007)
- [237] RAO, Shilpa ; RIAHI, Keywan: The Role of Non-CO₂ Greenhouse Gases in Climate Change Mitigation: Long-term Scenarios for the 21st Century. In: *Energy Journal* 27 (2006), S. 177–200
- [238] RECYCLINGPORTAL: *Magnesium und Titan: Preise ziehen langsam wieder an*. <http://www.recyclingportal.eu/artikel/25738.shtml>. Version: 2014
- [239] REIS, Stefan ; NITTER, Steffen ; FRIEDRICH, Rainer: Innovative Approaches in Integrated Assessment Modelling of European Air Pollution Control Strategies - Implications of Dealing with Multi-pollutant Multi-effect Problems. In: *ISESS conference proceedings*, 2003
- [240] REIS, Stefan ; NITTER, Steffen ; FRIEDRICH, Rainer: Innovative approaches in integrated assessment modelling of European air pollution control strategies - Implications of dealing with multi-pollutant multi-effect problems. In: *Environmental Modelling & Software* 20 (2005), Nr. 12, S. 1524–1531

- [241] RENTZ, Otto ; FRÖHLING, Magnus ; NEBEL, Falk ; SCHULTMANN, Frank ; ENGELS, Bernd: Integrierter Umweltschutz in der Metallherzeugung: Simulationsgestützte operative Produktionsplanung zur Optimierung metallurgischer Abfallverwertungsprozesse / Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH). 2006. – Forschungsbericht
- [242] RENTZ, Otto ; SCHULTMANN, Frank ; SPENGLER, Thomas ; SIEVERDINGBECK, Andreas ; ENGELS, Bernd: Prozessintegrierte Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie - Stoff- und Energiestrommanagement in integrierten Hüttenwerken mit Hilfe flowsheetingbasierter Prozesssimulation / Universität Karlsruhe (TH), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP). 1999. – Forschungsbericht
- [243] RENTZ, Otto ; SPENGLER, Thomas ; HÄHRE, Stephan ; SIEVERDINGBECK, Andreas: Prozessintegrierte Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie / Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP). 1997. – Forschungsbericht
- [244] RICHEL, Richard G. ; MANNE, Alan S. ; WIGLEY, Tom M.: Moving Beyond Concentrations: The Challenge of Limiting Temperature Change. In: *AEI-Brookings Joint Center for Regulatory Studies Working Paper 11* (2004)
- [245] RICHTLINIE 2008/1/EG: *Richtlinie 2008/1/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung*. 2008
- [246] RICHTLINIE 2010/75/EU: *Richtlinie 2010/75/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung)*. 2010
- [247] RIESEBERG, Sarah ; WÖRLEN, Christine: Befreiungen der energieintensiven Industrie in Deutschland von Energieabgaben / Rosa Luxemburg Stiftung, Arepo Consult. 2012. – Forschungsbericht
- [248] ROGNER, Mathis ; RIAHI, Keywan: Future nuclear perspectives based on MESSAGE integrated assessment modeling. In: *Energy Strategy Reviews* 1 (2013), Nr. 4, S. 223–232
- [249] ROMMERSKIRCHEN, Stefan ; ANDERS, Natalia ; SCHLESINGER, Michael ; STRASSBURG, Samuel: Referenzszenario zu den Einsparpotenzialen der Treibhausgas-(THG)-Emissionen und des Endenergieverbrauchs im Verkehrsbereich für die Zeithorizonte 2020 und 2050 / ProgTrans, Prognos. 2012. – Forschungsbericht
- [250] ROTMANS, J. ; DOWLATABADI, H.: Integrated assessment of climate change: Evaluation of methods and strategies. In: *Human Choices and Climate Change: A State of the Art Report*. Batelle Pacific Northwest Laboratories, Washington, DC, USA, 1997
- [251] SALTER, Jonathan ; ROBINSON, John ; WIEK, Arnim: Participatory methods of integrated assessment—a review. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1 (2010), Nr. 5, S. 697–717

- [252] SCHADREGPROTAG: *Gesetz zur Ausführung des Protokolls über Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister vom 21. Mai 2003 sowie zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr 166/2006 vom 6. Juni 2007 (BGBl. I S. 1002)*. 2007
- [253] SCHINTKE, Joachim ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (Hrsg.): *Sensitivitätsanalysen im statischen offenen Leontief-Modell*. Duncker & Humblot, Berlin, 1976
- [254] SCHIPPER, Hans ; HACKENBRUCH, Julia: *Die UN-Klimakonferenzen: Stand nach COP 20 in Lima, Peru, Kurzbericht des Süddeutschen Klimabüros / Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. 2014. – Forschungsbericht
- [255] SCHIPPER, Hans ; HACKENBRUCH, Julia ; WEIXLER, Katharina: *Die UN-Klimakonferenzen: Stand nach COP 19 in Warschau, Polen, Kurzbericht des Süddeutschen Klimabüros / Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. 2013. – Forschungsbericht
- [256] SCHLEICH, Joachim ; ROGGE, Karoline ; BORKEL, Franziska ; HAUSSMANN, Philipp ; REICHARDT, Kristin ; ROSER, Annette ; REITZE, Felix ; FRAHM, Birgit-Jo: *Wirkungen neuer klimapolitischer Instrumente auf Innovationstätigkeiten und Marktchancen baden-württembergischer Unternehmen / Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES)*. 2010. – Forschungsbericht
- [257] SCHLESINGER, Michael ; HOFER, Peter ; KEMMLER, Andreas ; KIRCHNER, Almut ; KOZIEL, Sylvie ; LEY, Andrea ; PIÉGSA, Alexander ; SEEFELDT, Friedrich ; STRASSBURG, Samuel ; WEINERT, Karsten ; LINDENBERGER, Dietmar ; KNAUT, Andreas ; MALISCHEK, Raimund ; NICK, Sebastian ; PANKE, Timo ; PAULUS, Simon ; TODE, Christian ; WAGNER, Johannes ; LUTZ, Christian ; LEHR, Ulrike ; ULRICH, Philip: *Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose / Prognos, EWI, GWS*. 2014. – Forschungsbericht
- [258] SCHLOMANN, Barbara ; FLEITER, Tobias ; HIRZEL, Simon ; ARENS, Marlene ; ROHDE, Clemens ; EICHHAMMER, Wolfgang ; CEBULLA, Felix ; ELSLAND, Rainer ; FEHRENBACH, Daniel ; SINGER, Norman ; GERSPACHER, Andreas ; IDRISOVA, Farikha ; JOCHEM, Eberhard ; MAI, Michael ; REITZE, Felix ; TORO, Felipe A. ; BACHMANN, Jan ; WITTICH, Katrin ; HASSAN, Ali ; FLEITER, Tobias (Hrsg.) ; SCHLOMANN, Barbara (Hrsg.) ; EICHHAMMER, Wolfgang (Hrsg.): *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Fraunhofer Verlag, 2013
- [259] SCHRADER, Christopher ; WEISS, Marlene: *Die Risiken häufen sich*. Süddeutsche, Zeitungsartikel, März 2014
- [260] SCHRÖTER, Marcus ; LERCH, Christian ; JÄGER, Angela: *Materialeffizienz in der Produktion: Einsparpotenziale und Verbreitung von Konzepten zur Materialeinsparung im Verarbeitenden Gewerbe / Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI*. 2011. – Forschungsbericht

- [261] SCHULTMANN, Frank: *Stoffstrombasiertes Produktionsmanagement - Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2003
- [262] SCHULTMANN, Frank ; ENGELS, Bernd ; RENTZ, Otto: Flowsheeting-based simulation of recycling concepts in the metal industry. In: *Journal of Cleaner Production* 12 (2004), S. 737–751
- [263] SCHWARZ, H.-G.: Modelling investment and implementation of technological progress in metal industries. Theory and application to the German primary aluminium industry. In: *Resources Policy* 29 (2003), S. 99 – 109. – ISSN 0301–4207
- [264] SCHWARZ, Winfried ; LEISEWITZ, André: Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland. In: *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 12 (2000), Nr. 4, S. 209–213
- [265] SEI: *The European Fossil-fueled Power Station Database Used in the SEI CASM Model*. Stockholm Environment Institute, 1996
- [266] SGL GROUP: *SGL announces Graphite Electrode price increases*. www.sglgroup.com. Version: 2014
- [267] SPENGLER, Thomas ; HÄHRE, Stephan ; SIEVERDINGBECK, Andreas ; RENTZ, Otto: Stoffflussbasierte Umweltkostenrechnung zur Bewertung industrieller Kreislaufwirtschaftskonzepte - Dargestellt am Beispiel der Eisen- und Stahlindustrie. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 68 (1998), S. 147–174
- [268] STAHLINSTITUT VDEH ; WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL: *Stellungnahme zur Studie des Fraunhofer Instituts „Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente“*. 2013
- [269] STANTON, Elizabeth A. ; ACKERMAN, Frank ; KARTHA, Sivan: Inside the Integrated Assessment Models: Four Issues in Climate Economics. In: *Stockholm Environment Institute Working Paper WP-US-0801* (2008)
- [270] STATISTIK DER KOHLENWIRTSCHAFT E.V.: *Entwicklung ausgewählter Energiepreise*. www.kohlenstatistik.de. Version: 2012
- [271] STEELONTHENET.COM: *Historic steel price graphs*. <http://www.steelonthenet.com/pricing-history.php>. Version: 2014
- [272] STEHFEST, E. ; VUUREN, D. van ; KRAM, T. ; BOUWMAN, L. ; ALKEMADE, R. ; BAKKENES, M. ; BIEMANS, H. ; BOUWMAN, A. ; ELZEN, M. den ; JANSE, J. ; LUCAS, P. ; MINNEN, J. van ; MÜLLER, M. ; PRINS, A.: *Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model description and policy applications*. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2014
- [273] STEHLING, Frank: *Ökonomische Instrumente der Umweltpolitik zur Reduzierung stofflicher Emissionen: Materialien*. Akad. für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, 1999

- [274] STENDEL, Julian: *Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2014
- [275] STERK, Wolfgang ; ARENS, Christof: Die projektbasierten Mechanismen CDM & JI - Einführung und praktische Beispiele / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2010. – Forschungsbericht
- [276] STOCKMAN, Lorne ; TURNBULL, David ; KRETZMANN, Stephen: Petroleum Coke: The Coal Hiding In The Tar Sands / Oil Change International. 2013. – Forschungsbericht
- [277] STONE, Richard: Linear Expenditure Systems and Demand Analysis: An Application to the Pattern of British Demand. In: *The Economic Journal* 64 (1954), Nr. 255, S. pp. 511–527
- [278] STROGIES, Michael ; GNIFFKE, Patrick: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2011 / Umweltbundesamt. 2013. – Forschungsbericht
- [279] STROMSTG: *Stromsteuergesetz vom 24. März 1999 (BGBl. I S. 378; 2000 I S. 147), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2436, 2725) geändert worden ist.* 2012
- [280] STUBENVOLL, Josef ; HOLZERBAUER, Ernst ; BÖHMER, Siegmund ; KRUTZLER, Thomas ; JANHSEN, Thomas: Technische Massnahmen zur Minderung der Staub- und NO_x-Emissionen bei Wirbelschicht- und Laugenverbrennungskesseln / Umweltbundesamt. 2007. – Forschungsbericht
- [281] SUH, Sangwon: *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*. University of Minnesota : Springer, 2009
- [282] SULLIVAN, Patrick ; KREY, Volker ; RIAHI, Keywan: Impacts of considering electric sector variability and reliability in the MESSAGE model. In: *Energy Strategy Reviews* 1 (2013), Nr. 3, S. 157–163
- [283] SURVEY, U.S. G.: *Minerals Yearbook 2008, V. 1, Metals and Minerals*. United States Government Printing Office, Washington, 2010
- [284] TECNON ORBICHEM: *Chem-Net Facts - Chemical market insight and foresight - on a single page: Caustic Soda*. 2013
- [285] TEHG: *Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz vom 21. Juli 2011 (BGBl. I S. 1475), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 45 u. Artikel 4 Absatz 28 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist.* 2011
- [286] TIAN, Xin ; CHANG, Miao ; LIN, Chen ; TANIKAWA, Hiroki: China's carbon footprint: A regional perspective on the effect of transitions in consumption and production patterns. In: *Applied Energy* 123 (2014), S. 19 – 28

- [287] TIMMER, Marcel P.: The World Input-Output Database (WIOD): Contents, Sources and Methods / University of Groningen. 2012. – Forschungsbericht
- [288] TOL, Richard S. J.: Multi-Gas Emission Reduction for Climate Change Policy: An Application of Fund. In: *Energy Journal* 27 (2006), S. 235 – 250
- [289] TOL, Richard S.: On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND. In: *Environmental Modeling and Assessment* 2 (1997), S. 151–163
- [290] TRIMET: *Geschäftsbericht 2008*. Trimet Aluminium AG, 2008
- [291] TRIPPE, Frederik: *Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2013
- [292] TUKKER, Arnold ; POLIAKOV, Evgueni ; HEIJUNGS, Reinout ; HAWKINS, Troy ; NEUWAHL, Frederik ; RUEDA-CANTUCHE, José M. ; GILJUM, Stefan ; MOLL, Stephan ; OOSTERHAVEN, Jan ; BOUWMEESTER, Maaïke: Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database. In: *Ecological Economics* 68 (2009), Nr. 7, S. 1928–1937
- [293] UBA: *Trotz Atomausstieg: Klimagasausstoß sinkt 2011 um 2,9 Prozent*. Umweltbundesamt, Presseinformation Nr. 05/2013, 2013
- [294] UBA: *Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes: Schriftliche Stellungnahme zur BT-Drucksache 18/1304, Anhörung im Bundestag am 4. Juni 2014*. Umweltbundesamt, 2014
- [295] UBA: *Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen und von Schwefeldioxid*. Umweltbundesamt, 2015
- [296] UBA ; DEHST: *Europäischer Emissionshandel 2013-2020, Factsheet*. Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle, 2014
- [297] UBA ; DEHST: *Einheitliche Stoffwerte für Emissionsfaktoren, Heizwerte und Kohlenstoffgehalte für Brennstoffe, Rohstoffe und Produkte*. Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle, 2007
- [298] UBA ; DEHST: *Zuteilung 2013-2020 - Leitfaden: Teil 1 - Grundlegende Informationen zum Zuteilungsverfahren für Bestandsanlagen - Zuteilungssystematik, Ablauf, Akteure sowie elektronisches Verfahren / Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle*. 2011. – Forschungsbericht
- [299] UBA ; DEHST: *Zuteilung 2013-2020 - Leitfaden: Teil 3a - Spezielle Zuteilungsregeln für anlagenübergreifende Wärmeströme / Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle*. 2011. – Forschungsbericht
- [300] UBA ; DEHST: *Emissionshandel: Deutsche Anlagenliste mit einer vorläufigen Zuteilung für die 3. Handelsperiode nach Art. 11 EHRL ("NIMs InstData-Liste")*. Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle, 2012

- [301] UBA ; DEHSt: Leitfaden: Teil 5 - Zuteilungsregeln für neue Marktteilnehmer - Hinweise zur Erstellung des Zuteilungsantrags für Neuanlagen und Kapazitätserweiterungen / Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt). Bismarckplatz 1, 14193 Berlin, Januar 2014. – Forschungsbericht
- [302] UBA AND DEHSt: *Emissionshandel: kostenlose Zuteilung für deutsche Bestandsanlagen in der dritten Handelsperiode 2013-2020 (National Allocation Table - NAT, Stand 25.11.2013)*. Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle, 2013
- [303] UBA AND DEHSt: Emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2008-2012 (Stand 28.02.2013) / Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle. 2013. – Forschungsbericht
- [304] USGS: *2007 Minerals Yearbook: Aluminium*. 2010
- [305] USGS: *2012 Minerals Yearbook: Germany*. 2014
- [306] VDEH: *PLANTFACTS Anlagendatenbank*. Stahlinstitut VDEh, 2014
- [307] VERORDNUNG (EG) NR. 166/2006: *Verordnung (EG) Nr. 166/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinien 91/689/EWG und 96/61/EG des Rates*. 2006
- [308] VIALETTO, G. ; PIGNATELLI, T. ; ZANINI, G. ; MONFORTI, F. ; BRUSASCA, G. ; CALORI, G. ; FINARDI, S. ; ORNELLI, P. ; RADICE, P. ; SILIBELLO, C.: Integrated assessment modelling applied to emission scenarios development in Italy. In: *13th World Clean Air and Environmental Protection Congress and Exhibition, London, UK, August 22 - 27, 2004*
- [309] VKU: *Spitzenausgleich 2013 - Anwendungshilfe für die Praxis*. Verband kommunaler Unternehmen e.V., 2013
- [310] VÖGELE, Stefan ; KUCKSHINRICHS, Wilhelm ; MARKEWITZ, Peter: A Hybrid IO Energy Model to Analyze CO₂ Reduction Policies: A Case of Germany. In: SUH, Sangwon (Hrsg.): *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009, S. 337–356
- [311] VRIES, Bert de ; BOLLEN, Johannes ; BOUWMAN, Lex ; ELZEN, Michel den ; JANSSEN, Marco ; KREILEMAN, Eric: Greenhouse Gas Emissions in an Equity-, Environment- and Service-Oriented World: An IMAGE-Based Scenario for the 21st Century. In: *Technological Forecasting and Social Change* 63 (2000), Nr. 2-3, S. 137 – 174
- [312] VUUREN, Detlef P. ; LOWE, Jason ; STEHFEST, Elke ; GOHAR, Laila ; HOF, Andries F. ; HOPE, Chris ; WARREN, Rachel ; MEINSHAUSEN, Malte ; PLATTNER, Gian-Kasper: How well do integrated assessment models simulate climate change? In: *Climatic Change* 104 (2011), Nr. 2, S. 255–285

- [313] WÄCHTER, Andreas: *An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Optimization with Applications in Process Engineering*, Carnegie Mellon University, Diss., 2002
- [314] WAGNER, Fabian ; AMANN, Markus ; SCHÖPP, Wolfgang: The GAINS Optimization Module as of 1 February 2007 / International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). 2007. – Forschungsbericht
- [315] WARREN, Rachel F. ; APSIMON, Helen M.: Uncertainties in integrated assessment modelling of abatement strategies: illustrations with the ASAM model. In: *Environmental Science & Policy* 2 (1999), Nr. 6, S. 439 – 456
- [316] WARREN, R.F. ; APSIMON, H.M.: Integrated assessment of sulphur dioxide reduction schemes: Robustness studies, choice of environmental targets and country roles. In: *Journal of Environmental Management* 59 (2000), Nr. 1, S. 3 – 20
- [317] WEBER, Michael: *A Multi-Actor Dynamic Integrated Assessment Model (MADIAM)*, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Universität Hamburg, Diss., 2004
- [318] WEBER, Michael ; BARTH, Volker ; HASSELMANN, Klaus: A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth. In: *Ecological Economics* 54 (2005), Nr. 2-3, S. 306–327
- [319] WEST, Guy R.: Comparison of Input-Output, Input-Output + Econometric and Computable General Equilibrium Impact Models at the Regional Level. In: *Economic Systems Research* 7 (1995), Nr. 2, S. 209–227
- [320] WEYANT, J. ; DAVIDSON, O. ; DOWLATABADI, H. ; EDMONDS, J. ; GRUBB, M. ; PARSON, E.A. ; RICHEL, R. ; ROTMANS, J. ; SHUKLA, P.R. ; TOL, R.S.J. ; CLINE, W. ; FANKHAUSER, S.: Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results. In: BRUCE, James P. (Hrsg.) ; LEE, Hoesung (Hrsg.) ; HAITES, Erik F. (Hrsg.): *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996, S. 367–439
- [321] WICKE, Lutz: *Umweltökonomie: Eine praxisorientierte Einführung*. Bd. 4. Franz Vahlen München, 1993
- [322] WIEDMANN, Thomas: Editorial: Carbon footprint and input-output analysis - an introduction. In: *Economic Systems Research* 21 (2009), Nr. 3, S. 175–186
- [323] WIEDMANN, Thomas: A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. In: *Ecological Economics* 69 (2009), Nr. 2, S. 211 – 222
- [324] WIEDMANN, Thomas ; WOOD, Richard ; MINX, Jan C. ; LENZEN, Manfred ; GUAN, Dabo ; HARRIS, Rocky: A carbon footprint time series of the UK - results from a multi-region input-output model. In: *Economic Systems Research* 22 (2010), Nr. 1, S. 19–42

- [325] WIGLEY, T. M. L. ; RAPER, S. C. B.: Interpretation of High Projections for Global-Mean Warming. In: *Science* 293 (2001), Nr. 5529, S. 451–454
- [326] WILTING, Harry C. ; VRINGER, Kees: Carbon and land use accounting from a producer's and a consumer's perspective - an empirical examination covering the world. In: *Economic Systems Research* 21 (2009), Nr. 3, S. 291–310
- [327] WÖHE, Günter ; DÖRING, Ulrich: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Franz Vahlen München, 2013
- [328] WOOD, Richard ; DEY, Christopher J.: Australia's carbon footprint. In: *Economic Systems Research* 21 (2009), Nr. 3, S. 243–266
- [329] WOOLDRIDGE, Michael: *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons, LTD, 2002
- [330] WORRELL, Ernst ; BLINDE, Paul ; NEELIS, Maarten ; BLOMEN, Eliane ; MASANET, Eric R.: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers / Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. 2010. – Forschungsbericht
- [331] WV STAHL ; VDEH ; WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL (Hrsg.) ; STAHLINSTITUT VDEH (Hrsg.): *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2008/2009*. Verlag Stahleisen GmbH, 2008
- [332] WV STAHL ; VDEH ; WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL (Hrsg.) ; STAHLINSTITUT VDEH (Hrsg.): *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2013/2014*. Verlag Stahleisen GmbH, 2013
- [333] WVM ; GDA ; GDB ; BDG: *Metallstatistik 2013*. Wirtschaftsvereinigung Metalle, Gesamtverband der Aluminiumindustrie, Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie, Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, 2014
- [334] XU, Tengfang ; SATHAYE, Jayant ; GALITSKY, Christie: Development of Bottom-up Representation of Industrial Energy Efficiency Technologies in Integrated Assessment Models for the Iron and Steel Sector / Lawrence Berkeley National Laboratory. 2010. – Forschungsbericht
- [335] ZANINI, G. ; PIGNATELLI, T. ; MONFORTI, F. ; VIALETTO, G. ; VITALI, L. ; BRUSASCA, G. ; CALORI, G. ; FINARDI, S. ; RADICE, P. ; SILIBELLO, C.: The MINNI Project: an integrated assessment modelling system for policy making. In: *Proc. of MODSIM 2005 Int. Congress on Modelling and Simulation*, 2005
- [336] ZUG: *Zuteilungsgesetz 2007 vom 26. August 2004 (BGBl. I S. 2211), das durch Artikel 4 Absatz 29 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist*. 2004
- [337] ZUV: *Zuteilungsverordnung 2007 vom 31. August 2004 (BGBl. I S. 2255), die durch Artikel 10 des Gesetzes vom 21. Juli 2011 (BGBl. I S. 1475) geändert worden ist*. 2004

-
- [338] ZüV: *Zuteilungsverordnung 2020 vom 26. September 2011 (BGBl. I S. 1921)*.
2011