

*Band 1* \_ PRODUKTION UND ENERGIE

# NATIONAL INTEGRATED ASSESSMENT MODELLING ZUR BEWERTUNG UMWELTPOLITISCHER INSTRUMENTE

ENTWICKLUNG DES OTELLO-MODELLSYSTEMS UND DESSEN  
ANWENDUNG AUF DIE BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



# **National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente**

Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf  
die Bundesrepublik Deutschland

# PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion  
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

Band 1

# **National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente**

Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen  
Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland

**Dieser Bericht ist unter Zusammenarbeit der folgenden Institute entstanden**  
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), KIT  
Lehrstuhl Ökonomie und Ökologie des Wohnungsbaus (ÖÖW), KIT  
Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW), KIT  
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

### **Autoren**

Patrick Breun, Tina Comes, Claus Doll, Magnus Fröhling, Michael Hiete,  
Rebecca Ilsen, Michael Krail, Thomas Lützkendorf, Frank Schultmann,  
Julian Stengel, Matthias Unholzer

### **Impressum**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales  
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz  
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2012  
Print on Demand

ISSN 2194-2404  
ISBN 978-3-86644-853-7





---

## Vorwort

In den vergangenen Jahrzehnten wurden große Anstrengungen in Deutschland und später auch auf europäischer und internationaler Ebene unternommen, um die Luftqualität nachhaltig zu verbessern. In einigen Problembereichen wie z. B. beim sauren Regen oder bodennahem Ozon konnten deutliche Verbesserungen erzielt werden, während andere Probleme wie die Partikelbelastung oder die Überdüngung durch atmosphärische Deposition nach wie vor große Herausforderungen darstellen. Trotz der Erfolge sind die Schäden für die menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Materialien durch Luftverschmutzung nach wie vor immens. Zudem bestehen vielfältige Wechselwirkungen zwischen Luftreinhaltung und Klimaschutz, beispielsweise bei Partikeln.

Aufgrund ihres grenzüberschreitenden Charakters werden Luftschadstoffemissionen auch auf EU- und internationaler Ebene adressiert, etwa durch das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) der UN-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE), mit dem Göteborg-Protokoll zur Vermeidung von Versauerung und Eutrophierung sowie des Entstehens von bodennahem Ozon oder durch die EU-Richtlinie zu nationalen Emissionsobergrenzen (sog. NEC-Direktive).

Zur Erreichung der damit verbundenen Minderungsziele obliegt es den Unterzeichner- bzw. Mitgliedsstaaten die gesetzten Ziele zu erreichen. Hierzu kann eine Vielzahl an Instrumenten, die sich in ihren Ansatzpunkten und Wirkungen unterscheiden, angewendet werden. Politische Entscheidungsträger sehen sich daher mit der Aufgabe konfrontiert, möglichst effizient und effektiv die geforderten Ziele zu erreichen.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben „Entwicklung eines optimierenden Bewertungs- und Allokationsmodells für ein nationales Emissionsmanagement (otello)“ soll hierzu ein wissenschaftlich fundiertes Entscheidungsunterstützungswerkzeug bereitstellen. Ziel ist es, ein Instrumentarium zu entwickeln und exemplarisch anzuwenden, um umweltpolitische Instrumente im Rah-

---

men eines Emissionsmanagements im Hinblick auf die Einhaltung der Minderungsverpflichtungen, die sich durch internationale Luftreinhalteabkommen wie CLRTAP oder der NEC-Direktive ergeben, zu bewerten. Hierzu wird ein Modellsystem aufgebaut, das mit den Sektoren Industrie & Energieversorgung, Wohngebäude sowie Verkehr für die Emissionssituation in Deutschland wesentliche Bereiche abdeckt und es ermöglicht, simulationsbasiert, die Wirkungen verschiedener umweltpolitischer Instrumente auf diese Bereiche quantitativ abzuschätzen und diese Instrumente und deren Wechselwirkungen zu bewerten.

Wir möchten uns an dieser Stelle sehr herzlich bei allen bedanken, die zu dem Gelingen dieser Arbeiten beigetragen haben.

Zuvorderst gilt unser aufrichtiger Dank dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie dem Projektträger DLR für die finanzielle Förderung des Vorhabens. Bei Herrn Thomas Schulz vom Projektträger DLR und dem Beirat des Forschungsprogramms „Wirtschaftswissenschaften für Nachhaltigkeit“ bedanken wir uns sehr herzlich für die engagierte und positive Begleitung unseres Vorhabens.

Zu aufrichtigem Dank sind wir den Mitgliedern des Projektbeirates, Frau Johanna Appelhans, Umweltbundesamt, Herrn Harry Kieper, Landesinnungsverband der Schornsteinfeger Hessen, Herrn Udo Lambrecht, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Helmut Lehmann, Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV), Herrn Thomas Leiber, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LuBW), Herrn Hans-Joachim Meyer, VGB PowerTech e.V., sowie Herrn Dr.-Ing. Dieter Siegel, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LuBW) für die Diskussionen und Beratung unseres Projektes verpflichtet.

Nicht zuletzt gilt unser tiefer Dank unseren Kolleginnen und Kollegen aus dem Projektkonsortium Herrn Dr. Claus Doll, Herrn Jonathan Köhler (PhD) und Herrn Dr. Michael Krail (alle Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)) sowie Prof. Dr.-Ing. habil Thomas Lützkendorf und Matthias Unholzer (beide Lehrstuhl für Ökonomie und Ökologie des Wohnungsbaus, Karlsruher Institut

---

für Technologie (KIT)) für die allzeit sehr gute und fruchtbare Zusammenarbeit, die wesentlich zum erfolgreichen Abschluss des Projektes beigetragen hat.

Karlsruhe, im März 2012

Patrick Breun,

Tina Comes,

Magnus Fröhling,

Michael Hiete,

Rebecca Ilsen,

Frank Schultmann,

Julian Stengel



# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Motivation und Hintergrund</b> <b>(P. Breun, T. Comes, C. Doll, M. Fröhling, M. Hiete, R. Il-</b> <b>sen, M. Krail, T. Lützkendorf, F. Schultmann, J. Stengel,</b> <b>M. Unholzer) .....</b>	<b>1</b>
I.1	Problemstellung und Zielsetzung .....	3
I.2	Hintergrund und aktuelle Situation des Emissionsmanagements in Deutschland .....	7
I.2.1	Emissionssituation in Deutschland .....	7
I.2.2	Rechtliche Rahmenbedingungen .....	11
I.2.2.1	Umweltpolitische Instrumente .....	11
I.2.2.2	Gesetzlicher Rahmen zur Erfüllung internationaler Vereinbarungen .....	14
I.2.3	Bedarf an Entscheidungsunterstützung im nationalen Emis- sionsmanagement .....	19
I.3	Anforderungen an die Modellierung eines nationalen Integrated As- sessment Modells (IAM) .....	23
I.4	Gesamtüberblick über das entwickelte Modellsystem otello .....	25
I.5	Literatur zu Teil I .....	31

<b>II</b>	<b>Das Teilmodell Industrie &amp; Energieversorgung und das makro- ökonomische Rahmenmodell</b>	
	<b>(R. Ilsen, P. Breun, M. Fröhling, F. Schultmann) .....</b>	<b>35</b>
II.1	Einführung und Modellüberblick .....	37
II.1.1	Einordnung und existierende Modelle .....	37
II.1.2	Rechtliche Rahmenbedingungen in der Industrie .....	42
II.1.3	Ziele der Modellierungsarbeit im Bereich Industrie & Ener- gieversorgung .....	45
II.1.4	Überblick über das entwickelte Modellsystem für den Be- reich Industrie & Energieversorgung.....	46
II.1.4.1	Modellumfang .....	46
II.1.4.2	Struktur der Sektormodelle .....	47
II.1.4.3	Abbildung der Produktionsprozesse und Emissionsberechnung.....	48
II.1.4.4	Simulation des Entscheiderverhaltens .....	49
II.1.4.5	Aggregation und Disaggregation auf Sektorenebe- ne .....	49
II.1.4.6	Makroökonomisches Rahmenmodell .....	50
II.1.5	Aufbau von Teil II.....	50
II.2	Akteursbasiertes Industrie-Simulationsmodell .....	51
II.2.1	Abbildung der Produktionsprozesse und Emissionsberech- nung.....	54
II.2.1.1	Anlagen .....	55
II.2.1.2	Werke .....	59
II.2.1.3	Emissionsminderungsmaßnahmen.....	61
II.2.2	Simulation des Entscheiderverhaltens.....	67
II.2.2.1	Rangwert zur Bewertung der Handlungsoptionen ..	68
II.2.2.2	Investitionsentscheidung in Minderungsmaßnah- men .....	78

---

II.2.2.3	Erneuerung von Anlagen.....	81
II.2.2.4	Neubau und Stilllegung von Werken.....	81
II.2.3	Marktsimulation.....	83
II.3	Makroökonomisches Rahmenmodell.....	87
II.3.1	Einführung in die Input-Output-Modellierung.....	88
II.3.1.1	Die Input-Output-Tabelle.....	88
II.3.1.2	Das statische offene Input-Output-Modell.....	90
II.3.2	Beschreibung des implementierten Input-Output-Modells....	96
II.3.2.1	Gestaltung der Input-Output-Matrizen.....	97
II.3.2.2	Teilendogenisiertes Mengenmodell.....	103
II.3.2.3	Dynamisierung des Modells.....	109
II.4	Implementierung und Datengrundlage der abgebildeten Sektoren....	119
II.4.1	Sektorübergreifende Prozesse und Daten.....	120
II.4.1.1	Verbrennungsprozesse.....	120
II.4.1.2	Möglichkeiten der Emissionsminderung.....	122
II.4.1.3	Weitere Emissionsquellen.....	126
II.4.2	Zementsektor.....	127
II.4.2.1	Abbildung der Produktionsprozesse.....	127
II.4.2.2	Emissionsminderungsmaßnahmen.....	130
II.4.2.3	Ausgangskonfiguration der Werke.....	135
II.4.2.4	Ergänzende wirtschaftliche Daten.....	137
II.4.3	Eisen- und Stahlsektor.....	138
II.4.3.1	Abbildung der Produktionsprozesse.....	140
II.4.3.2	Emissionsminderungsmaßnahmen.....	141
II.4.3.3	Ausgangskonfiguration der Werke.....	146
II.4.4	Energiesektor.....	148
II.4.4.1	Verfahren zur Umwandlung von Energie in Strom..	149
II.4.4.2	Kraftwerkspark in Deutschland.....	154
II.4.4.3	Umsetzung im Modell.....	159

II.5	Definition der Szenarios .....	165
II.5.1	Instrumente und deren Wirkung .....	165
II.5.1.1	Emissionsgrenzwerte .....	165
II.5.1.2	Zertifikatehandel und Schadstoffsteuern .....	167
II.5.1.3	Ökosteuer .....	168
II.5.1.4	Produktionsstandards .....	168
II.5.2	Rahmenbedingungen .....	169
II.5.3	Instrumentenbündel .....	172
II.6	Ergebnisse .....	175
II.6.1	Basisszenario .....	175
II.6.1.1	Wirtschaftliche Entwicklung im Basisszenario .....	175
II.6.1.2	Basisszenario Zementsektor .....	177
II.6.1.3	Basisszenario Eisen- und Stahlsektor .....	179
II.6.1.4	Basisszenario Energiesektor .....	180
II.6.2	Wirkungsweise der Instrumente im Zementsektor .....	182
II.6.2.1	Ökologisches Verhalten .....	183
II.6.2.2	Emissionshandel .....	183
II.6.2.3	Grenzwerte .....	187
II.6.3	Wirkungsweise der Instrumente im Eisen- und Stahlsektor .....	188
II.6.3.1	Emissionshandel .....	188
II.6.3.2	Grenzwerte .....	190
II.6.3.3	Ökosteuer .....	192
II.6.4	Wirkungsweise der Instrumente im Energiesektor .....	192
II.6.4.1	Emissionshandel .....	192
II.6.4.2	Grenzwerte .....	195
II.6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	197
II.7	Zusammenfassung und Ausblick zu Teil II .....	199
II.8	Literatur zu Teil II .....	203

II.9	Variablenverzeichnis zu Teil II.....	215
II.10	Anhang zu Teil II .....	221
<b>III</b>	<b>Wohngebäude</b>	
	<b>(J. Stengel, M. Unholzer, M. Hiete, T. Lützkendorf, F. Schultmann).....</b>	<b>225</b>
III.1	Einführung und Modellübersicht.....	227
III.1.1	Hintergrund und existierende Modelle .....	227
III.1.2	Ziele.....	229
III.1.3	Einbettung des Teilmodells Wohngebäude .....	229
III.1.4	Modellübersicht .....	230
III.1.4.1	Wohngebäudebestand, -zugänge und -abgänge .....	230
III.1.4.2	Energiebedarf sowie Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen .....	233
III.1.4.3	Szenarios: Umweltpolitische Instrumente und unsichere Parameter .....	235
III.1.4.4	Indikatoren.....	235
III.1.5	Aufbau von Teil III .....	237
III.2	Charakterisierung des Wohngebäudebestandes und Ableitung des Startwohngebäudebestandes im Jahr 2006.....	239
III.2.1	Gebäudehüllen: Bestand, Sanierung und Neubau .....	239
III.2.1.1	Gebäudetypologie des Statistischen Bundesamtes ..	240
III.2.1.2	Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU).....	241
III.2.1.3	Transformation der Gebäudetypologien.....	242
III.2.1.4	Erweiterung der Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) .....	245
III.2.1.5	Bestimmung des Ausgangszustandes der Hülle 2006.....	248

III.2.1.6	Wohnungsleerstand.....	252
III.2.2	Anlagentechnik: Bestand, Sanierung und Neubau .....	252
III.2.2.1	Anlagentechnikvarianten im Bestand .....	253
III.2.2.2	Anlagentechnik bei der Sanierung .....	258
III.2.2.3	Anlagentechnikvarianten beim Neubau .....	263
III.2.3	Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs .....	264
III.2.4	Zeitliche und räumliche Auflösung .....	266
III.2.5	Exkurs: Ansatz zur schrittweisen Vervollständigung und Plausibilitätskontrolle der emissionsrelevanten Daten zu Wärmeerzeugern im deutschen Wohngebäudebestand .....	267
III.2.5.1	Grundlagen .....	267
III.2.5.2	Auswertung .....	271
III.2.5.3	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	275
III.3	Veränderung des Wohngebäudebestandes 2006-2030 .....	279
III.3.1	Neubau .....	279
III.3.2	Abriss .....	281
III.3.3	Modellierung der Sanierungsentscheidung .....	282
III.4	Szenarios: Unsichere Parameter und umweltpolitische Instrumente ..	291
III.4.1	Unsichere Parameter.....	291
III.4.2	Umweltpolitische Instrumente.....	292
III.4.3	Szenarios .....	295
III.5	Kalibrierung des Modells für das Szenario Basis.....	297
III.5.1	Kalibrierung des Startbestandes 2006.....	297
III.5.1.1	Wohnflächen im Jahr 2006.....	297
III.5.1.2	Endenergiebedarf im Jahr 2006 .....	300
III.5.1.3	Heizwärmebedarf im Jahr 2006 .....	302
III.5.1.4	Emissionen an Luftschadstoffen und Treibhausgasen im Jahr 2006 .....	307

---

III.5.1.5 Anteil energetisch sanierter Gebäude im Jahr 2006 .	307
III.5.2 Kalibrierung der Wohngebäudebestandsveränderung .....	309
III.5.2.1 Entwicklung des Wohnflächenbestandes .....	310
III.5.2.2 Entwicklung des Endenergiebedarfs .....	310
III.5.2.3 Höhe der energetischen Sanierungsrate .....	311
III.5.2.4 Jährliche Investitionen und Fördervolumina.....	312
III.6 Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion .....	315
III.6.1 Aktueller Endenergiebedarf und dessen Entwicklung .....	315
III.6.2 Entwicklung der Emissionen .....	319
III.6.2.1 Entwicklung der PM-Emissionen.....	320
III.6.2.2 Entwicklung der NO <sub>x</sub> -Emissionen.....	322
III.6.2.3 Entwicklung der SO <sub>2</sub> -Emissionen .....	324
III.6.2.4 Entwicklung der NMVOC-Emissionen .....	326
III.6.2.5 Entwicklung der CH <sub>4</sub> -Emissionen.....	328
III.6.2.6 Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	330
III.6.3 Anteile der Gebäudehüllenvarianten .....	330
III.6.4 Ökonomische Kenngrößen .....	332
III.6.5 Einschränkungen .....	335
III.7 Zusammenfassung und Ausblick zu Teil III.....	337
III.7.1 Zusammenfassung.....	337
III.7.2 Schlussfolgerungen.....	338
III.7.3 Ausblick .....	339
III.8 Literatur zu Teil III.....	341
<b>IV Verkehr</b>	
<b>(C. Doll, M. Krail) .....</b>	<b>347</b>
IV.1 Einführung .....	349

IV.2	Schadstoffemissionen im Verkehr .....	351
IV.2.1	Die Entwicklung von Verkehrsaufkommen und Emissionen in Deutschland .....	351
IV.2.2	Bewertung der externen Effekte des Verkehrs .....	355
IV.2.2.1	Einführung .....	355
IV.2.2.2	Kosten durch die Emission von Treibhausgasen ....	360
IV.2.2.3	Kosten der Luftverschmutzung .....	362
IV.2.3	Optionen zur Schadstoffreduktion .....	363
IV.3	Szenarien zur Emissionsminderung .....	367
IV.3.1	Vorstellung der verschiedenen Maßnahmengruppen (Tech- nik, Regulierung, Pricing) .....	369
IV.3.1.1	Regulatorische Maßnahmen .....	369
IV.3.1.2	Marktmechanismen .....	371
IV.3.1.3	Anreizpolitik .....	373
IV.3.2	Interdependenzen zwischen und innerhalb der Maßnahmen- gruppen .....	374
IV.3.3	Einführung in die quantitative Umsetzung .....	375
IV.4	Technische Potenziale zur Emissionsminderung .....	379
IV.4.1	Die otello-Maßnahmen-Datenbank .....	379
IV.4.2	Ergebnisse nach Verkehrsträgern .....	383
IV.4.3	Interpretation der Ergebnisse .....	386
IV.5	Integrierte Modellierung mit ASTRA .....	387
IV.5.1	Abbildung von Politiken .....	390
IV.5.2	Datenbasis und Datenbestand .....	392
IV.5.3	Modellierung .....	392
IV.5.4	ASTRA Module .....	393
IV.5.4.1	Bevölkerung .....	393
IV.5.4.2	Makroökonomie .....	394

IV.5.4.3	Verkehrsmodellierung .....	398
IV.5.4.4	Verkehrstechnologie .....	401
IV.5.4.5	Modellierung der Emissionen .....	402
IV.6	Szenarien und Ergebnisse .....	405
IV.6.1	Basisszenario .....	406
IV.6.1.1	Definition des Basisszenarios .....	406
IV.6.1.2	Ergebnisse des Basisszenarios (REF) .....	407
IV.6.2	Szenarien zur Minderung von Luftschadstoffen .....	415
IV.6.2.1	Moderate Ausweitung der Preispolitiken (PP1).....	416
IV.6.2.2	Ambitionierte Ausweitung der Preispolitiken (PP2) .....	427
IV.6.2.3	Moderate Ausweitung der Regulierungspolitiken (PP3) .....	433
IV.6.2.4	Ambitionierte Ausweitung der Regulierungspoli- tiken (PP4).....	441
IV.7	Fazit und Ausblick zu Teil IV.....	447
IV.8	Literatur zu Teil IV .....	451
<b>V</b>	<b>Exemplarische Anwendung des otello-Modellsystems (P. Breun, T. Comes, C. Doll, M. Fröhling, M. Hiete, R. Il- sen, M. Krail, T. Lützkendorf, F. Schultmann, J. Stengel, M. Unholzer) .....</b>	<b>459</b>
V.1	Einleitung .....	461
V.2	Bereichsübergreifende Modellergebnisse .....	463
V.2.1	Basisszenario .....	466

V.2.2	Weitere Szenarios .....	467
V.2.2.1	Ökoschnellmodernisierer im Teilmodell Wohngebäude.....	467
V.2.2.2	Ökoschnellmodernisierer in den Teilmodellen Wohngebäude und Industrie.....	469
V.2.2.3	Ökosteuer.....	470
V.3	Multikriterielle Bewertung .....	471
V.3.1	Szenarioanalyse zum Umgang mit Unsicherheiten.....	471
V.3.2	Entscheidungsunterstützung.....	475
V.3.3	Exemplarische Ergebnisse .....	476
V.4	Zusammenfassung und Ausblick zu Teil V .....	481
V.5	Literatur zu Teil V .....	483
<b>VI</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>487</b>
VI.1	Zusammenfassung .....	489
VI.2	Ausblick .....	495
A	Abbildungsverzeichnis .....	497
B	Tabellenverzeichnis .....	509

# **Teil I.**

## **Motivation und Hintergrund**

**(P. Breun, T. Comes, C. Doll, M. Fröhling, M. Hiete, R. Ilse, M. Krail,  
T. Lützkendorf, F. Schultmann, J. Stengel, M. Unholzer)**



## I.1. Problemstellung und Zielsetzung

Erste Maßnahmen zur Luftreinhaltung werden bereits aus dem Mittelalter berichtet, als beispielsweise Aktivitäten wie das Glockengießen wegen ihrer Geruchsbelästigung und Rauchentwicklung in die Außenbezirke von Städten verlegt werden mussten. Auf das 16. Jahrhundert gehen erste Berichte zu Umweltschäden durch metallurgische Betriebe zurück. Dennoch wurden erst in den 1950er Jahren in Großbritannien und den 1960er Jahren in Deutschland Gesetze zur Luftreinhaltung erlassen. Diese zielten zunächst auf eine Verbesserung der Luftqualität mit lokalem Fokus und betrafen  $\text{SO}_2$  und Staubemissionen. Über die Jahre haben sich die Betrachtungsschwerpunkte verschoben. In den 1980er Jahren trat der saure Regen durch grenzüberschreitenden Transport von  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  in den Vordergrund, in den 1990er Jahren der Sommersmog, der durch Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOCs) und  $\text{NO}_x$  hervorgerufen wird. In den 2000er Jahren waren es schließlich Staubemissionen und die dadurch hervorgerufenen Gesundheitseffekte, die im Fokus der Luftreinhaltung standen. Seit einigen Jahren nun liegt der Schwerpunkt der Aktivitäten zur Emissionsminderung auf klimarelevanten Gasen, um den anthropogen verursachten Treibhauseffekt zu verringern.

Die großen Anstrengungen im Bereich der Luftreinhaltung haben Wirkung gezeigt. Es wurden große Fortschritte bei der Reduzierung von Luftschadstoffen erzielt (vgl. Kapitel I.2.1). Dennoch bleiben Emissionsminderung und Luftqualität in weiten Teilen der EU drängende Probleme. Dies ist insbesondere auf die akuten und chronischen negativen Gesundheitswirkungen sowie Schädigungen von Ökosystemen durch Überschreitung kritischer Schadstofffrachten und -konzentrationen sowie die negativen Gesundheitseffekte und deren ökonomi-

schen Wirkungen, bspw. durch medizinische Behandlung, Einkommensverluste, verringerte Ernteerträge sowie Schäden an Materialien wie etwa Gebäuden und Infrastruktur, zurückzuführen. Hauptprobleme sind dabei die Versauerung, bspw. durch die Schadstoffe  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$ , Eutrophierung, z.B. durch  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ , Bildung von bodennahem Ozon, z.B. durch  $\text{NO}_x$  und VOC, sowie Gesundheitsrisiken, bspw. durch primäre und sekundäre Aerosole, Schwermetalle, VOCs und  $\text{NO}_x$ , sowie der Klimawandel, z.B. durch  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ .

Auf lokaler Ebene, EU-Ebene, bis hin zur globalen Ebene wurden und werden daher Strategien zur Emissionsminderung und Luftreinhaltung entwickelt. So wurde, um grenzüberschreitende Luftverschmutzung zu verringern, 1979 die UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) verabschiedet, die seither um acht Protokolle ergänzt wurde. 1999 wurde das Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone (Göteborg-Protokoll) verabschiedet, in dem sich die unterzeichnenden Parteien verpflichtet haben, Emissionshöchstmengen (emission ceilings) für  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  und VOC im Jahr 2010 nicht zu überschreiten. Die EU, die ihrerseits zu den unterzeichnenden Parteien gehört, hat in der Folge mit der NEC-Direktive (2001/81/EC), die sich derzeit in Revision befindet, Emissionshöchstgrenzen gesetzt, die von ihren Mitgliedstaaten einzuhalten sind. Die als Tonnen pro Jahr festgelegten Emissionshöchstmengen überlassen es den Ländern, wie diese erreicht werden. Hierzu stehen den Entscheidungsträgern eine Vielzahl sehr unterschiedlicher möglicher Instrumente zur Verfügung. Auf diese Weise entsteht ein Bewertungs- und Allokationsproblem für die Mitgliedsstaaten bei der Bestimmung der bestmöglichen Wege zur Erreichung der notwendigen Einhaltung nationaler Emissionshöchstgrenzen.

Ziel des diesem Bericht zugrunde liegenden Forschungsvorhabens<sup>1</sup> ist die Entwicklung eines Instrumentariums zur Bewertung von umweltpolitischen Instrumenten eines Emissionsmanagements im Hinblick auf die Einhaltung der Min-

---

<sup>1</sup>Das Forschungsvorhaben mit dem offiziellen Titel „Entwicklung eines integrierten, optimierenden Bewertungs- und Allokationsmodells für ein nationales Emissionsmanagement (otello)“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 01UN0603 gefördert. Für den Inhalt des vorliegenden Berichts sind die Autoren verantwortlich.

---

derungsverpflichtungen, die sich durch internationale Luftreinhalteabkommen wie CLRTAP oder der NEC-Direktive ergeben. Damit soll ein Entscheidungsunterstützungssystem für politische Entscheidungsträger entwickelt werden.

Die zur Ableitung der nationalen Minderungsziele eingesetzten Werkzeuge bedienen sich cost-effectiveness und cost-benefit-Ansätzen, die Emissionsminderungskosten mit ihren (monetär bewerteten) Effekten in Beziehung setzen. Dabei kommt es vielfach zu Problemen, die gleichzeitigen Effekte auf mehrere Schadstoffe (multi-pollutant) und unterschiedlichen Effekte, die durch einen Schadstoff (multi-effect) hervorgerufen werden, zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Bewertung von integrierten und nicht-technischen Maßnahmen, die für weitere Minderungen von großer Bedeutung sind, im Vergleich zu nachgeschalteten Maßnahmen (end-of-pipe) schwieriger. Schließlich dürfen die Effekte nicht losgelöst betrachtet werden. Vielmehr müssen Wechselwirkungen über Bereichs- und Sektorgrenzen hinaus ebenso Berücksichtigung finden. Hierzu zählen etwa makroökonomische Effekte wie höhere Produktpreise, die zu einer geringeren Wettbewerbsfähigkeit führen und Beschäftigungseffekte, die durch Unternehmen, die Minderungstechnologien anbieten, erzielt werden. Nicht zuletzt spielt auch die für nationale Entscheidungen notwendige detaillierte, disaggregierte Betrachtung eine wesentliche Rolle. Mit der Entwicklung eines nationalen Bewertungs- und Allokationsmodells für das Emissionsmanagement sollen daher auch Beiträge zur methodischen Fortentwicklung solcher Werkzeuge im Hinblick auf die angesprochenen Herausforderungen geleistet werden.

Der vorliegende Bericht ist so aufgebaut, dass in dem ersten Berichtsteil ein Überblick über Hintergrund, Zielsetzung und den allgemeinen Ansatz bei der Entwicklung des Entscheidungsunterstützungswerkzeuges gegeben werden. Im Anschluss an diese Einführung wird daher die aktuelle Situation in der Luftreinhaltung in Deutschland dargestellt, hinsichtlich Emissionen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Daraus wird der spezifische Bedarf an Entscheidungsunterstützung und die Anforderungen an die Modellierung abgeleitet, bevor ein Überblick über das entwickelte Modellsystem gegeben wird. Nach diesem ersten

Teil werden die entwickelten Bereichsmodelle für Industrie & Energieversorgung (Teil II), Wohngebäude (Teil III) und Verkehr (Teil IV) vorgestellt, jeweils mit den spezifischen Anforderungen, Modellüberblick, Implementierung, Datengrundlage sowie bereichsspezifischen Ergebnissen. In Teil V schließlich wird das otello-Modellsystem in verschiedenen Szenarien exemplarisch angewendet, um die Rückkopplungen und Schnittstellen zwischen den einzelnen Bereichsmodulen darzustellen und auf die implementierte multi-kriterielle Bewertung einzugehen. Teil VI fasst den Bericht zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Arbeiten.

## **I.2. Hintergrund und aktuelle Situation des Emissionsmanagements in Deutschland**

### **I.2.1. Emissionssituation in Deutschland**

Anthropogene Belastungen bestehen in Form von Emissionen in die Umwelt oder Entnahme von Ressourcen aus der Umwelt. Der Begriff Emission bezeichnet die Freisetzung von Schadstoffen (oder schädigenden Einflüssen wie Lärm oder Strahlung) in die Umgebung über die Medien Luft, Wasser oder Boden. Es gibt zahlreiche natürliche Emissionsquellen (z. B. Vulkane), der Einfluss der anthropogenen Quellen überwiegt für die meisten Schadstoffe inzwischen jedoch deutlich. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung anthropogener Emissionen der Schadstoffe  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , NMVOC,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  und Feinstaub in die Luft.

Die Gesamtemissionen sind in Deutschland seit den 1990er Jahren für fast alle Schadstoffe deutlich gesunken. Dies ist einerseits auf eine strengere Gesetzgebung zurückzuführen. Andererseits hat die Stilllegung zahlreicher alter Fabriken der ehemaligen DDR den Schadstoffausstoß bezogen auf die gesamte Bundesrepublik deutlich gesenkt. Vor allem für die beiden klassischen Luftschadstoffe  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  lässt sich ein deutlicher Rückgang um fast 90% feststellen, wobei der stärkste Rückgang in den 90er Jahren erzielt wurde (vgl. Abbildung I.2.1). Die absoluten Zahlen sind in Tabelle I.2.1 aufgeführt.

Die Werte der Emissionsfrachten sind den nationalen Inventarberichten (Umweltbundesamt (2010a) und Umweltbundesamt (2010b)) entnommen. Diese strukturieren die verschiedenen Verursachergruppen, die als Quellkategorien bezeichnet werden, nach den Berichtsformaten 'Common Reporting Format (CRF)' und 'New Reporting Format (NFR)'. Die beiden Formate haben im Wesentlichen

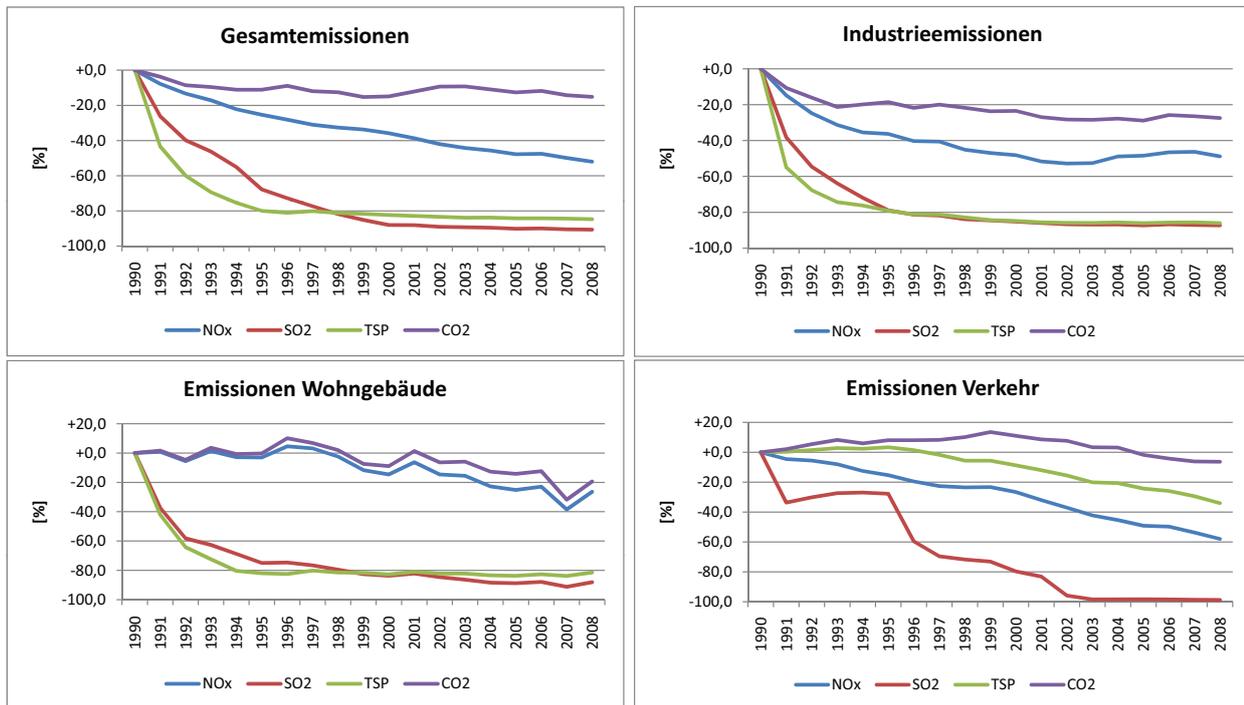


Abb. I.2.1.: Minderung der Gesamtemissionen in Deutschland bezogen auf das Jahr 1990

Tab. I.2.1.: Berichtete Emissionen der Jahre 1990 und 2008 für die betrachteten Teilbereiche

Bereich	Jahr	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	TSP	CO <sub>2</sub>
		[Gg]			
gesamt	1990	2.877	5.311	1.874	1.036.716
	2008	1.380	498	287	833.092
Industrie	1990	384	1.082	524	241.669
	2008	196	137	73	175.302
Wohn- gebäude	1990	92	450	135	129.474
	2008	68	54	25	104.412
Verkehr	1990	1.498	106	72	162.611
	2008	630	1	48	152.327

Quelle: Nationale Inventarberichte (siehe Umweltbundesamt (2010a,b) sowie die zugehörigen Datentabellen)

die gleiche Struktur, lediglich in Unterpunkten weisen sie unterschiedlich tief gehende Untergliederungen auf. Neben der Industrie werden als wesentliche Verursachergruppen Energiewirtschaft, Verkehr und Haushalte unterschieden. Als Industrieemissionen werden hier die Emissionen der Quellkategorien 2: *Industrial Processes* und 3: *Solvent and Other Product Use* sowie 1A2: *Fuel Combustion in Manufacturing Industries and Construction* betrachtet. Für die Emissionen aus Wohngebäuden wird der ausgewiesene Teilbereich *Residential* der Quellkategorie 1A4: *Fuel Combustion - other Sectors* herangezogen. Der Bereich Verkehr umfasst die Kategorie 1A3: *Transport*.

Für die Emissionen, die auf Industrieprozesse zurückzuführen sind, wurde ein ähnlicher Verlauf wie für die Gesamtemissionen beobachtet (vgl. Abbildung I.2.1). Die Anteile der Industrieprozesse an den Gesamtemissionen belaufen sich im Jahr 2008 auf 15,5% für  $\text{NO}_x$ , 27,6% für  $\text{SO}_2$ , 31,4% für Feinstaub und 20,5% für  $\text{CO}_2$  (s. Abbildung I.2.2). Abbildung I.2.2 zeigt die Anteile verschiedener Quellkategorien an den Emissionen der Industrie. Den größten Beitrag zu den Industrieemissionen an  $\text{CO}_2$  sowie  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  liefern mit 53,5%, 39,7% und 33,0% die verschiedenen Verbrennungsprozesse zur Bereitstellung von Prozesswärme, Dampf oder Elektrizität aus Industriekraftwerken. Die Emissionen aus Verbrennungsprozessen werden soweit dies aus den Inventarberichten hervorgeht, den verschiedenen Sektoren zugeordnet und mit diesen gemeinsam ausgewiesen. Dennoch stellen weitere Verbrennungsprozesse in anderen als den einzeln aufgeführten Industriesektoren weiterhin den größten Anteil dar. Die Eisen & Stahl-Industrie ist ein bedeutender Wirtschaftszweig in Deutschland, was sich auch in ihrem Beitrag zu den Emissionen zeigt. Für weitere energieintensive Industriezweige wie die Zement-, Kalk- und die Chemische Industrie werden ebenfalls hohe Emissionen berichtet. Insgesamt weisen die drei Schadstoffe  $\text{CO}_2$  sowie  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  eine ähnliche Verursacherstruktur auf.

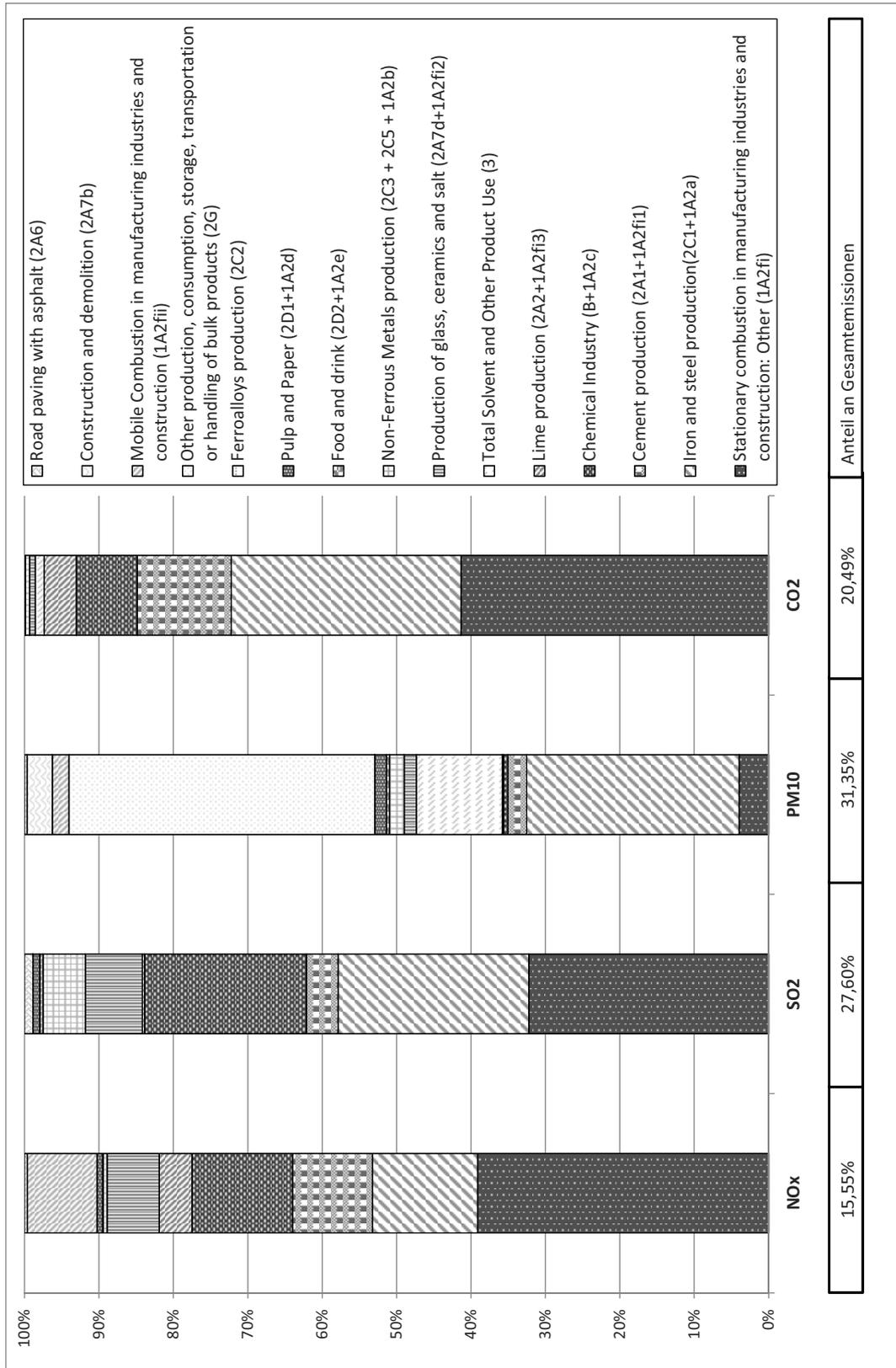


Abb. I.2.2.: Anteile einzelner Quellkategorien an den Industrieemissionen (Jahr 2008)

Staubemissionen hingegen gehen maßgeblich mit Lagerungs- und Handhabungsvorgängen (Kategorie 2G) einher, die nicht sektorspezifisch im NIR aufgeführt werden. Die Verwendung von Lösemitteln (Kategorie 3) spielt für die hier betrachteten Schadstoffe nur eine untergeordnete Rolle, ist jedoch für eine Betrachtung der Treibhausgase HFCs, PFCs und SF<sub>6</sub> sowie NMVOC bedeutend. Auch hier handelt es sich wieder um eine sektorübergreifende Quellkategorie.

Die drei im Modell implementierten Sektoren Energieversorgung, Zement und Stahl trugen im Jahr 2008 mit 63,4% der NO<sub>x</sub>-, 67,5% der SO<sub>2</sub>, 15,1% der Feinstaub- und 71,8% der CO<sub>2</sub>-Emissionen einen wesentlichen Teil zu den Industrieemissionen bei.

Die von dem im Projekt umgesetzten Modellsystem erfassten Emissionen aus Industrie, Wohngebäuden und Verkehr stellen mit 73% der CO<sub>2</sub>, 75% der NO<sub>x</sub>, 60% der SO<sub>2</sub> und 45% der Feinstaubemissionen einen wesentlichen Teil der Gesamtemissionen dar.

## **I.2.2. Rechtliche Rahmenbedingungen**

### **I.2.2.1. Umweltpolitische Instrumente**

Politische Entscheidungsträger sehen sich einer Vielzahl von Instrumenten gegenüber, die das Verhalten der Akteure aus der Wirtschaft hinsichtlich einem nachhaltigen Umgang mit der Umwelt auf unterschiedliche Weise beeinflussen können. Diese Instrumente können z.B. nach Wicke (1993) in

- nicht-fiskalische Instrumente,
- Umweltpolitik mit öffentlichen Ausgaben,
- Umweltpolitik mit öffentlichen Einnahmen sowie
- marktorientierte Instrumente

untergliedert werden, wobei eine Vielzahl konkreter Ausgestaltungsmöglichkeiten existiert. Im Folgenden werden die wichtigsten Instrumente, deren Einfluss auch im Rahmen des Modells untersucht wird, eingeordnet und kurz erläutert.

Zu den *nicht-fiskalischen Instrumenten* zählen z. B. Auflagen, die durch Verbote und Gebote direkten Einfluss auf die Entscheidungen der Wirtschaftssubjekte nehmen. So können u. a. im Rahmen von Emissionsauflagen absolute oder relative Grenzwerte für bestimmte Anlagen festgelegt oder durch Auflagen für Produktionsverfahren der Einsatz umweltschädlicher Roh- und Betriebsstoffe untersagt werden. Nach Wicke (1993) zeichnen sich Auflagen durch eine größere Reaktionssicherheit gegenüber Anreizinstrumenten aus, da bei letzteren die Reaktion der Emittenten und damit die Einflussnahme auf die Umwelt weniger präzise abgeschätzt werden kann. Weitere markante Vorteile sind die große Praktikabilität, die aus den klaren Vorgaben resultiert, sowie die schnellere Wirksamkeit bei entsprechender Durchsetzung und Überwachung der Ge- und Verbote. Nachteilig wirkt sich jedoch die fehlende Berücksichtigung der Kostenstruktur einzelner Anlagen aus. So können sich die Kosten und Investitionen für die gleiche Minderungsleistung bei verschiedenen Anlagen deutlich unterscheiden, was zu wirtschaftlicher Ineffizienz führt, da das Ziel der Emissionsminderung nicht mit minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten erreicht wird.

Genau hier setzt die Idee des Zertifikatehandels an, der zu den *marktorientierten Instrumenten* gezählt werden kann. Beim Zertifikatehandel muss das Recht, eine bestimmte Menge zu emittieren, erworben werden. Die Idee dahinter ist die Festlegung einer bestimmten kumulierten Emissionsmenge durch die politischen Entscheidungsträger und die Ausnutzung des Marktmechanismus für eine wirtschaftlich effiziente Allokation der einzelnen Zertifikate. Ein Unternehmen sieht sich demnach der Entscheidung gegenüber, eine bestimmte Menge an Zertifikaten zu erwerben, was eine Preissteigerung der Zertifikate zu Folge hätte, oder durch entsprechende Investitionen die Emissionen zu verringern. So findet die Kostenstruktur einzelner Anlagen Berücksichtigung und das Ziel der Emissionsminderung kann mit minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten erreicht werden.

Neben den Vorteilen der effizienten wirtschaftlichen Allokation und der einstellbaren Emissionshöchstmenge erweist sich jedoch die Tatsache, dass das Instrument bei bestimmten Umweltproblemen nur regionalisiert angewendet werden kann als schwierig. Wird diese Begebenheit nicht berücksichtigt, könnten z. B. hohe lokale Belastungen einzelner Gebiete entstehen. Vor allem aber ist die Einführung eines Zertifikatehandels mit enormen politisch-administrativen sowie rechtlichen Problemen verbunden.

Ein weiteres untersuchtes Instrument sind Abgaben in der Form von Steuern. Diese können der *Umweltpolitik mit öffentlichen Ausgaben* zugeordnet werden. Der verfolgte Zweck von Abgaben ist vielschichtig. So steht bei Umweltfinanzierungsabgaben die Mittelverwendung für umweltspezifische Maßnahmen im Vordergrund, während Umweltlenkungsabgaben einen ökonomischen Anreiz zur Verminderung bestimmter Schadstoffe liefern sollen. Letztere werden auch im Kontext des Modells untersucht. Wichtige Beispiele sind die sog. Ökosteuer sowie Schadstoffsteuern. Während bei der Schadstoffsteuer ein direkter Anreiz zur Minderung der von ihr belegten Emissionen besteht, bewirkt die Ökosteuer nur einen indirekten Anreiz, da nicht die Emissionen sondern nur der Verbrauch bestimmter Brennstoffe besteuert wird. Ein großer Vorteil von Steuern liegt in der ökonomischen Effizienz, da sich die Höhe der Abgaben einzelner Unternehmen, ähnlich dem Zertifikatehandel, nach dem jeweiligen zugehörigen Kostenkalkül bestimmt. Jedoch kann die Höhe des geforderten Emissionsniveaus nur sehr schwer eingestellt werden. Zudem muss durch eine Anpassung der Steuer der ökonomische Anreiz fortwährend gewahrt werden.

Subventionen lassen sich der *Umweltpolitik mit öffentlichen Ausgaben* zuordnen. Sie stellen vermögenswerte Leistungen des Staates an Private dar und dienen der Erreichung eines bestimmten umweltpolitischen Ziels. Dabei lassen sich indirekte Subventionen, die steuerlichen Vergünstigungen entsprechen, sowie direkte Subventionen, mit denen eine Zahlung des Staates an Private einhergeht, unterscheiden. Auch mit Subventionen können durch ökonomischen Anreiz umweltverbessernde privatwirtschaftliche Aktivitäten induziert werden. Allerdings besteht

die Gefahr von Wettbewerbsverzerrungen, da Subventionen in der Regel nur für einen ausgewählten Bereich gewährt werden.

### I.2.2.2. Gesetzlicher Rahmen zur Erfüllung internationaler Vereinbarungen

Die Ausgestaltung der politischen Instrumente im Bereich Luftreinhaltung und Klimaschutz für die Bundesrepublik Deutschland geht maßgeblich auf Verordnungen, Richtlinien und Verträge aus internationalem Kontext zurück. Deren Inhalte sind durch zahlreiche Abhängigkeiten und gegenseitige Einflussnahme gekennzeichnet. Abbildung I.2.3 skizziert die wichtigsten, für die zu untersuchende Luftreinhaltungspolitik in Deutschland relevanten Treiber und deren Implikationen auf deutscher, europäischer sowie globaler Ebene. Im folgenden Abschnitt werden internationale Vorgaben vorgestellt, aus denen Minderungsziele für Deutschland als Ganzes hervorgehen.

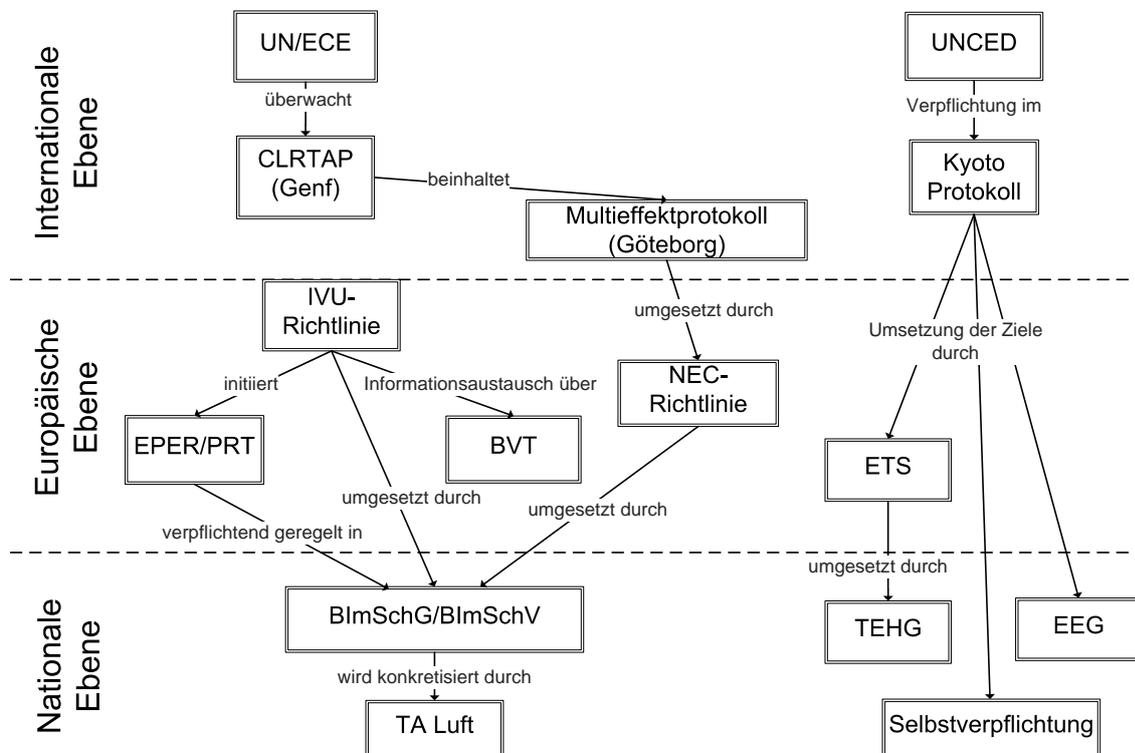


Abb. I.2.3.: Rechtlicher Rahmen der Umweltgesetzgebung im Bereich Luftreinhaltung und Klimaschutz

Nach LfU (2008b) bedarf es einer intensiven internationalen Zusammenarbeit, um nachhaltige Erfolge erzielen zu können. Gründe hierfür liegen vor allem in dem grenzüberschreitenden Transport von Schadstoffen durch die Luft, auf den alleine durch die nationale Gesetzgebung nur geringer Einfluss ausgeübt werden kann. Diese internationale Zusammenarbeit wurde beispielsweise durch das Genfer Luftreinhalteübereinkommen<sup>1</sup> realisiert. Dieses gilt nach Peters u. a. (2002) als Meilenstein in der Umweltpolitik. Es geht zurück auf das Jahr 1979 und auf die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (United Nation Economic Commission for Europe, UNECE) und schuf damit das erste rechtsverbindliche Instrument bezogen auf eine globale Umweltpolitik. Auf Grundlage des Übereinkommens wurden insgesamt acht Protokolle erlassen, darunter auch das als Göteborg-Protokoll<sup>2</sup> bekannt gewordene Protokoll zur Verringerung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon. Hervorzuheben ist, dass „bei der Bestimmung der Zielwerte auch ökonomischen Gesichtspunkten und den finanziellen Situationen der beteiligten Länder Rechnung getragen wird“ (Senger (2000)). So verpflichtete sich Deutschland, dem auch durch seine zentrale Lage in Europa besondere Bedeutung im Rahmen einer grenzüberschreitenden Luftreinhaltepolitik zukommt, zu vergleichsweise hohen Schadstoffreduzierungen. Deutschland strebte für das Jahr 2010 einen Emissionshöchstwert für SO<sub>2</sub> an, der 90% unter dem von 1990 liegt, während die restlichen Mitgliedsstaaten im Mittel eine Minderung von 75% anstrebten.

Auf europäischer Ebene wird das Göteborg-Protokoll durch die NEC-Richtlinie<sup>3</sup> umgesetzt (vgl. Abbildung I.2.3). Nach Artikel 1 der NEC-Richtlinie ist das erklärte Ziel „den Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit gegen die Risiken der Versauerung, der Eutrophierung des Bodens und des boden-

---

<sup>1</sup>Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) der UNECE vom 13.11.1979, in Kraft getreten am 16.03.1983.

<sup>2</sup>UNECE Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone vom 30.11.1999, auch als Multikomponenten- oder Multieffekt-Protokoll bezeichnet. Letzteres stellt die schädlichen Wirkungen und nicht die einzelnen Emissionshöchstmengen in den Vordergrund.

<sup>3</sup>Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 23. Oktober 2001, über nationale Emissionshöchstmengen (National Emission Ceilings) für bestimmte Luftschadstoffe.

nahen Ozons zu verbessern“, was die Nähe zum Göteborg-Protokoll verdeutlicht. Dieses Ziel soll durch die Festsetzung nationaler Emissionshöchstmengen erreicht werden.

Die Umsetzung der NEC-Richtlinie in geltendes nationales Recht erfolgt durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz<sup>4</sup>, welches das maßgebliche Regelwerk darstellt, an dem sich Emittenten, wie industrielle Anlagenbetreiber, aber auch Besitzer von Hausfeuerung und Konstrukteure von Kraftfahrzeugen, im Rahmen der Umweltpolitik zu orientieren haben und das schon seit 1974 Bestand hat. Die konkrete Ausgestaltung der NEC-Richtlinie findet sich in der 39. Bundes-Immissionsschutzverordnung<sup>5</sup> wieder.

In Tabelle I.2.2 sind die Emissionen für Gesamtdeutschland den in der NEC-Richtlinie als nationale Emissionshöchstmengen vereinbarten Zielwerten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass den Schätzungen aus 2006 zufolge eine ausreichende Minderung für SO<sub>2</sub> und NMVOC wahrscheinlich ist, für NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> wurden weitere Maßnahmen eingeleitet.<sup>6</sup> Die tatsächlichen Zahlen aus dem Inventarbericht für 2010 liegen derzeit noch nicht vor. Der Rückgang der wirtschaftlichen Aktivität auf Grund der Wirtschaftskrise lässt jedoch vermuten, dass die Reduktionsziele erreicht wurden. Eine Minderung der Treibhausgase, zusammengefasst angegeben in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, um 21% gegenüber 1990 wurde im Rahmen der EU-Lastenverteilung zur Einhaltung der Vereinbarungen des Kyoto-Protokolls (vgl. folgende Ausführungen) festgeschrieben und konnte ebenfalls eingehalten werden. Für das Jahr 2020 hat sich die Bundesregierung eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 40% gegenüber 1990 zum Ziel gesetzt, was einer Höchstmenge von 739.000 Gg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gleichkommt.

---

<sup>4</sup>Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 1. März 2011 (BGBl. I S. 282) geändert worden ist (BImSchG).

<sup>5</sup>Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065) (39. BImSchV).

<sup>6</sup>Vgl. UBA (2007c).

Tab. I.2.2.: Gegenüberstellung der berichteten Emissionen mit den Zielwerten aus der NEC-Richtlinie bzw. dem Minderungsziel im Rahmen der EU-Lastenverteilung

	Emissionen		Prognose	Minderungsziel
	1990	2008	2010 <sup>1</sup>	2010
	[Gg]			
NO <sub>x</sub>	2.877	1.380	1.112	1.051
SO <sub>2</sub>	5.311	498	459	520
NH <sub>3</sub>	671	587	610	550
NMVOG	3.736	1.267	987	995
TSP	1.874	287	252	
CO <sub>2</sub>	1.036.716	833.092		
CO <sub>2</sub> -Äquivalente	1.231.865	958.850		974.000 <sup>2</sup>

Quelle, sofern nicht anders genannt: Nationale Inventarberichte (Umweltbundesamt (2010a,b) sowie die zugehörigen Datentabellen)

<sup>1</sup> aus UBA (2007b) bzw. für TSP aus UBA (2007a)

<sup>2</sup> Minderung um 21% gegenüber dem Basisjahr 1990 gemäß Kyoto-Ziel nach EU-Lastenverteilung

Neben der NEC-Richtlinie stellt die Luftqualitätsrichtlinie<sup>7</sup> einen wichtigen Baustein zur Erreichung der in der Thematischen Strategie zur Luftreinhaltung<sup>8</sup> der EU festgelegten Ziele dar. Die Luftqualitätsrichtlinie schreibt Grenz-, Alarm-, Ziel- und Informationswerte für Schadstoffkonzentrationen in der Luft vor und gewährleistet die Information der Öffentlichkeit über die Luftqualität. So sollen schädliche Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt verringert werden.

Auch die Gesetzgebung im Rahmen des Klimawandels hat internationalen Ursprung. So waren an der UNCED-Konferenz (UN Conference on Environment and Development) im Jahre 1992 insgesamt 172 Regierungen beteiligt, weswegen die Konferenz auch als Erdgipfel bezeichnet wird.<sup>9</sup> Hier wurde die Klimarahmenkonvention<sup>10</sup> unterzeichnet, deren Zielsetzung es ist, die klimarelevanten Gase auf

<sup>7</sup>Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa vom 21. Mai 2008.

<sup>8</sup>Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament (KOM(2005) 446) vom 21.9.2005: Thematische Strategie zur Luftreinhaltung.

<sup>9</sup>Vgl. <http://www.un.org/geninfo/bp/enviro.html>.

<sup>10</sup>United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC.

einem ungefährlichen Niveau zu stabilisieren. Als konkretes Ziel sollten dabei die Treibhausgasemissionen der Industrieländer auf das Niveau von 1990 zurückgeführt werden.<sup>11</sup> Bis heute haben 194 Staaten ratifiziert.<sup>12</sup> Das Protokoll von Kyoto<sup>13</sup> ist auf einer der jährlichen Konferenzen der Vertragsstaaten entstanden. In diesem verpflichten sich die Vertragsstaaten zu einer Minderung ihrer Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2008 bis 2012 von mindestens 5%. Für die EU ergeben sich sogar Reduktionsverpflichtungen von 8%. Das Protokoll schafft einen Rahmen zur Einführung flexibler Instrumente zur Emissionsminderung wie den Emissionshandel, Clean Development Mechanism und Joint Implementation sollen zusätzlich durch eine Übertragung von Emissionsrechten die Zusammenarbeit zwischen Industrie- und Entwicklungsländern fördern.

Auf europäischer Ebene hat sich der Emissionszertifikatehandel EU ETS (European Emissions Trading Scheme)<sup>14</sup> als ein unabdingbares Instrument erwiesen, um die im Kyoto-Protokoll festgelegten Treibhausgasminderungsziele einhalten zu können.<sup>15</sup> Obwohl die Einführung und Auslegung des ETS eindeutig durch das Kyoto-Protokoll motiviert ist, ist dessen Rechtsstruktur weitgehend unabhängig davon. So kann die Weiterführung des ETS nach 2012 als sicher angesehen werden, während hingegen Unklarheit über die zukünftige Klimaschutzpolitik im Rahmen des Kyoto-Protokolls herrscht.

Auf nationaler Ebene ergibt sich für Deutschland eine verhältnismäßig hohe Reduktionsverpflichtung von 21% der im Kyoto-Protokoll als treibhausrelevant festgehaltenen Gase (vgl. Tabelle I.2.2).<sup>16</sup> Diese als *burden sharing* bekannte Lastenteilung resultiert aus dem Verständnis, dass vor allem die unterschiedlichen Entwicklungen der Wirtschaft und des Pro-Kopf-Einkommens einzelner Länder Ein-

---

<sup>11</sup>Vgl. LfU (2008a).

<sup>12</sup>Stand April 2011, zum aktuellen Stand der Ratifizierung siehe zum Beispiel <http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/klimapolitik/vertraege/index.htm>.

<sup>13</sup>Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, 1997.

<sup>14</sup>Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates.

<sup>15</sup>Vgl. Ellerman und Buchner (2007).

<sup>16</sup>Vgl. LfU (2008a).

fluss auf die Treibhausgasemissionen und deren Minderungspotential haben und entsprechend in ihren Minderungszielen berücksichtigt werden müssen.<sup>17</sup>

Seitens der Bundesrepublik Deutschland geschieht die Realisierung des Emissionszertifikatehandels durch das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG)<sup>18</sup>. Der Zweck des TEHG ist die Schaffung der Grundlagen eines gemeinschaftsweiten Emissionshandelssystems und dient der Verknüpfung von diesem mit den Zielen des Kyoto-Protokolls.

### **I.2.3. Bedarf an Entscheidungsunterstützung im nationalen Emissionsmanagement**

Wie die vorangehenden Abschnitte zeigen, besteht nach wie vor trotz großer Bemühungen und nicht unerheblicher Erfolge im Bereich der Luftreinhaltung Bedarf zur Minderung der Emissionen und der damit einhergehenden Schäden für Ökosysteme und die menschliche Gesundheit. Auch sind nicht zu vernachlässigende wirtschaftliche Folgen mit der Verschmutzung der Luft etwa durch einen Rückgang der Ernteerträge oder Schädigung von Infrastruktur und Kulturgütern verbunden. Hinzu kommt die Problematik des Klimawandels, die durch die Freisetzung von Treibhausgasen angetrieben wird und die in den kommenden Jahren aller Wahrscheinlichkeit nach verstärkt zu Schäden an Ökosystemen und den davon abhängigen sozio-ökonomischen Systemen führen wird.

Politische Strategien zur Eindämmung der Luftverschmutzung sowie des Klimawandels bedürfen einer länderübergreifenden bis globalen Zusammenarbeit um erfolgreich zu sein. Strategien zur Luftreinhaltung bauen oftmals auf cost-effectiveness oder cost-benefit-Analysen auf, welche Minderungskosten mit deren Effekten vergleichen um so eine möglichst kostengünstige Minderung zu erreichen. Dabei zeigt sich, dass eine integrierte Betrachtung aller Schadstoffe und

---

<sup>17</sup>Für weitere Informationen zur Idee und Fairness des *burden sharing* siehe z. B. Ringius u. a. (2002) oder Carraro (2000).

<sup>18</sup>Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz vom 8. Juli 2004 (BGBl. I S. 1578), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1163) geändert worden ist.

Schadenskategorien unerlässlich ist, da nur so Synergien aber auch Risiken der Schadensverlagerung aufgedeckt werden. In zunehmenden Maße zeichnet sich in der politischen Diskussion eine Berücksichtigung dieses integrativen Ansatzes ab, wie etwa in der IVU-Richtlinie.

Durch die simultane Betrachtung mehrerer Schadstoffe (multi-pollutant) und die Gegenüberstellung verschiedener Schadenskategorien wie Versauerung, Eutrophierung, Bildung bodennahen Ozons, Verschärfung des Treibhauseffekts etc. (multi-effect) wird die Abschätzung der Effekte deutlich komplexer, da zahlreiche Wechselwirkungen berücksichtigt werden müssen. Bisherige Ansätze zur Beurteilung von Maßnahmen durch sog. Kostenkurven sind nicht in der Lage die simultane Minderung mehrerer Schadstoffe zu betrachten. Weiterhin erlangen produktionsintegrierte Minderungsmaßnahmen eine immer größere Bedeutung, sind jedoch hinsichtlich ihrer Kosten schwieriger zu bewerten, da diese in höherem Maße von den individuellen Gegebenheiten der Prozesse abhängen.

Zusätzlich können Vermeidungskosten von Maßnahmen oder Strategien in Zeiten zunehmender globaler Konkurrenz nicht mehr als alleiniges Bewertungskriterium als ausreichend angesehen werden. Globale Effekte wie Carbon Leakage, die auch auf eine drohende Abwanderung von Betrieben ins Ausland zurückgehen, erfordern die Einbeziehung makroökonomischer Bewertungskriterien. Höheren Produktionskosten und damit sinkender Konkurrenzfähigkeit in emissionsintensiven Branchen stehen Innovationspotentiale und die Schaffung neuer Arbeitsplätze in Betrieben der Umweltgüterindustrie gegenüber.

Im Rahmen der UNECE Konvention zur weitreichenden grenzüberschreitenden Luftverschmutzung (CLRTAP) und der daraus hervorgegangenen NEC-Richtlinie wurden nationale Emissionshöchstmengen für die Schadstoffe SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC und NH<sub>3</sub> für Deutschland festgelegt. Auch für CO<sub>2</sub> bestehen aufgrund des Kyoto-Protokolls Minderungsverpflichtungen. Diese Minderungsverpflichtungen stellen Vorgaben zur Menge an emittierten Schadstoffen pro Jahr und Land dar, lassen es den nationalen Regierungen jedoch offen, wie diese Minderungen erreicht werden, d. h. in welchen Bereichen und mit welchen Instrumenten eine

Minderung herbeigeführt werden soll. Hierzu stehen den Entscheidungsträgern eine Vielzahl an Instrumenten zur Verfügung (vgl. I.2.2.1). Es besteht daher ein Bedarf nach Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl politischer Instrumente und der Implementierung einer geeigneten Minderungsstrategie mit dem Ziel, die geforderten Minderungen unter Berücksichtigung anderer politischer Ziele, bspw. wirtschaftliches Wachstum, hoher Beschäftigungsstand oder Preisniveaustabilität, einzuhalten.

Während zur Verhandlung der Emissionshöchstgrenzen internationale Modellrechnungen eingesetzt werden, besteht hier ein Informationsbedarf auf nationaler Ebene. Sog. Integrated Assessment Modelle (IAM) werden eingesetzt, um kosteneffiziente Maßnahmenallokationen zur Erreichung vorgegebener Minderungsziele zu berechnen. Allen voran ist hier das Regional Air Pollution Information and Simulation Model (RAINS) bzw. dessen Nachfolger das Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies Model (GAINS)<sup>19</sup> zu nennen, die die Datenbasis für die Verhandlungen der NEC-Richtlinie liefern. Einige EU-Mitgliedsstaaten, darunter Großbritannien, Italien, Finnland, Irland, die Niederlande und Schweden, haben eigene nationale IAMs entwickelt oder Initiativen für eine Entwicklung gestartet.<sup>20</sup> Viele davon basieren auf den Grundlagen des RAINS-Modells und setzen vor allem Anpassungen an nationale Besonderheiten um. Viele Fragen nach zeitlicher und räumlicher Disaggregation und insbesondere methodischen Verfeinerungen z. B. hinsichtlich einer detaillierteren technischen Abbildung von Prozessen und Maßnahmen bleiben damit jedoch ungelöst.

---

<sup>19</sup>Vgl. Amann u. a. (2004) und Klaassen u. a. (2004).

<sup>20</sup>Informationen zu nationalen Initiativen finden sich auf der Seite [www.niam.scarp.se](http://www.niam.scarp.se) des 'Network for Integrated Assessment Modelling (NIAM)'.



### **I.3. Anforderungen an die Modellierung eines nationalen Integrated Assessment Modells (IAM)**

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht in der Bewertung politischer Instrumente, was folglich bedeutet, dass die Berechnung einer national optimalen Maßnahmenallokation nicht das gewünschte Ergebnis darstellt. Um die Auswirkungen politischer Instrumente abschätzen und bewerten zu können, müssen deren Anreizsysteme im Modell abgebildet werden. Im Industriebereich sollen die Instrumente Grenzwerte, Emissionssteuern bzw. -Zertifikate umgesetzt werden. Weiterhin sind im Sinne der IVU-Richtlinie Vorgaben zur Technologieauswahl zu berücksichtigen und eine Förderung erneuerbarer Energien wie im EEG vorzusehen.

Eine der wesentlichen Anforderungen an ein nationales IAM stellt die höhere Auflösung im Vergleich zu länderübergreifenden IAMs dar. Neben einer räumlichen Disaggregation ist dabei aus methodischer Sicht vor allem eine detailliertere Unterscheidung verschiedener Technologien von Interesse. Eine technisch fundierte Abbildung der Prozesse in allen drei Bereichen (Industrie, Wohngebäude und Verkehr) ist für eine Abschätzung der dynamischen Entwicklung der Emissionen von Bedeutung. Der Anspruch soll dabei sein, alle Schadstoffe simultan zu betrachten (multi-pollutant-Ansatz) und somit Wechselwirkungen zwischen Schadstoffen durch Minderungsmaßnahmen aufzudecken und in die Bewertung einfließen zu lassen. Neben technischen Maßnahmen in Form von end-of-pipe Maßnahmen sollen auch prozessintegrierte und nicht-technische Maßnahmen abgebildet werden. Eine genaue Abgrenzung der Maßnahmen muss dabei bereichsspezifisch erfolgen. Für den Bereich der Industrie stellen die produktionsintegrierten Minderungsmaßnahmen eine Herausforderung dar, da diese in ihrer Wirkung stark von

individuellen Gegebenheiten in der Produktion abhängen und damit weniger leicht standardisierbar sind als nachgeschaltete Maßnahmen.

Zusätzlich soll das Instrument der Ökosteuer bereichsübergreifend betrachtet werden. In verschiedenen Formen sollen auch Verhaltensänderungen der Bevölkerung untersucht werden. Diese tritt in den Bereichen Wohngebäude und Verkehr direkt als Emittent auf, während sie auf die Industrieemissionen im Wesentlichen nur durch Konsumententscheidungen Einfluss nehmen kann.

Eine Bewertung der Instrumente und ihrer Auswirkungen allein auf Grund von Emissionsvermeidungskosten, also den Kosten, die mit der Installation von Minderungsmaßnahmen verbunden sind, ist nicht ausreichend. Eine Erweiterung des Kostenbegriffs um makroökonomische Kenngrößen ist daher notwendig. Eine makroökonomische Betrachtung ist auch deshalb von Interesse, da in der politischen Diskussion in der Regel vielfältige Zielsetzungen zueinander in Konflikt stehen und Umweltschutzaspekte als alleinige Zielsetzung selten sind.

Von einer Optimierung auf nationaler Ebene ist abzusehen, da diese lediglich eine Ideal-Situation beschreibt, aber keine Hinweise dazu liefert, wie und ob diese erreicht werden kann. Das Modell stellt daher kein Optimiermodell sondern ein Simulationsmodell dar, welches versucht realistische Auswirkungen abzuschätzen. Die Dynamik des Modells soll deshalb aus dem Verhalten individueller Akteure resultieren. Diese reagieren durchaus auch nutzenmaximierend auf Anreize aus den modellierten Instrumenten und treiben dadurch die Erneuerung der eingesetzten Technologien voran.

Nach Möglichkeit sind Wechselwirkungen zwischen den Bereichen sowie ggf. innerhalb der Bereiche abzubilden. Insbesondere der Verbrauch von Energieträgern in den konsumnahen Bereichen Wohngebäude und Verkehr sollte in seinen Auswirkungen auf die Energiewirtschaft untersucht werden. Auch mögliche Preissteigerungen in der industriellen Produktion sollen in ihrer Auswirkung auf makroökonomische Größen untersucht werden.

Durch eine multikriterielle Bewertung der Ergebnisse soll eine Verdichtung der Informationen vorgenommen werden, um dem Anwender eine Entscheidungsunterstützung zu liefern.

## **I.4. Gesamtüberblick über das entwickelte Modellsystem otello**

Das otello-Modellsystem integriert verschiedene Teilmodelle zur Projektion der Emissionen aus unterschiedlichen Bereichen menschlicher Aktivitäten. Abgebildet werden die Bereiche Industrie (beschränkt auf die Sektoren Energie, Stahl und Zement), Wohngebäude und Verkehr. Hauptziel der Bereichsmodelle ist die Projektion der Emissionen durch Simulation der Entwicklung und Diffusion relevanter Technologien im Einsatz in den Bereichen. Während diese Bereichsmodelle auf technisch-fundierte Abbildungen der Aktivitäten basieren und bottom-up-Ansätze verfolgen, stellt ein übergeordnetes makroökonomisches Input-Output-Modell (IOM) den Zusammenhang zwischen den Aktivitäten her. Das IOM simuliert makroökonomische Parameter und stellt somit den wirtschaftlichen Rahmen für die Bereichsmodelle dar und die Konsistenz der Eingangsparameter sicher.<sup>1</sup>

Eine graphische Darstellung des Zusammenspiels der einzelnen Teilmodelle liefert Abbildung I.4.1. Das Simulationsmodell als Ganzes ist eingebettet in ein Modul zur Auswahl bzw. Definition von Szenarios sowie ein Auswertungsmodul zur Entscheidungsunterstützung. Diese beiden Module sind durch Ein- bzw. Ausgabemasken als Nutzerschnittstellen des Modellsystems implementiert.

Als wesentlicher Treiber für Emissionen können Bedürfnisse der Bevölkerung nach Nahrung, Sicherheit und Wärme, Mobilität etc. angesehen werden, die sich in Höhe und Zusammensetzung des privaten Konsums widerspiegeln. Der Konsum der privaten Haushalte nimmt daher auch eine zentrale Stellung im Zusammenspiel der Teilmodelle ein und wird durch ein sog. 'linear-expenditure-system' model-

---

<sup>1</sup>Vgl. auch Comes u. a. (2010).

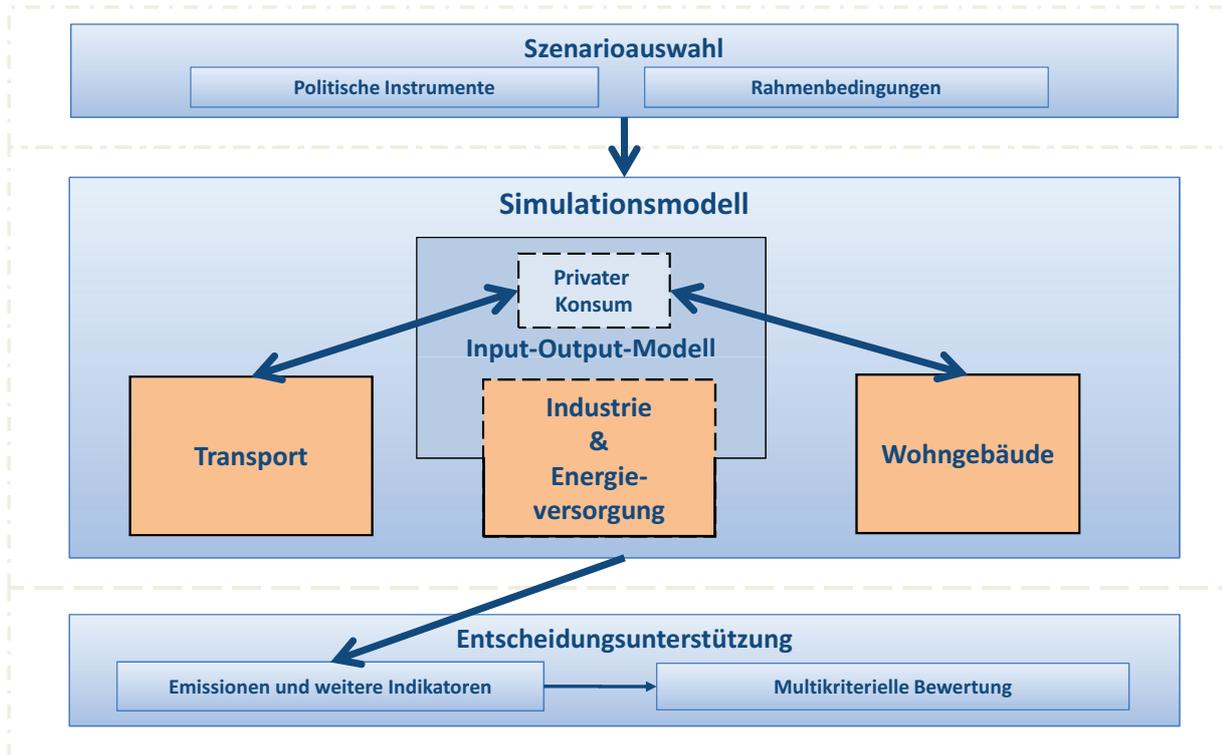


Abb. I.4.1.: Struktur des otello-Modellsystems

liert. Darin wird der Gesamtkonsum auf verschiedene Konsumkategorien aufgeteilt. Die beiden Konsumkategorien 'Wohnen' und 'Transport' werden im Detail durch die entsprechenden Bereichsmodelle abgebildet. Hier wird insbesondere die Nachfrage nach Brennstoffen zur Beheizung der Wohngebäude sowie nach Kraftstoffen im Bereich Verkehr detailliert beschrieben und Änderungen in deren Verteilung simuliert. Die Vorgaben aus dem Konsummodell bestimmen zusammen mit weiteren Elementen der Endnachfrage die Nachfrage nach und somit die Produktion von Industriegütern. So können auch Auswirkungen von Änderungen im Konsumentenverhalten auf die Produktionszahlen der Industrie einbezogen werden. Da Nachfrageänderungen sich über Lieferbeziehungen über Wertschöpfungsketten hinweg fortpflanzen, ist das Industriemodell eng mit dem Input-Output-Modell verknüpft. Das IOM bildet alle Lieferverflechtungen der deutschen Volkswirtschaft ab, die dazu in 65 Produktionsbereiche unterteilt wird. Die IO-Tabellen des Statistischen Bundesamtes bilden die Grundlage des IOM. Die umfassende Abbildung der Lieferstrukturen ermöglicht auch die Untersuchung indirekter politischer Instru-

---

mente, die das Entscheidungsverhalten der Emittenten indirekt über Preissignale zu beeinflussen versuchen. Beispiele für indirekte Instrumente sind die sog. Ökosteuern, die eine Verteuerung fossiler Energieträger darstellt sowie das Erneuerbare-Energie-Gesetz. Beide Instrumente lenken über eine Änderungen der Kosten- bzw. Erlösstrukturen Investitionsentscheidungen, ohne direkte Vorschriften hinsichtlich der Produktionsverfahren zu machen.

Neben dem privaten Konsum stellen private Investitionen einen wesentlichen Teil der Endnachfrage dar. Auch diese werden endogen modelliert. Die staatlichen Anteile an der Endnachfrage, staatlicher Konsum und staatliche Investitionen, sowie die Exporte werden exogen vorgegeben. Aus dem IOM können verschiedene makroökonomische Indikatoren wie etwa das BIP, der Primärenergieverbrauch und die Entwicklung der Beschäftigtenzahlen abgeleitet werden. Eine Wirtschaftsprognose ist jedoch aufgrund der Annahme konstanter Koeffizienten nicht möglich. Vielmehr eignet sich das Modell im Rahmen von Szenarioanalysen zur Aufdeckung von wechselseitigen Einflüssen zwischen den Bereichen und Sektoren. Eine ausführliche Beschreibung des makroökonomischen Modells findet sich in Kapitel II.3.

## **Industrie und Energieversorgung**

Die drei Produktionsbereiche Energieversorgung, Eisen- & Stahlindustrie sowie Zementindustrie werden aufgrund ihrer Relevanz hinsichtlich der Emissionsentstehung genauer untersucht. Durch aktorsbasierte Simulation wird die Diffusion innovativer umweltfreundlicher Technologien in diesen Produktionsbereichen modelliert und abgeschätzt.

Die industriellen Produktionsprozesse werden dazu mit Hilfe von mehrstufigen Referenzprozessen abgebildet, die anhand von Daten aus den BAT-Referenzdokumenten, Arbeiten von EGTEI<sup>2</sup> sowie weiterer sektorspezifischer Literatur identifiziert wurden. Die Unterscheidung mehrerer Produktionsschritte erlaubt es

---

<sup>2</sup>Vgl. Ball u. a. (2005).

dabei, neben end-of-pipe-Technologien zur Emissionsminderung auch produktionsintegrierte Maßnahmen adäquat abzubilden. Hierbei werden die Emissionen verschiedener Schadstoffe simultan berechnet. Es findet eine Unterscheidung in thermisch und stofflich bedingte Emissionen statt.

Die Simulation der Produktion erfolgt auf Ebene einzelner Betriebe, die als Werke bezeichnet werden. Diese Werke stellen eigenständige Akteure dar, die in Abhängigkeit der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie ihrer individuellen Situation Entscheidungen zur Ausgestaltung ihrer Produktionsanlagen treffen. Die Entscheidung über die Implementierung von Maßnahmen zur Emissionsminderung basiert auf einer statischen Investitionsrechnung, bei der auch Kostengrößen und ökologische Kennziffern, die zu einem Rangwert zusammengefasst werden, berücksichtigt werden. Politische Instrumente gehen in die Entscheidung im Wesentlichen als Kostenfaktor ein, die entweder bei Emissionssteuern und Emissionszertifikaten direkt mit den Emissionen verbunden sind oder indirekt über Preise (Ökosteuer) und Nachfragesignale in die Entscheidung einfließen. Die Einhaltung von Grenzwerten wird durch einen Strafterm sichergestellt.

Die Änderung der Produktionsanlagen, sei es durch Einbau neuer Minderungsmaßnahmen oder durch Stilllegung eines Werkes, geht mit einer Änderung der durchschnittlichen Technologie des gesamten Sektors einher und hat in unterschiedlichem Umfang Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Produktionsbereiche. Über eine Rückkopplung zum IOM ist es möglich, aggregierte Auswirkungen solcher inkrementeller Technologieänderungen weiterzugeben und zu untersuchen. Eine ausführliche Beschreibung des Industriemodells erfolgt in Kapitel II.2.

## **Wohngebäude**

Das Wohngebäudebestandsmodell ermöglicht die Modellierung des Einflusses politischer Instrumente im Bereich Luftreinhaltung auf die im Wohngebäudebereich entstehenden Emissionen sowie den Endenergieverbrauch der Haushalte. Hierfür wird die Gebäudetypologie des IWU verwendet (vgl. Institut Umwelt und Wohnen

---

GmbH (IWU) (2003)). Diese teilt den Wohngebäudebestand nach Gebäudetypen sowie Sanierungsperioden ein und unterscheidet außerdem bezüglich der Qualität der Wärmedämmung, der Heizung und der Warmwasserbereitstellung, die durch die verwendeten Energieträger, die Zentralität sowie durch Alter und Typ des Systems charakterisiert sind. Durch die Berücksichtigung von Neubau, Abriss und Rückbau kann mit Hilfe des Bestandsmodells der Wohngebäudebestand bis zum Jahre 2030 simuliert werden. Dabei stehen die wirtschaftlichen Verflechtungen mit den Bereichen des IOM im Fokus, insbesondere mit den Bereichen Industrie und Energieversorgung. Die Emissionen und die Endenergienachfrage werden mit einer vergleichsweise hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung berechnet, sodass die Werte monatsgenau bis hinunter auf die kommunale Ebene zur Verfügung stehen.

Bei der Modellierung der Dynamik der durch Wohngebäude verursachten Emissionen spielt die Sanierung existierender Gebäude eine entscheidende Rolle. Hierbei werden Entscheidungen der Eigentümer hinsichtlich der Wärmedämmung, der Technologie der Heizung und Warmwasserbereitstellung sowie des Zeitpunkts der Sanierung getroffen. Im Falle der Modellierung von Eigentümern, die nicht initiativ sanieren, bestimmen die geschätzten Lebensdauern der technischen Komponenten den Sanierungszeitpunkt. Die Auswahl einer Alternative basiert auf der Kapitalwertmethode, die die unterschiedlichen Zielfunktionen der Eigentümer und Mieter, resultierend aus der nationalen Gesetzgebung, berücksichtigt (Amstalden u. a. (2007)). Auf diese Weise können die Effekte unterschiedlicher Instrumente, wie z. B. der Energiesteuern, von Anreizprogrammen sowie der Energieeinsparverordnung (EnEV) und der ersten Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV), analysiert werden.

## **Verkehr**

Der Bereich Verkehr ist durch heterogene Benutzertypen, unterschiedliche Verhaltensmuster sowie potenzielle technische und politische Maßnahmen zur Emissi-

onsminderung charakterisiert. Folglich setzt eine geeignete Bewertung politischer Instrumente ein umfassendes IAM voraus, das die unterschiedlichen Beziehungen zwischen Angebots- und Nachfragesegmenten berücksichtigt. Dieser Teil wird durch das System-Dynamics-Modell ASTRA abgedeckt. ASTRA besteht aus einem detaillierten Fahrzeugflottenmodell, das sowohl klassische als auch innovative Antriebstechniken beinhaltet. Der Hauptbeitrag von ASTRA ist die Quantifizierung von Kosten und Auswirkungen nicht-technischer und technischer Instrumente zur Emissionsminderung im Sektor Verkehr.

In einer detaillierten Technologiedatenbank sind Emissionseinsparpotenziale einzelner technischer Maßnahmen abhängig von der Beförderungsart hinterlegt. Diese basiert auf aktuellen Informationen aus Ingenieurszeitschriften, Forschungsberichten, existierenden Datenbanken sowie Interviews mit Repräsentanten aus der Industrie. Um die Herausforderung der Quantifizierung der wechselseitigen Beziehungen zwischen den verschiedenen Möglichkeiten der Emissionsminderung bewerkstelligen zu können, werden für jede Beförderungsart verschiedene unabhängige Maßnahmen und Instrumentenbündel definiert und gemäß ihrer Effizienz priorisiert. Die Datenbank wird verwendet, um Emissionsminderungskurven zu generieren, die Eingang in das ASTRA-Modell finden. Dieses Vorgehen ermöglicht dem Modell detaillierte Informationsquellen bezüglich der Technologien zu berücksichtigen.

## I.5. Literatur zu Teil I

- [Amann u. a. 2004] AMANN, Markus ; COFALA, Janusz ; HEYES, Chris ; KLIMONT, Zbigniew ; MECHLER, Reinhard ; POSCH, Max ; SCHÖPP, Wolfgang: RAINS Review 2004 - The RAINS model. Documentation of the model approach prepared for the RAINS Peer review 2004 / International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, Österreich, Februar 2004. – IIASA - Interim Report
- [Amstalden u. a. 2007] AMSTALDEN, R.W. ; KOST, M. ; NATHANI, C. ; IMBODEN, D.M.: Economic potential of energy-efficient retrofitting in the Swiss residential building sector: The effects of policy instruments and energy price expectations. In: *Energy Policy* 35 (2007), S. 1819–1829
- [Bader 2002] BADER, Bernadette: *Die Umsetzung der IVU-Richtlinie in deutsches Recht - Probleme und Chancen*, Universität zu Köln, Dissertation, 2002
- [Ball u. a. 2005] BALL, M. ; CALAMINUS, B. ; KERDONCUFF, P. ; RENTZ, O.: Techno-economic databases in the context of integrated assessment modelling. In: *Environmental Modelling & Software* 20 (2005), S. 1189–1193
- [Carraro 2000] CARRARO, Carlo: *Efficiency and Equity of Climate Change Policy*. Dordrecht, Niederlande : Kluwer Academic Publishers, 2000
- [Comes u. a. 2010] COMES, T. ; DOLL, C. ; FRÖHLING, M. ; HIETE, M. ; ILSSEN, R. ; KRAIL, M. ; LÜTZKENDORF, T. ; SCHULTMANN, F. ; STENGEL, J. ; UNHOLZER, M.: Challenges for national clean air policy. In: *Ökologisches Wirtschaften* (2010), Nr. 2, S. 34 – 37

- [Ellerman und Buchner 2007] ELLERMAN, A. D. ; BUCHNER, Barbara K.: The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, Allocation, and Early Results. In: *Review of Environmental Economics and Policy* 1 (2007), Nr. 1, S. 66 – 87
- [Institut Umwelt und Wohnen GmbH (IWU) 2003] INSTITUT UMWELT UND WOHNEN GMBH (IWU): *Deutsche Gebäudetypologie, Systematik und Datensätze*. 2003
- [Klaassen u. a. 2004] KLAASSEN, G. ; AMANN, M. ; BERGLUND, C. ; COFALLA, J. ; HÖGLUND-ISAKSSON, L. ; HEYES, C. ; MECHLER, R. ; TOHKA, A. ; SCHÖPP, W. ; WINIWARTER, W.: The Extension of the RAINS model to Greenhouse Gases / International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, Österreich, 2004. – IIASA Interim Report IR-04-015
- [Leimkühler und Helbig 2006] LEIMKÜHLER, Hans-Joachim ; HELBIG, Joachim: CO<sub>2</sub>-Minderung in der chemischen Industrie. In: *Chemische Industrie* 78 (2006), Nr. 4, S. 367 – 380
- [LfU 2008a] LfU: Klimaschutzpolitik / Bayerisches Landesamt für Umwelt. 2008. – UmweltWissen
- [LfU 2008b] LfU: Umweltrecht in der Europäischen Union / Bayerisches Landesamt für Umwelt. 2008. – UmweltWissen
- [Peters u. a. 2002] PETERS, N. ; NUNGE, S. ; GELDERMANN, J. ; RENTZ, O.: *Best Available Techniques (BAT) for the Paint- and Adhesive Application in Germany - Volume II: Adhesive Application*. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, 2002
- [Ringius u. a. 2002] RINGIUS, Lasse ; TORVANGER, Asbjørn ; UNDERDAL, Arild: Burden Sharing and Fairness Principles in International Climate Policy. In: *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* 2 (2002), S. 1 – 22

- [Senger 2000] SENGGER, Sebastian U.: Was bringt das neue UN ECE Protokoll von Göteborg der Umwelt? Eine Betrachtung zum neuen UN ECE Protokoll vom 1. Dezember 1999 zur Bekämpfung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 12 (2000), S. 88–90
- [Söllner 2002] SÖLLNER, Fritz: Die Selbstverpflichtung als umweltpolitisches Instrument. In: *Wirtschaftsdienst* 8 (2002), S. 478 – 485
- [UBA 2007a] UBA: Emissionen und Maßnahmenanalyse Feinstaub 2000-2020 / Umweltbundesamt. 2007. – Forschungsbericht 204 42 202/2
- [UBA 2007b] UBA: Luftreinhaltung 2010 - Nationales Programm zur Verminderung der Ozonkonzentration und zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen / Umweltbundesamt. 2007. – Texte 38/07
- [UBA 2007c] UBA: Maßnahmen zur Reduktion von Feinstaub und Stickstoffdioxid / Umweltbundesamt. 2007. – Forschungsbericht 204 42 222
- [UBA 2010a] UBA: German Informative Inventory Report / Umweltbundesamt. URL <http://iir-de.wikidot.com/>, 2010. – Berichterstattung 2010 unter dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (UN ECE-CLRTAP)
- [UBA 2010b] UBA: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2008 / Umweltbundesamt. 2010. – Berichterstattung 2011 unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UN FCCC)
- [Wicke 1993] WICKE, Lutz ; BLENK, Lieselotte (Hrsg.): *Umweltökonomie*. 4., überarb., erw. und aktualisierte Aufl. München : Vahlen, 1993 (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)



## **Teil II.**

# **Das Teilmodell Industrie & Energieversorgung und das makroökonomische Rahmenmodell**

**(R. Ilsen, P. Breun, M. Fröhling, F. Schultmann)**



## II.1. Einführung und Modellüberblick

### II.1.1. Einordnung und existierende Modelle

Industrieemissionen<sup>1</sup> tragen zu ca. einem Viertel der Gesamtemissionen in Deutschland bei und stellen trotz einiger Anstrengungen und auch Erfolge in den vergangenen Jahren in vielen Regionen noch immer ein Problem für umliegende Ökosysteme und die menschliche Gesundheit dar. Zunehmend rückt das globale Problem des Klimawandels, an dem die zahlreichen Verbrennungsprozesse in Industrie und Energieversorgung mit ihren CO<sub>2</sub>-Emissionen einen maßgeblichen Anteil haben, in den Vordergrund der Betrachtung.

Die Fragen, wer wie viel seiner Emissionen reduzieren muss und mit welchen Mitteln die notwendigen Anpassungen vorgenommen werden, stellen dabei zentrale Fragen in der Diskussion um politische Maßnahmen zur Eindämmung des Ausstoßes an Luftschadstoffen dar. Dies gilt auf unterschiedlichen Ebenen. Im globalen Kontext werden Minderungsverpflichtungen zwischen Nationen verhandelt, während auf nationaler Ebene verschiedene Emittentengruppen, wie Industriesektoren, private Haushalte und Verkehrsteilnehmer, miteinander verglichen werden. Unternehmen hingegen müssen unter gegebenen Rahmenbedingungen unternehmerische Entscheidungen treffen. Maßgebliches Kriterium in der Verteilung von Minderungspflichten sind dabei die mit der Minderung verbundenen Kosten. Abschätzungen dazu beruhen meist auf modellgestützten Studien und Initiativen wissenschaftlicher Einrichtungen zur Datensammlung. Im Rahmen des PAREST-Projektes wurden Einzelmaßnahmen mit dem Ziel der Feinstaubreduktion hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Kosten und

---

<sup>1</sup>Im Folgenden wird *Industrie & Energieversorgung* häufig auch verkürzt mit *Industrie* wiedergegeben.

Immissionen untersucht und bewertet.<sup>2</sup> Neben einem methodischen Ansatz zur Kostenbewertung wurde dazu ein feinmaschiges Ausbreitungsmodell zur Abschätzung der Immissionen entwickelt und eingesetzt.

## **Internationale Integrated Assessment Modelle**

Im Rahmen der Verhandlungen zur NEC-Richtlinie oder bei der Ausgestaltung des europäischen CAFE-Programms<sup>3</sup> wurden Szenario-Rechnungen des GAINS-Modells<sup>4</sup> herangezogen. Dieses Modell wurde am IIASA<sup>5</sup> entwickelt und stellt das Nachfolge-Modell zum seit den 1980er Jahren entwickelten RAINS-Modell<sup>6</sup> dar.

Das GAINS-Modell ist ein Optimierungsmodell, welches die kostenminimale Maßnahmenallokation zur Erreichung vorgegebener Minderungsziele berechnet.<sup>7</sup> Während das RAINS-Modell noch mit schadstoffspezifischen Kostenkurven arbeitete, verfolgt GAINS einen technologieorientierten Ansatz, der eine gleichzeitige Minderung mehrerer Schadstoffe ermöglicht und somit in der Lage ist, Synergien zwischen der Minderung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen darzustellen. In diesem Ansatz werden die Anwendungsraten der verschiedenen Minderungsmaßnahmen als Entscheidungsvariable verwendet. Es werden sowohl primäre als auch sekundäre Maßnahmen unterschieden, wobei sich die Modellierung der Maßnahmentypen nicht wesentlich unterscheidet. In gewissen Umfang können zudem Brennstoffsubstitutionen abgebildet werden. Die Modellierung der Produktionsprozesse beruht im Wesentlichen auf dem Referenzanlagenansatz.<sup>8</sup>

Dabei fließen Informationen über den Stand der Technik aus allen Staaten der Europäischen Union sowie 13 weiteren europäischen Staaten ein. Es werden Emis-

---

<sup>2</sup>Vgl. TNO (2010).

<sup>3</sup>Im Rahmen des 6. Umweltaktionsprogrammes der EU wurde das Programm „Clean Air for Europe (CAFE)“ als Grundlage zur ersten Thematischen Strategie zur Luftreinhaltung beschlossen. Daraus ging u. a. die Richtlinie über nationale Emissionshöchstgrenzen (NEC-Richtlinie) hervor.

<sup>4</sup>Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies.

<sup>5</sup>International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Österreich.

<sup>6</sup>Regional Air Pollution Information and Simulation.

<sup>7</sup>Eine Beschreibung des Modells findet sich in Amann u. a. (2004); Klaassen u. a. (2004), eine ausführliche und aktualisierte Dokumentation findet sich unter <http://www.iiasa.ac.at/rains/gains/documentation.html>.

<sup>8</sup>Vgl. hierzu z. B. Nunge (2001).

sionen der Luftschadstoffe Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), flüchtige organische Kohlenstoffe (VOC), Ammoniak (NH<sub>3</sub>), und Feinstaub (PM: Particulate Matter), sowie die Klimagase Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>H) und die fluoridierten Klimagase (F-Gase) HFC, PFC und SF<sub>6</sub> betrachtet.

Der Berechnung der Emissionen ist ein Ausbreitungsmodell nachgeschaltet, so dass auch Immissionen abgeleitet werden können. Aus diesen werden wiederum Indikatoren für verschiedene Schadenskategorien berechnet.

Ein weiteres europaweites Integrated Assessment Modell ist das maßgeblich am IER in Stuttgart entwickelte Merlin-Modell.<sup>9</sup> Auch dieses sucht eine kostenminimale Verteilung der möglichen Minderungsmaßnahmen auf die verschiedenen Emittenten, setzt jedoch kein exaktes Verfahren zu dessen Lösung ein. Stattdessen wird ein genetischer Algorithmus zur Bestimmung einer guten Lösung verwendet. Dieser ermöglicht es, auch in dem durch die simultane Betrachtung mehrerer Schadstoffe enorm vergrößerten Lösungsraum, eine sehr gute Lösung zu finden.

## Nationale Integrated Assessment Modelle

Nationale Integrated Assessment Modelle dienen hauptsächlich dazu, eine höhere räumliche Auflösung zu erreichen und nationale Besonderheiten besser zu berücksichtigen, um so die nationalen Entscheidungsträger in ihrer Arbeit zu unterstützen. Zahlreiche Initiativen unter anderem in Belgien, Finnland, Irland, Italien, den Niederlanden, Polen, Spanien, Schweden und Großbritannien arbeiten an der Entwicklung nationaler Modelle und haben sich zum Erfahrungsaustausch zum Network for Integrated Assessment Modelling (NIAM) zusammen getan.<sup>10</sup>

Viele der nationalen Initiativen entwickeln dabei ein Modell auf Basis des RAINS-Modells und erweitern dieses um nationale Besonderheiten. So legt etwa das im Rahmen des MINNI-Projektes<sup>11</sup> entwickelte Modell für Italien einen Schwerpunkt auf die Berechnung von Emissionen aus dem Schiffsverkehr,

<sup>9</sup>Multi-Pollutant Multi-Effect Modelling of European Air Pollution Control Strategies, vgl. Reis u. a. (2005).

<sup>10</sup>siehe [www.niam.scarp.se](http://www.niam.scarp.se) .

<sup>11</sup>Modello Integrato Nazionale a supporto della Negoziazione Internazionale sui temi dell'inquinamento atmosferico, vgl. Zanini u. a. (2005).

da dies für ein Land mit langer Küste wie Italien eine besondere Rolle spielt. Ein Schwerpunkt der Arbeiten im methodischen Bereich liegt dabei auf der Modellierung nicht-technischer Maßnahmen, vor allem im Verkehrsbereich.<sup>12</sup> Weiterhin ist die Ausbreitungsmodellierung sowie die lokale Verteilung von Schadstoffen, z. B. in Stadtgebieten, von hohem Interesse.<sup>13</sup>

Das in Großbritannien entwickelte Modell UKIAM<sup>14</sup> basiert auf einem eigenständigen Ansatz. Es verfolgt einen cost-benefit-Ansatz, bei dem die minderungsbedingten Kosten dem Nutzen der Maßnahmen gegenübergestellt werden. Es wird folglich keine Kostenminimierung sondern eine Nutzenmaximierung berechnet.

Ein Modell für den deutschen Raum wurde im Rahmen des IKARUS-Projektes entwickelt. Das IKARUS-Modell analysiert CO<sub>2</sub>-Reduktion-Strategien für Deutschland.<sup>15</sup> Hierbei wurde zur Abschätzung der makroökonomischen Entwicklung ein dynamisches Input-Output-Modell, *Makroökonomisches Informationssystem (MIS)* genannt, implementiert, das die sektoralen Produktionswerte und daraus den Bedarf an Nutzenergie der Haushalte, des Transports sowie der Industriezweige berechnet. Dieser Energiebedarf geht in das als IKARUS-Optimiermodell bezeichnete Energiesystemmodell ein, das mittels linearer Optimierung das kostenminimale Energiesystem zur Befriedigung der vorgegebenen Nachfrage und unter Einhaltung umweltrechtlicher Vorgaben ermittelt. Dieses setzt sich zusammen aus optimalem Technologie- und Energieträgermix. Das IKARUS-Modell basiert auf einer äußerst umfangreichen und detaillierten Datenbank, in der mehr als 500 Technologien und Prozesse sowie 90 Energieträger unterschieden werden. Neben technischen Daten sind für alle Einträge auch Informationen zu Kosten und Emission hinterlegt.

---

<sup>12</sup>Vgl. z. B. D'Elia u. a. (2009).

<sup>13</sup>Vgl. z. B. Aben u. a. (2008).

<sup>14</sup>United Kingdom Integrated Assessment Model, vgl. Oxley u. a. (2003).

<sup>15</sup>Die Darstellung des Modellsystems folgt Markewitz und Stein (2003) und Kraft u. a. (2002).

## Zusammenfassung der bestehenden Ansätze

Der Überblick zeigt, dass Integrated Assessment Modelle weit verbreitet sind und als entscheidungsunterstützende Werkzeuge in der Politikberatung Einsatz finden. Sie zeichnen sich aus durch die Integration verschiedener Subsysteme, die bei der Betrachtung des Gesamtproblems der Umweltbelastung durch menschliche Tätigkeiten von Bedeutung sind. Die oben beschriebenen Ansätze folgen dabei der Wirkungskette von den menschlichen Tätigkeiten über die damit einhergehenden Emissionen zu den daraus entstehenden Immissionen und Schäden. Die Stärke der vorgestellten Ansätze liegt in der zugrunde liegenden Datenbasis, die teilweise mehrere Länder und sehr viele Daten zu Produktionsprozessen enthalten. Dem Datenumfang ist es jedoch geschuldet, dass in der Abbildung der Produktionsprozesse Vereinfachungen hingenommen werden müssen.

Die sogenannten Aktivitätsraten, welche das Ausmaß der menschlichen Tätigkeiten, etwa die Produktionsmengen der Industrie, beschreiben, sind dabei exogen vorgegeben und werden nur durch unterschiedliche Szenario-Vorgaben untersucht. Eine explizite Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten auf die menschlichen Tätigkeiten findet bisher nicht statt. Diese können sowohl aus einer Reaktion auf die eingetretenen Umwelt- bzw. Gesundheitsschäden als auch durch Anreize aus der Umweltgesetzgebung resultieren.

Die optimierenden Ansätze berechnen eine optimale Lösung über den gesamten Betrachtungsraum, ohne zu berücksichtigen, dass die beschriebenen Änderungen, wie etwa der Einbau von Filtersystemen, in vielen Einzelentscheidungen angestoßen werden. Die betroffenen Entscheider sitzen in den Unternehmen und haben das Wohl ihres Unternehmens im Auge, nicht aber eine gesamtökonomische Optimierung. Die Ergebnisse der Optimierungsmodelle können daher bei einer stark dezentralen Entscheiderstruktur nur als anzustrebender Zielzustand, nicht jedoch als realistische Projektion der Entwicklung interpretiert werden.

## II.1.2. Rechtliche Rahmenbedingungen in der Industrie

Die umweltrechtlichen Rahmenbedingungen für Industrieunternehmen bestehen im Wesentlichen aus dem Genehmigungsrecht, wie es im BImSchG sowie den zugehörigen Verordnungen, insbesondere der 4. BImSchV über genehmigungsbedürftige Anlagen<sup>16</sup>, geregelt ist.

Konkrete Emissionsgrenzwerte für Produktionsanlagen sind vor allem in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft<sup>17</sup> festgelegt, die durch §48 des BImSchG motiviert ist. Weitere Vorgaben für spezielle Anlagen finden sich in verschiedenen weiteren Verordnungen, hier sind insbesondere die 13. BImSchV über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen<sup>18</sup> und die 17. BImSchV über die Mitverbrennung von Abfällen<sup>19</sup> von Interesse.

Die Ausrichtung der europäischen Umweltpolitik hin zu einer integrierten Betrachtung verschiedener Umweltaspekte, Schadstoffen und Medien zeigt sich in der Richtlinie 2008/1/EG<sup>20</sup>, der sogenannten IVU-Richtlinie. Diese hat die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung zum Gegenstand. Sie folgt der Erkenntnis, dass getrennte „Konzepte, die lediglich der isolierten Verminderung der Emissionen in Luft, Wasser oder Boden dienen [dazu führen können], dass die Verschmutzung von einem Umweltmedium auf ein anderes verlagert wird, anstatt die Umwelt insgesamt zu schützen“<sup>21</sup>. Die IVU-Richtlinie versucht diese Lücke zu schließen. Die Richtlinie schreibt vor, dass Industrieanlagen sich hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen an der besten verfügbaren Tech-

---

<sup>16</sup>Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 2 der Verordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643) geändert worden ist.

<sup>17</sup>Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 24. Juli 2002 (GMBI. S. 511).

<sup>18</sup>Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen) vom 20. Juli 2004 (BGBl. I S. 1717, 2847), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. Januar 2009 (BGBl. I S. 129) geändert worden ist.

<sup>19</sup>Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2003 (BGBl. I S. 1633), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. Januar 2009 (BGBl. I S. 129) geändert worden ist.

<sup>20</sup>Richtlinie 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung.

<sup>21</sup>s. Begründung zur IVU-RL.

nik (BVT) orientieren müssen. Die Festlegung von Grenzwerten stützt sich ebenfalls auf die mit der besten verfügbaren Technik erreichbaren Werte. Der Ausdruck „beste verfügbare Techniken bezeichnet den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der spezielle Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, grundsätzlich als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt allgemein zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern“<sup>22</sup>. Nach Bader (2002) kommt diesem Begriff eine entscheidende Bedeutung bezüglich der Verwirklichung einer medienübergreifenden Betrachtungsweise zu, die den sektoralen Ansatz früherer Richtlinien ablöst. Der Informationsaustausch zwischen den Mitgliedsstaaten und der Industrie erfolgt dabei über die BVT-Merkblätter, in denen eine konkrete Beschreibung der besten verfügbaren Techniken eines Sektors enthalten ist.

Ein weiterer wichtiger Gegenstand der IVU-Richtlinie ist die Veröffentlichungspflicht der entstandenen Emissionen durch den Anlagenbetrieb, um Transparenz gegenüber der Öffentlichkeit zu gewährleisten. Dies wurde mit dem Europäischen Schadstoffemissionsregister (EPER)<sup>23</sup> realisiert. Für jeden darin aufgeführten Schadstoff wurden Schwellenwerte definiert, bei deren Überschreitung eine Anzeigepflicht besteht. Seit 2007 wird dieses System durch das Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR)<sup>24</sup> ersetzt, was u. a. mit der Anzeigepflicht weiterer Schadstoffe sowie der Berichterstattung über die Freisetzung aus diffusen Quellen verbunden ist. In der aktuellen Form bietet das PRTR eine öffentlich zugängliche internetgestützte Datenbank, in der die Daten über die jährlichen Emissionen entsprechender Anlagen aufgelistet sind.

---

<sup>22</sup>s. IVU-RL §2.

<sup>23</sup>Entscheidung der Kommission 2000/479/EG vom 17. Juli 2000 über den Aufbau eines Europäischen Schadstoffemissionsregisters (EPER) gemäß Artikel 15(3) der Richtlinie 96/61/EG des Rates über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie).

<sup>24</sup>„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) (SchadRegProtAG).

Die zur Erreichung der im Kyoto-Protokoll zugesicherten Treibhausgasreduktionen in Deutschland unternommenen Anstrengungen liegen neben der Teilnahme am europäischen Emissionshandelssystem u. a. im Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG)<sup>25</sup> sowie in den Selbstverpflichtungen der Wirtschaft<sup>26</sup>. Mit dem EEG wird das Ziel verfolgt eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und fossile Energieressourcen zu schonen. Dies geschieht durch einen verpflichtenden vorrangigen Anschluss von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien durch die Netzbetreiber. Zusätzlich müssen die Netzbetreiber einen Mindestvergütungssatz an Anlagenbetreiber, die ausschließlich Erneuerbare Energien oder Grubengas zur Stromerzeugung einsetzen, zahlen. Auch den Selbstverpflichtungen seitens der Wirtschaft kommt eine besondere Rolle bei der Minderungsproblematik von Treibhausgasen zu. Trotz der einseitigen rechtlich unverbindlichen Erklärung ist die Selbstverpflichtung in der Regel „das Ergebnis von Verhandlungen mit staatlichen Stellen, die sich - als Gegenleistung - zum ebenfalls unverbindlichen Verzicht auf hoheitliche umweltpolitische Maßnahmen [...] bereit erklären“.<sup>27</sup> So setzte sich beispielsweise die chemische Industrie im Jahr 2000 das Ziel, die energiebedingten Emissionen von CO<sub>2</sub> von 1990 bis 2012 um 45-50% zu senken.<sup>28</sup>

Die aufgeführten Richtlinien, Gesetze und Verordnungen zeigen die starke Verwobenheit nationaler, europäischer sowie globaler Ansatzpunkte in den Bereichen Luftreinhaltung und Klimawandel. Die aufgezeigten Strukturen (vgl. Abb. I.2.3) wurden dabei nicht vollständig abgebildet, spannen jedoch den wichtigsten rechtlichen Rahmen, in dem sich die spätere modellgestützte Analyse politischer Instrumente bewegt (vgl. Kapitel II.6), auf.

---

<sup>25</sup>Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1170) geändert worden ist.

<sup>26</sup>Vereinbarung zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Klimavorsorge vom 9. November 2000.

<sup>27</sup>S. Söllner (2002).

<sup>28</sup>Vgl. Leimkühler und Helbig (2006).

### **II.1.3. Ziele der Modellierungsarbeit im Bereich Industrie & Energieversorgung**

Ziel des Industriemodells ist es, die beschriebenen Kritikpunkte an den vorhandenen Ansätzen durch neue Modellierungskonzepte umzusetzen. Insbesondere soll durch eine aktorsbasierte Simulation der einzelnen Industriesektoren eine Alternative zu den Optimierungsansätzen aufgezeigt werden. Hierin soll explizit die Entscheidung der einzelnen Unternehmen abgebildet und so deren Reaktionen auf verschiedene umweltpolitische Instrumente untersucht werden. Die Zielsetzung des Akteursansatzes liegt in einer möglichst realistischen Nachbildung der technischen Entwicklung der Anlagenstruktur in den Sektoren basierend auf dem Entscheidungsverhalten einzelner Unternehmen. Hierzu sind die verschiedenen Anreizstrukturen der zu untersuchenden politischen Instrumente zu analysieren und zu modellieren. Untersucht werden sollen zum einen Instrumente, welche direkt an die emittierte Menge geknüpft sind, wie Grenzwerte, Emissionsabgaben und Emissionszertifikate, zum anderen sollen auch Vorschriften wie Produktionsstandards und Ökosteuern untersucht werden.

Dabei wird eine simultane Berechnung aller betrachteten Schadstoffe und eine möglichst detailreiche Abbildung der technischen Prozesse angestrebt. Dabei soll die Abbildung prozessintegrierter Minderungsmaßnahmen durch eine Aufteilung der Referenzprozesse in Teilprozesse erreicht werden.

Zur Einbettung der Akteure in einen konsistenten ökonomischen Rahmen ist die Implementierung eines makroökonomischen Rahmenmodells notwendig. Dies soll zugleich die Endogenisierung der Aktivitätsraten, also der Produktionsmengen, ermöglichen. Zur Abbildung der Wechselwirkungen sowohl zwischen den Industriesektoren als auch zwischen der Industrie und den Konsumenten soll ein teilendogenisiertes dynamisches Input-Output-Modell implementiert werden.

## II.1.4. Überblick über das entwickelte Modellsystem für den Bereich Industrie & Energieversorgung

### II.1.4.1. Modellumfang

In dem dargestellten Modell sind derzeit die drei Sektoren Zement, Stahl und Energie umgesetzt. Damit sind die Sektoren mit den höchsten Beiträgen zur Emissionsentstehung in der Industrie abgebildet. Tabelle II.1.1 gibt Aufschluss über die Anteile der abgebildeten Sektoren an den Emissionsfrachten der verschiedenen Schadstoffe im Jahr 2008.

Tab. II.1.1.: Anteile der abgebildeten Sektoren an den Gesamtemissionen im Jahr 2008 in [%] nach Umweltbundesamt (2010b,a)

	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>
Anteil an Industrieemissionen	63,4	67,5	15,1	71,8
Anteil an Gesamtemissionen	24,0	54,9	5,5	45,6

Die Auswahl dieser Sektoren erwies sich zudem als vorteilhaft, da eine gute Datenverfügbarkeit gegeben ist und die hergestellten Produkte der verschiedenen Unternehmen eines Sektors vergleichsweise homogen sind. Auch die Möglichkeit eine eindeutige Zuordnung zu den Produktionsbereichen der Input-Output-Rechnung hat die Implementierung vereinfacht. Während beim Stahlsektor eine Disaggregation der gegebenen Einteilung der Produktionsbereiche vorgenommen wurde, fließt der Zementsektor als Teilbereich des Produktionsbereichs *Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden* ein.

Es werden die Schadstoffe NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und Feinstaub in der Ausprägung PM<sub>10</sub> abgebildet. Weitere Schadstoffe können leicht hinzugefügt werden.

Als Simulationsmodell eignet sich das entwickelte Modellsystem zur vergleichenden Analyse verschiedener Szenarios. Dabei setzt sich ein Szenario aus den Vorgaben zu wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und den zu untersuchenden Instrumentenbündeln zusammen. Als wirtschaftliche Rahmenbedingungen gehen im Wesentlichen Weltmarktpreise und die Steigerung der inländischen Arbeitsproduk-

tivität in das Modell ein. Die zu untersuchenden rechtlichen Rahmenbedingungen gehen ebenfalls exogen ein. Vorgaben zur Ökosteuer spielen im Preismodell eine Rolle. Sektorspezifische Vorgaben zu Grenzwerten, Emissionsabgaben und Emissionszertifikaten beeinflussen maßgeblich die Investitionsentscheidungen der Werke und damit die Ausbreitung neuer Technologien in den Sektormodellen. Zur Bewertung der Szenarios werden verschiedene Indikatoren herangezogen. Diese gehen einerseits aus dem makroökonomischen Rahmenmodell hervor und beschreiben die gesamtwirtschaftliche Entwicklung. Andererseits werden sektorspezifische Indikatoren berechnet, die neben der wirtschaftlichen Entwicklung der einzelnen Sektoren insbesondere deren Emissionsausstoß beschreiben.

**Makroökonomische Indikatoren:** Aus den IO-Matrizen geht in Abhängigkeit von der Gesamtnachfrage die Wertschöpfung der einzelnen Produktionsbereiche und in Summe die Bruttowertschöpfung für Deutschland als Näherung für das Bruttoinlandsprodukt hervor. Weiterhin lassen sich aus der Gesamtnachfrage die Arbeitsentgelte als Indikator für die Beschäftigung ableiten. Die Entwicklung der Preise lässt sich innerhalb des Preismodells zum einem Gesamtindex, der als Verbraucherpreisindex benannt werden kann, zusammenfassen.

**Sektorspezifische Indikatoren:** Die Sektormodelle liefern vor allem Informationen zu Emissionen und der Entwicklung der eingesetzten Technologie in den einzelnen Sektoren. Die wirtschaftliche Entwicklung der Sektoren wird wesentlich vom IOM und den darin eingehenden exogenen Rahmenbedingungen beeinflusst.

#### **II.1.4.2. Struktur der Sektormodelle**

Das Industrie-Simulationsmodell ist modular aufgebaut und besteht aus je einem Sektormodell für die Sektoren Zement, Stahl und Energie. Das Industriemodell verfolgt einen aktorsbasierten Ansatz und stellt folglich die Akteure, die Werke, in den Mittelpunkt der Betrachtung. Das Werk ist der wesentliche Entscheidungsträger im Modell und trägt durch eine Verbesserung seiner Anlagenstruktur zu der technischen Entwicklung des gesamten Sektors bei. Die Bereitstellung der

notwendigen Informationen für die Werke über wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen wird durch die Einbettung der Sektorenmodelle in das makroökonomische Rahmenmodell erreicht. Die Funktion der Sektoren liegt im Wesentlichen in der Bereitstellung von Informationen für die Werke sowie der Verarbeitung und Weitergabe der Informationen aus den Werken. Eine Übersicht über die Struktur des Teilmodells Industrie und seine Einbettung in das makroökonomische Rahmenmodell ist in Abbildung II.2.1 in Kapitel II.2 dargestellt. Die Abbildung stellt die Handlungsabfolge eines Akteurs, also eines Werkes, innerhalb einer Periode dar, die aus der Investitionsentscheidung zur Anpassung der Anlagenstruktur, der Marktsimulation, der Produktion und letztlich einem Abschluss der Periode besteht.

#### **II.1.4.3. Abbildung der Produktionsprozesse und Emissionsberechnung**

Die Produktion und die damit einhergehende Freisetzung von Schadstoffen wird auf Werksebene simuliert. Die Produktionsprozesse werden durch einzelne Anlagen mit Hilfe mehrstufiger Referenzprozesse abgebildet. Die Berechnung der Emissionen erfolgt simultan für alle Schadstoffe, dabei werden stofflich und thermisch bedingte Emissionen unterschieden. Die Möglichkeit, Wechselwirkungen zwischen Schadstoffen, etwa aufgrund von Minderungsmaßnahmen, abzubilden, ist damit gewährleistet. Es werden neben prozessintegrierten und nachgeschalteten Emissionsminderungsmaßnahmen auch inputsubstituierende Maßnahmen abgebildet. Für jedes Werk  $w$  wird eine individuelle Produktionstechnologie simuliert, die sich aus der Anlagenstruktur des Werkes ergibt und durch Inputkoeffizienten für jeden der betrachteten 113 Inputfaktoren dargestellt wird. Emissionsminderungsmaßnahmen (EMM) nehmen auf diese Prozesse Einfluss und ändern die Anlagenstruktur.

#### **II.1.4.4. Simulation des Entscheiderverhaltens**

Vor der Simulation der Produktion hat das Werk die Möglichkeit seine Anlagenstruktur durch eine Investition in neue Anlagentechnik oder Emissionsminderungsmaßnahmen zu verändern. Die Investitionsentscheidung basiert dabei auf Informationen aus internen und externen Quellen. Wesentlichen Einfluss auf die Entscheidung haben neben den internen Informationen über den technischen und wirtschaftlichen Zustand des Werkes insbesondere externe Informationen über die Marktsituation, die vom IOM bereitgestellt werden, sowie die in der Szenariodefinition festgelegten umweltpolitischen Rahmenbedingungen. Neben der Implementierung von Emissionsminderungsmaßnahmen (EMM), stehen eine Erneuerung einzelner Anlagen, sowie ein Marktein- bzw. -austritt als Handlungsoptionen zur Auswahl. Anhand verschiedener Kennziffern, die sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte der Unternehmensführung in variabler Gewichtung berücksichtigen, werden die Handlungsoptionen bewertet und schließlich die vorteilhafteste ausgewählt.

#### **II.1.4.5. Aggregation und Disaggregation auf Sektorebene**

Nachdem die Werke ihre Investitionsentscheidung getroffen und durchgeführt haben, werden auf Sektorebene neue durchschnittliche Inputkoeffizienten berechnet und so aggregiert an das makroökonomische Rahmenmodell weitergegeben. Die durch die Investitionen bedingten Änderungen in den Werken können so auf die Matrizen des IOM übertragen werden. Auf diese Weise wird die Diffusion neuer Technologien in die Produktionsstrukturen der simulierten Sektoren basierend auf Einzelentscheidungen abgebildet.

Die Gesamtnachfrage nach dem Gut eines Sektor geht aus dem Input-Output-Modell hervor und wird durch eine Marktsimulation auf die einzelnen Werke verteilt (disaggregiert). Aus der Marktsimulation geht hervor, wie viel ein Werk absetzen kann und folglich produzieren muss. Davon ausgehend werden die mit der Produktion verbundenen Emissionen werksspezifisch berechnet und anschließend über den Sektor aufsummiert.

#### **II.1.4.6. Makroökonomisches Rahmenmodell**

Um Wechselwirkungen auf die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abzubilden, wird ein makroökonomisches Rahmenmodell auf Basis eines Input-Output-Modells implementiert, welches endogen die Aktivitätsraten der Sektoren bestimmt. Die statische Input-Output-Analyse in Form eines Mengenmodells wird dazu erweitert und dynamisch ausgestaltet. Die Informationen aus den Industrie-Sektoren werden in die technischen IO-Matrizen übernommen. Durch ein Preismodell werden weitere exogene Änderungen, wie Weltmarktpreise und Produktivitätssteigerung, einbezogen und Änderungen der Güterpreise aufgrund der neuen Technologien abgeschätzt. Ein Konsummodell berechnet die Nachfrage der privaten Haushalte basierend auf deren verfügbarem Einkommen sowie der geänderten Preisstrukturen. Hier werden außerdem Informationen zum Konsum aus den beiden Teilmodellen Wohngebäude und Verkehr aufgenommen. Aus der Endnachfrage wird im Mengenmodell die Gesamtnachfrage abgeleitet, die neben den Preisen den wesentlichen Input für die Sektormodelle darstellt.

#### **II.1.5. Aufbau von Teil II**

Das folgende Kapitel II.2 beschreibt das Industriesimulationsmodell, wobei es auf die Abbildung der Produktionsprozesse und die Emissionsberechnung (Abschnitt II.2.1) ebenso wie die Simulation des Entscheiderverhaltens (Abschnitt II.2.2) eingeht. Abschließend leitet Abschnitt II.2.3 durch die Darstellung der Sektoren als Schnittstelle zum makroökonomischen Rahmenmodell zu dessen Beschreibung in Kapitel II.3 über. Hier werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Input-Output-Analyse erläutert (Abschnitt II.3.1), um anschließend die Endogenisierung und Dynamisierung des entwickelten Modells (Abschnitt II.3.2) darzustellen. In Kapitel II.4 folgt die Beschreibung der modelltechnischen Umsetzung sowie der verwendeten Daten der drei implementierten Sektoren Zement, Stahl und Energie. Die Spezifikation der betrachteten Szenarios wird in Kapitel II.5 beschrieben, die Darstellung ausgewählter Ergebnisse folgt in Kapitel II.6. Zuletzt schließt der Bericht in Kapitel II.7 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## II.2. Akteursbasiertes Industrie-Simulationsmodell

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau des Industrie-Simulationsmodells, in dem für ausgewählte Industriesektoren eine Prognose der Schadstoffemissionen berechnet wird. Das Modell ist modular aufgebaut und besteht aus je einem Sektorenmodell je abgebildetem Sektor. Die Sektorenmodelle unterscheiden sich in ihrer Struktur nur geringfügig und werden daher nicht einzeln beschrieben.<sup>1</sup>

Es wird ein akteursbasierter Ansatz verfolgt, für den die Entscheidungsträger auf Werksebene als relevante Akteure identifiziert wurden. Daher werden die einzelnen Werke eines Sektors  $s$  in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt. Das Werk ist der wesentliche Entscheidungsträger im Modell und sorgt durch eine Verbesserung seiner Anlagenstruktur für die technische Entwicklung des gesamten Sektors. Abbildung II.2.1 stellt die Handlungsabfolge eines Akteurs, also eines Werkes, innerhalb einer Periode dar und gibt einen Überblick über die Struktur und die Informationsflüsse innerhalb des Modells. Die Umsetzung des Modells erfolgt durch einen objektorientierten Programmierungsansatz, in dem die Klassen Sektoren, Werke, Anlagen und Emissionsminderungsmaßnahmen definiert sind. Das Modell ist in Matlab implementiert.

Für jedes Werk  $w$  wird eine individuelle Produktionstechnologie simuliert, die mehrstufig durch die Abbildung unterschiedlicher Anlagen dargestellt wird. Die Anlagenstruktur eines Werkes stellt damit die interne Datenbasis des Werkes dar. Wie die einzelnen Werke mit Hilfe mehrstufiger Referenzprozesse aufgebaut sind, wie Emissionsminderungsmaßnahmen auf diese Prozesse Einfluss nehmen und wie letztlich die Emissionen eines Werkes berechnet werden, wird im folgenden Abschnitt II.2.1 vorgestellt.

---

<sup>1</sup>Die Beschreibung folgt dem in Ilsen beschriebenen Ansatz zur akteursbasierten Abbildung von Industrieprozessen und Investitionsentscheidungen.

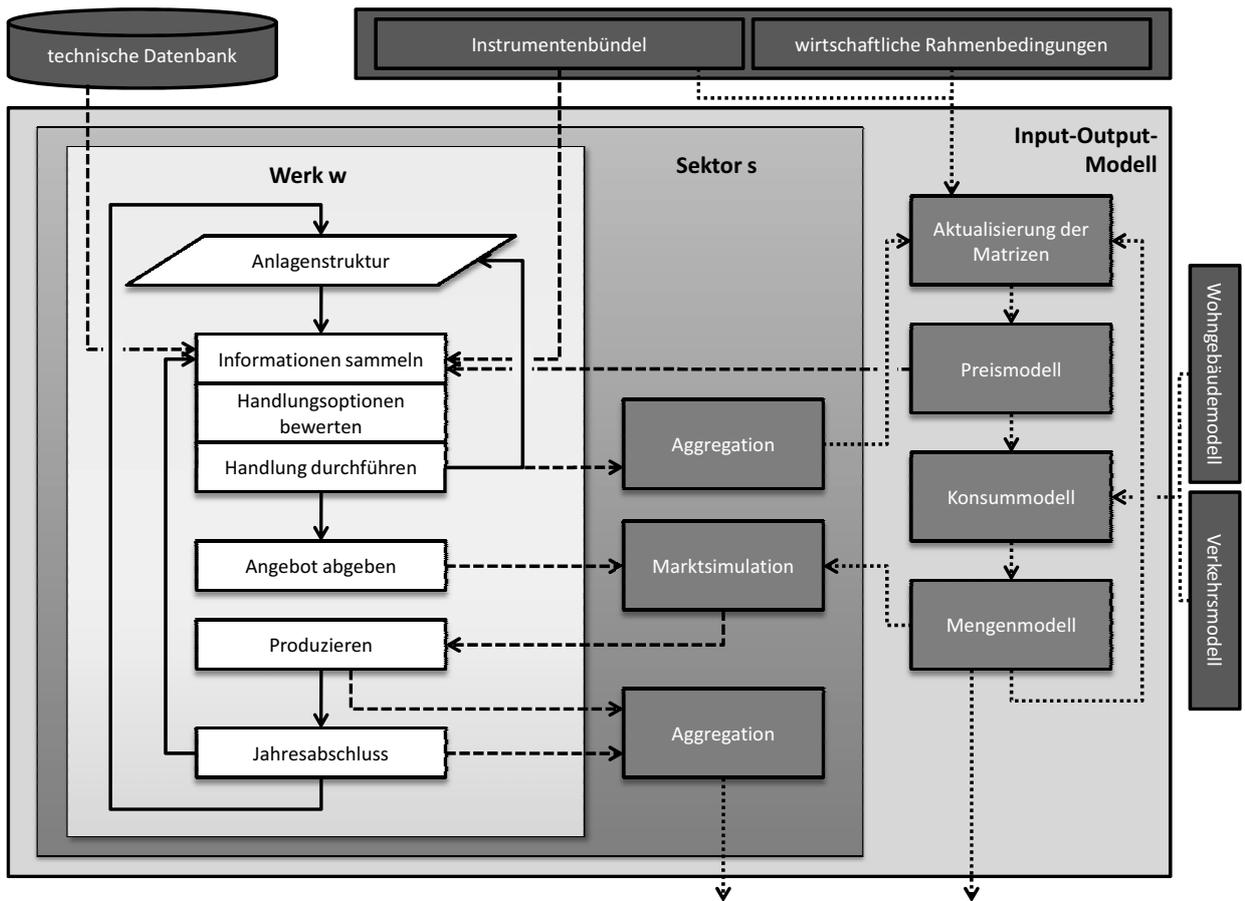


Abb. II.2.1.: Übersicht über die Modellstruktur des Teilmodells Industrie

Vor der Simulation der Produktion hat das Werk die Möglichkeit seine Anlagenstruktur durch eine Investition in neue Anlagentechnik oder Emissionsminderungsmaßnahmen zu verändern. Um diese Investitionsentscheidung zu treffen, zieht das Werk interne wie externe Daten zur Bewertung seiner Handlungsmöglichkeiten heran. Abschnitt II.2.2 beschäftigt sich mit der Simulation des Entscheiderverhaltens der einzelnen Akteure. Die Handlungsmöglichkeiten der Akteure bestehen aus der Implementierung von nachgeschalteten oder prozessintegrierten Emissionsminderungsmaßnahmen, der Erneuerung einzelner Anlagen oder der Stilllegung bzw. dem Neubau des kompletten Werkes. Wesentlichen Einfluss auf die Entscheidung haben neben den internen Informationen über den technischen und wirtschaftlichen Zustand des Werkes insbesondere externe Informationen über die Marktsituation, die vom IOM bereitgestellt werden, sowie die in der Szenariodefinition festgelegten umweltpolitischen Rahmenbedingungen. Anhand verschiede-

---

ner Kennziffern, die sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte der Unternehmensführung in variabler Gewichtung berücksichtigen, werden die Handlungsoptionen bewertet und schließlich die vorteilhafteste ausgewählt. Die Durchführung der gewählten Handlung führt zu einer Anpassung der Anlagenstruktur.

Nachdem die Werke ihre Investitionsentscheidung getroffen und durchgeführt haben, werden auf Sektorebene neue durchschnittliche Inputkoeffizienten berechnet und an das Input-Output-Modell weitergegeben. Die Klasse der Sektoren hat damit hauptsächlich eine Schnittstellenfunktion zwischen den Werken und dem IOM. Sie dient der Aggregation und Disaggregation der verschiedenen Datenflüsse.

Das Werk konkurriert mit den anderen Werken des Sektors um die Gesamtnachfrage nach dem Produkt des Sektors. Die Gesamtnachfrage geht aus dem Input-Output-Modell hervor und wird durch eine Marktsimulation auf Sektorebene auf die einzelnen Werke verteilt. In seinem Angebot fasst das Werk in Abhängigkeit von der aktualisierten Anlagenstruktur zusammen, zu welchen Kosten es wie viel seines Gutes produzieren kann. Anhand dieser Angebote werden die Werke in eine Rangfolge gebracht, die deren Marktposition bestimmt. Auch hier werden ökonomische und ökologische Aspekte berücksichtigt. Die Marktsimulation wird in Abschnitt II.2.3 beschrieben. Aus der Marktsimulation geht hervor, wie viel ein Werk absetzen kann und folglich produzieren muss. Davon ausgehend werden die mit der Produktion verbundenen Emissionen berechnet.

Mit der Produktion der Güter gehen Emissionen einher, die zunächst auf Werksebene bestimmt und anschließend sektorweit aggregiert werden. In einem Jahresabschluss wird die Periode beendet und die internen Daten der Werke werden aktualisiert.

### II.2.1. Abbildung der Produktionsprozesse und Emissionsberechnung

Die Abbildung der verwendeten Produktionsverfahren und der dabei entstehenden Emissionen beruhen auf mehrstufigen Referenzprozessen. Um die Vielfalt an möglichen konkreten Ausgestaltungen einer Produktionstechnologie und insbesondere die damit einhergehenden unterschiedlichen Anpassungsmöglichkeiten der Unternehmen an geänderte Rahmenbedingungen im Modell zu erfassen, sieht das Modell für jedes Werk ein individuelles Produktionsverfahren vor. Um den Modellierungs- und Datenerhebungsaufwand demgegenüber klein zu halten, werden mehrstufige Referenzprozesse definiert. Während sich die Werke hinsichtlich zentraler Eigenschaften, wie ihres Produktionsverfahrens und ihrer Größe unterscheiden, ist allen Werken eines Sektors gemein, dass sie alle dasselbe Hauptprodukt  $j^*$  herstellen und auf dem Markt anbieten und darüber ihre Zugehörigkeit zu dem Sektor definieren.

Die Unterscheidung individueller Produktionsverfahren lässt sich durch die Definition von Referenzinstanzen bewerkstelligen. Hierbei werden zwei Ebenen von Instanzen gebildet. Zunächst werden wesentliche Produktionsverfahren zur Herstellung des im betrachteten Sektor hergestellten Produktes identifiziert. Auf der ersten Ebene werden lediglich Abfolgen von Zwischenprodukten zur Herstellung des Endproduktes als Referenz definiert. Eine solche Referenzprozessfolge muss sich dadurch auszeichnen, dass sie einen wesentlichen Anteil an der Gesamtproduktion des Sektors hat. Auf zweiter Ebene werden für jeden der definierten Prozessschritte in einer Referenzprozessfolge Referenzanlagen definiert. Auch für die Unterscheidung zwischen Referenzanlagen gilt, dass ein wesentlicher Anteil der Gesamtproduktion mit Anlagen diesen Typs hergestellt wird und dass weiterhin zwischen je zwei Referenzanlagen für den gleichen Produktionsschritt ein hinreichender Unterschied hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens und/oder Energie- und Rohstoffeinsatzes bestehen muss. Werden Anlagen definiert, die zur Zeit noch keine Marktreife erreicht haben, ist das Kriterium des Produktionsanteils nicht zu be-

achten. Eine Anlage stellt damit einen Schritt in der Prozessfolge dar und ist durch das von ihr hergestellte Produkt  $j^a$  eindeutig einer Stellung in der Prozessfolge zugeordnet. Eine konkrete Anlage kann ferner durch Emissionsminderungsmaßnahmen geändert werden.

Die Darstellung eines Produktionsverfahrens erfolgt somit durch ein Aneinanderreihen geeigneter Anlagentypen gemäß einer Referenzprozessfolge. Vereinfachend wird angenommen, dass jedes Werk einer der für seinen Sektor definierten Referenzprozessfolgen mit allen Prozessschritten folgt. Konkret bedeutet dies, dass kein Zementwerk ohne Klinkerbrennofen und kein integriertes Hüttenwerk ohne Kokerei modelliert wird.

Die Produktionsverfahren der einzelnen Werke können sich folglich in ihrer Prozessfolge, bei gegebener Prozessfolge durch die eingesetzten Anlagentypen zur Produktion der Zwischenprodukte sowie des Endproduktes und letztlich durch den Einsatz von Emissionsminderungsmaßnahmen unterscheiden. Weiterhin unterscheiden sich die Werke hinsichtlich ihrer Kapazität, ihres Alters bzw. der Restlaufzeit, ihrer finanziellen Ausstattung und ihres Standortes.

Im Folgenden wird zunächst eine Beschreibung der Eigenschaften der Anlagen und den damit verbundenen Formeln zur Berechnung der Emissionen gegeben. Anschließend wird die Wirkung verschiedener Typen von Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Anlagen dargestellt. Schließlich wird erläutert, wie die Daten auf Werksebene über den gesamten Produktionsprozess zusammengefasst werden, um für die Investitionsentscheidung zur Verfügung zu stehen.

### **II.2.1.1. Anlagen**

Anlagen dienen der Darstellung einzelner Prozessschritte zur Herstellung eines bestimmten Produktes, das in der Prozessfolge ein Zwischenprodukt oder das Endprodukt darstellen kann. Für die meisten Prozessschritte stehen mehrere Anlagentypen zur Auswahl, um Unterschiede in der Produktionstechnik abzubilden. Die Beschreibung der Technik eines Anlagentyps *Typ* erfolgt im Wesentlichen an-

hand von Input-Koeffizienten  $IK^{Typ}$ , Emissionsfaktoren  $EF^{Typ}$  und Lebensdauer  $LD^{Typ}$ . Die Anlagentypen spiegeln den Stand der Technik im Verlauf der Zeit wider. Eine weitere Eigenschaft der Anlagentypen stellt daher die Verfügbarkeit eines Anlagentyps dar. Diese definiert, zu welchem Zeitpunkt die von dem Anlagentyp dargestellte Produktionstechnik Marktreife erlangt hat. Für die meisten Typen liegt dieser Zeitpunkt vor dem Startzeitpunkt der Simulation und ist daher nur von untergeordneter Bedeutung. Es können jedoch auch Anlagentypen definiert werden, die erst zu einem späteren Zeitpunkt Marktreife erlangen und dann bei Neubauten Berücksichtigung finden. Außerdem ermöglicht die Definitionen von Anlagen gleicher Technik bei unterschiedlicher Kapazität die Abbildung von Skaleneffekten.

Eine Anlage  $a$  ist eindeutig bestimmt durch ihre Zugehörigkeit zum Werk  $w$ , welches wiederum dem Sektor  $s$  zugeordnet ist. Weiterhin kennzeichnet der Index  $a$  die Stellung der Anlage im Produktionsprozess des Werkes. Die Input-Koeffizienten der Anlage  $IK_i^{s,w,a}$  beziffern für jeden im Modell enthaltenen Inputfaktor  $i$  die zur Produktion des von der Anlage  $a$  produzierten Produktes  $j^a$  notwendige Menge und sind durch den Anlagentyp der Anlage vorgegeben:  $IK^{s,w,a} = IK^{Typ(a)}$ . Das Hauptprodukt  $j^a$  einer Anlage, das deren Einordnung in die Prozessfolge ermöglicht, ist durch den Wert des Inputkoeffizienten  $IK_{j^a}^{s,w,a} = -1$  gekennzeichnet. Damit ist klar, dass von diesem Produkt genau eine Einheit produziert wird und die Einsatzmengen der anderen Faktoren sich darauf beziehen. Weitere negative Inputkoeffizienten sind möglich und stellen Nebenprodukte des Prozesses dar. Die Aktivitätsrate  $AR^{s,w,a}$  der Anlage ist über deren Produkt definiert und gibt an, in welcher Menge dieses produziert werden soll.

Insgesamt werden 113 Güter unterschieden. 65 Güter entsprechen den Gütern bzw. Produktionsbereichen des Input-Output-Modells. Um darüber hinaus technische Details adäquat abbilden zu können, werden zusätzliche 48 Güter unterschieden. Darunter fallen insbesondere Brennstoffe und Zwischenprodukte, sowie Sekundärrohstoffe. Eine Gegenüberstellung der Güter im Industriemodell und im IO-Modell findet sich in Tabelle II.10.1 im Anhang.

Die Emissionsfaktoren beschreiben den Schadstoffausstoß der vier betrachteten Schadstoffe  $p$  je Einheit der Aktivitätsrate. Ein fünfter Emissionsfaktor gibt das Abgasvolumen in  $\text{m}^3$  je Aktivitätseinheit an.

Die Lebensdauer einer Anlage hat keine direkten Auswirkungen auf die Emissionsberechnung. Jedoch wird aus ihr die Restlaufzeit der Anlage abgeleitet und damit der Zeitpunkt, wann eine Anlage erneuert werden muss. Somit spielt diese Größe bei der Investitionsentscheidung in eine neue Anlage und damit in neuere Technik eine bedeutende Rolle und hat somit indirekt auch Einfluss auf die Emissionen.

In sehr vielen Prozessen entstehen Schadstoffe sowohl durch Verbrennungsprozesse als auch durch anderweitige chemische oder physikalische Umwandlungsprozesse. In der Realität laufen diese Prozesse oft zeitgleich und unmittelbar verbunden ab, wenn z. B. der thermische Umwandlungsprozess Prozesswärme zur Verfügung stellt, um chemische Reaktionen zu unterstützen, wie beim Sintern oder der Reduktion im Hochofen. Die Entstehung der Emissionen ist dabei einerseits von der Ausgestaltung des Prozesses und andererseits von den eingesetzten Brennstoffen abhängig. Maßnahmen zur Minderung der Emissionen können sowohl eine Herabsetzung der thermisch bedingten oder auch der stofflich bedingten Emissionen bewirken. Daher ist es notwendig, diese zusammengehörenden Teilprozesse dennoch getrennt zu modellieren. Dazu wird die Anlage in zwei Teilprozesse  $d$  mit  $d = \text{therm}, \text{stoff}$  unterteilt gedacht, für die je ein Vektor an Input-Koeffizienten,  $IK^{s,w,a,d=\text{therm}}$  und  $IK^{s,w,a,d=\text{stoff}}$  hinterlegt wird. Der Verbrennungsprozess liefert dabei das Zwischenprodukt *Prozesswärme*, welches direkt und vollständig in den Hauptprozess geht. Dabei wird ein Wirkungsgrad der Verbrennung von 100% unterstellt, da die jeweiligen Verbrennungsbedingungen bereits in der Nachfrage des Hauptprozesses nach Prozesswärme Berücksichtigung finden. Eine Maßnahme zur Verbesserung des Wirkungsgrades setzt folglich am Hauptprozess der stofflichen Umwandlung an. Die Input-Koeffizienten des thermischen Teilprozesses sind nur für Brennstoffe ungleich Null und beschreiben somit den eingesetzten Brennstoffmix einer Anlage. Da die Trennung der Teilprozesse nur der genaueren Berechnung der Emissionen dient, können chemische Wechselwirkungen zwischen

den Teilprozessen als unveränderlich angenommen werden und daher über Korrekturfaktoren bei den Emissionsfaktoren abgefangen werden. Als Beispiel sei hier die Einbindung von Schwefeldioxid aus der Verbrennung in Asche genannt, die den Emissionsgrad herabsetzt.

Um die Input-Koeffizienten der Anlage  $a$  als Ganzes zu berechnen, wird folgende Formel verwendet.

$$IK^{s,w,a} = IK^{s,w,a,therm} \cdot IK_{Prozesswaerme}^{s,w,a,stoff} + IK^{s,w,a,stoff} \quad [\text{II.2.1}]$$

wobei  $IK_{Prozesswaerme}^{s,w,a,stoff}$  die Nachfrage des Hauptprozesses der Anlage  $a$  nach Prozesswärme zur Produktion einer Einheit des Outputs  $j^a$  angibt. Die Emissionsfaktoren werden ebenfalls für jeden Anlagenteil getrennt angegeben, werden jedoch aufgrund der unterschiedlichen Methoden der Emissionsberechnung nicht miteinander verrechnet.

Die Emissionen  $E_p^{s,w,a}$  eines Schadstoffs  $p$  einer Anlage  $a$  werden getrennt nach thermisch und stofflich bedingten Emissionen, entsprechend der beiden Anlagenteile  $d$ , berechnet und anschließend addiert.

$$E_p^{s,w,a} = E_p^{s,w,a,therm} + E_p^{s,w,a,stoff} \quad [\text{II.2.2}]$$

Die Berechnung der Emissionen aus dem stofflichen Umwandlungsprozess stellt eine einfache Multiplikation der Aktivitätsrate der Anlage  $AR^{s,w,a}$  mit den Emissionsfaktoren  $EF_p^{s,w,a,stoff}$  dar:

$$E_p^{s,w,a,stoff} = AR^{s,w,a} \cdot EF_p^{s,w,a,stoff} \quad [\text{II.2.3}]$$

Die Emissionen aus dem thermischen Prozess werden hingegen für bestimmte Schadstoffe in Abhängigkeit der eingesetzten Brennstoffe berechnet. In diesem Fall kann als Aktivitätsrate nicht die Outputgröße (Prozesswärme) herangezogen werden. Stattdessen muss zunächst über die Input-Koeffizienten des Verbrennungsprozesses und den Prozesswärmebedarf des Hauptprozesses  $IK_{Prozesswaerme}^{s,w,a,stoff}$

berechnet werden, wie viel eines bestimmten Brennstoffes  $bs$  in den Prozess hineingeht, also eine Input-Größe. Diese Größe wird dann mit dem brennstoffspezifischen Emissionsfaktor  $EF_p^{bs}$  multipliziert. Die Emissionsfaktoren der Anlage selbst  $EF_p^{s,w,a,therm}$  stellen Korrekturfaktoren dar, die chemische Wechselwirkungen zwischen Verbrennungs- und Hauptprozess widerspiegeln.

$$E_p^{s,w,a,therm} = EF_p^{s,w,a,therm} \cdot \sum_{bs} AR^{s,w,a} \cdot IK_{Prozesswaerme}^{s,w,a,stoff} \cdot IK_{bs}^{s,w,a,therm} \cdot EF_p^{bs} \quad [\text{II.2.4}]$$

Eine brennstoffabhängige Berechnung wird für die Schadstoffe  $\text{SO}_2$ , und  $\text{CO}_2$  vorgenommen, im Sektor Energie werden auch  $\text{NO}_x$  und Feinstaub brennstoffabhängig berechnet. Bei der Berechnung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen wird außerdem der biogene Anteil der Brennstoffe heraus gerechnet, da Emissionen aus biogenen Brennstoffen im Emissionshandel nicht berücksichtigt werden.

Da sich die Grenzwerte der TA Luft auf die Konzentration der Schadstoffe im Abgas in  $\text{g/m}^3$  beziehen, wird neben der Emissionsfracht pro Jahr auch diese Größe ermittelt. Dazu wird die Emissionsfracht durch das Abgasvolumen  $Agv^{s,w,a}$  dividiert, welches durch Multiplikation des spezifischen Abgasvolumens mit der Aktivitätsrate der Anlage berechnet wird.

### II.2.1.2. Werke

Das Produktionsverfahren eines Werkes  $w$  ergibt sich durch die Aneinanderreihung geeigneter Anlagen zu einem Gesamtprozess. Die ausgewählten Anlagen produzieren dazu die in der jeweiligen Referenzprozessfolge vorgegebenen Zwischenprodukte  $j^a$  in der definierten Reihenfolge. Zur Berechnung des Gesamtbedarfes des Werkes an Input-Faktoren werden die Input-Koeffizienten der Anlagen ergänzt durch entsprechende Nullvektoren zur Direktbedarfsmatrix  $D^{s,w}$  des Werkes zusammengefasst. Zur Ableitung der Technologiematrix  $T$  werden zunächst die Diagonalelemente der Matrix  $D$  Null gesetzt und die aus der Produktionswirtschaft bekannte Formel  $T = (I - D)$ , mit  $I$  als Einheitsmatrix der entsprechenden

Dimension, verwendet.<sup>2</sup> Aus der Multiplikation mit einem Endbedarfsvektor  $F$ , bestehend aus Nullen und einer 1 an Stelle  $j^*$ , wobei  $j^*$  das Endprodukt des Werkes kennzeichnet, ergibt sich der Gesamtbedarf  $G^{s,w}$  des Werkes.

$$G^{s,w} = (I - D^{s,w})^{-1} \cdot F \quad [\text{II.2.5}]$$

Der Vektor  $G^{s,w}$  enthält auch den Gesamtbedarf an im Werk hergestellten Zwischenprodukten pro Einheit des Endproduktes. Diese Angaben dienen der Ableitung der Aktivitätsraten  $AR^{s,w,a}$  der einzelnen Anlagen  $a$  aus der Aktivitätsrate  $AR^{s,w}$  des Werkes  $w$ .

$$AR^{s,w,a} = AR^{s,w} \cdot G_{ja}^{s,w} \quad [\text{II.2.6}]$$

Da die Koeffizienten der im Werk hergestellten Zwischenprodukte vollständig in den nachgelagerten Prozessen aufgehen und nach außen ohne Wirkung bleiben, entspricht der Vektor der Input-Koeffizienten  $IK^{s,w}$  dem Gesamtbedarfsvektor  $G^{s,w}$  für nicht im Werk selbst produzierte Güter.

$$IK_i^{s,w} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } i \text{ ein Zwischenprodukt ist} \\ G_i^{s,w} & \text{sonst} \end{cases} \quad [\text{II.2.7}]$$

Die Emissionen eines Werkes  $w$  für jeden Schadstoff  $p$  ergeben sich aus der Summe der Emissionen der in dem Werk existierenden Anlagen.

$$E_p^{s,w} = \sum_a E_p^{s,w,a} \quad [\text{II.2.8}]$$

Die Emissionen werden jeweils für eine Periode, also ein Jahr, berechnet und als Emissionsfracht in g/a bzw. für CO<sub>2</sub> in kg/a angegeben. Die Aktivitätsrate  $AR^{s,w}$  gibt entsprechend die Produktion eines Jahres in der entsprechenden Einheit des Produktes an.

<sup>2</sup>zur Herleitung und Einsatz der hier aufgeführten Formeln vgl. z. B. das Kapitel zur Materialwirtschaft in Fandel u. a. (2009).

Der Anlagenwert der Anlagen bzw. des gesamten Werkes wird nicht explizit ausgewiesen, jedoch in Form von Abschreibungen berücksichtigt. Dazu werden für jede Referenzprozessfolge spezifische Abschreibungen hinterlegt. Die Berechnung der Abschreibungen orientiert sich dabei an der Methode der Kapitalbedarfsziffern zur Schätzung von Investitionen.<sup>3</sup> Eine spezifische Kapitalbedarfsziffer gibt den Kapitalbedarf zur Anschaffung einer Anlage bezogen auf eine Kapazitätseinheit an. Die spezifische Abschreibung stellt die spezifische Kapitalbedarfsziffer bezogen auf die Nutzungsdauer der Anlage dar.

### **II.2.1.3. Emissionsminderungsmaßnahmen**

Emissionsminderungsmaßnahmen (EMM) dienen der Reduzierung der aus einem Werk austretenden Schadstoffe. Dazu greifen sie in die Produktionsstruktur eines Werkes ein, indem sie an einzelnen Anlagen Änderungen an den Emissionsfaktoren und den Inputkoeffizienten vornehmen. Hierbei können grundsätzlich zwei Arten von EMM unterschieden werden: nachgelagerte EMM scheiden Schadstoffe aus dem Abgas der Anlagen ab, bevor dieses aus dem Werk austritt; prozessintegrierte EMM hingegen verhindern bereits die Entstehung der Schadstoffe während des Prozesses.

Die hier vorgenommene Einteilung der EMM in verschiedene Maßnahmentypen orientiert sich daran, wie eine Maßnahme in den Gesamtprozess eingreift. Es werden insgesamt vier Typen von Maßnahmen unterschieden:

Typ 1: Nachgeschaltete Maßnahme  $m_1$

Typ 2: Prozessintegrierte Maßnahme im Bereich Feuerung  $m_2$

Typ 3: Brennstoffsubstitution  $m_3$

Typ 4: Inputsubstitution (außer Brennstoffe)  $m_4$

---

<sup>3</sup>Vgl. Ullrich (1996).

## Nachgeschaltete Maßnahmen (Typ 1)

Die Maßnahmen des Typs 1 sind dem eigentlichen Prozess nachgelagert und greifen nicht in den eigentlichen Prozess ein, sondern behandeln dessen Abgase. Es handelt sich zumeist um eigenständige Abgasreinigungsanlagen, deren Abscheideleistung als Minderungseffizienz bezeichnet wird. Dieser Maßnahmentypus ist daher auch als weiterer Anlagenteil  $d = m1$  modelliert. Anstelle von Emissionsfaktoren werden Minderungseffizienzen  $\eta_p$  für jeden Schadstoff  $p$  angegeben. Dadurch können auch Maßnahmen, die mehrere Schadstoffe zugleich mindern, dargestellt werden. Auch negative Wechselwirkungen zwischen Schadstoffen können abgebildet werden, indem die Minderungseffizienz einer Maßnahme für den betroffenen Schadstoff kleiner Null gesetzt wird. Analog zu den Anlagen beschreibt ein Vektor von Input-Koeffizienten den Verbrauch an Inputfaktoren, wobei hier in der Regel nur Angaben zu Energieverbrauch, Arbeitseinsatz, ggf. Filterstoffen und Chemikalien sowie einer eventuell nötigen Abfallentsorgung enthalten sind. Die Entstehung von Nebenprodukten wie etwa Gips kann durch negative Input-Koeffizienten dargestellt werden. Eine EMM  $m1$  des Typs 1 wird als Anlagenteil einer bestehenden Anlage  $a$  angefügt und ist fortan Bestandteil der Anlage. Damit ändert sich die Berechnung sowohl der Inputkoeffizienten (Gleichung II.2.1) als auch der Emissionen (Gleichung II.2.2) der Anlage wie folgt:

$$IK^{s,w,a} = IK^{s,w,a,therm} \cdot IK_{Prozesswaerme}^{s,w,a,stoff} + IK^{s,w,a,stoff} + \sum_{m1} IK^{s,w,m1} \quad [\text{II.2.9}]$$

$$E_p^{s,w,a} = (E_p^{s,w,a,therm} + E_p^{s,w,a,stoff}) \cdot (1 - \eta_p^{gesamt}) \quad [\text{II.2.10}]$$

mit

$$(1 - \eta_p^{gesamt}) = \prod_{m1} (1 - \eta_p^{m1}) \quad [\text{II.2.11}]$$

Wie den Formeln zu entnehmen ist, können mehrere EMM des Typs 1 einer Anlage angefügt werden. Dabei wird angenommen, dass hintereinander geschaltete Abgasreinigungsanlagen sich in ihrer Reinigungseffizienz nicht beeinflussen, wes-

halb die Gesamtminderungseffizienz  $\eta^{gesamt}$  durch einfache Multiplikation wie in Gleichung II.2.11 berechnet werden kann.

Als eigenständige Anlage hat eine Abgasreinigungsanlage auch eine eigene Lebensdauer. Ist diese deutlich kürzer als die Lebensdauer der eigentlichen Anlage, so wird davon ausgegangen, dass die Anlage ungeachtet der EMM über ihre gesamte Lebensdauer betrieben wird und die EMM nach Ablauf ihrer Lebensdauer ausgetauscht wird. Andernfalls wird die Vermutung nahegelegt, dass ein Anlagenbetreiber versuchen wird, alle Komponenten gleich lang zu nutzen. Dazu besteht die Möglichkeit eine etwas langlebigere EMM zu kaufen oder die Anlage etwas früher abzuschalten. Dieser in der Realität bestehende Verhandlungs- bzw. Entscheidungsspielraum kann im Modell nicht abgebildet werden, da eine konkrete, unveränderliche Zahl für die Lebensdauer angegeben werden muss. Um diesen Spielraum dennoch zu modellieren, werden die Werte für die Lebensdauer der Komponenten einander angeglichen, sodass Anlage und EMM zugleich ausfallen und gemeinsam ersetzt werden.

### **Prozessintegrierte Maßnahmen (Typ 2)**

Anders als nachgeschaltete Maßnahmen greifen prozessintegrierte Maßnahmen direkt in den Prozess ein. Schadstoffe werden nicht nachträglich abgeschieden oder zerstört, sondern bereits im Prozess an der Entstehung gehindert. Dazu werden verschiedene Änderungen an den Prozessparametern der Anlagen (wie Temperatur, Brennstoffbereitstellung, Verweilzeiten etc.) oder geringfügige Änderungen an der Zusammensetzung der Input-Stoffe, z. B. durch die Zugabe von Kalkstein zur Bindung von Schwefeloxiden, vorgenommen. Einige dieser Maßnahmen bringen konstruktive Änderungen der Anlage mit sich und können daher nicht nachträglich durchgeführt werden, sondern müssen zeitgleich mit dem Neubau einer Anlage geschehen.

Die Unterscheidung zwischen Typ 2a und 2b basiert lediglich auf der im Modell vorgenommenen Trennung in thermische und stoffliche Umwandlungsprozesse.

se. Die modelltechnische Umsetzung einer solchen Maßnahme  $m2$  erfolgt durch die Änderung der Emissionsfaktoren des Anlagenteils  $d = therm$  bei Typ 2a bzw. des Anlagenteils  $d = stoff$  bei Typ 2b gemäß der definierten Minderungseffizienz  $\eta^{m2}$ . Die Maßnahme ist außerdem mit einem geänderten Bedarf an Inputstoffen verbunden, der den Eingriff in den Prozess widerspiegelt. Diese Bedarfsänderung wird für beide Typen zu den Inputkoeffizienten des Anlagenteils Stoffliche Umwandlung  $IK^{s,w,a,stoff}$  hinzu addiert.

$$\text{Typ 2a: } EF_p^{s,w,a,therm} = \widehat{EF}_p^{s,w,a,therm} \cdot \eta_p^{m2} \quad [\text{II.2.12}]$$

$$\text{Typ 2b: } EF_p^{s,w,a,stoff} = \widehat{EF}_p^{s,w,a,stoff} \cdot \eta_p^{m2} \quad [\text{II.2.13}]$$

$$\text{beide: } IK^{s,w,a,stoff} = \widehat{IK}^{s,w,a,stoff} + IK^{m2} \quad [\text{II.2.14}]$$

Dabei bezeichnen die Variablen mit einem Dach die ursprünglichen Werte vor der Implementierung der Maßnahme  $m2$ .

### Brennstoffsubstitution (Typ 3)

Die emissionsmindernde Wirkung einer Maßnahme  $m3$  des Typs 3 beruht auf den unterschiedlichen Zusammensetzungen der verschiedenen Brennstoffe und wirkt im Modell ausschließlich über die geänderten Inputkoeffizienten des Anlagenteils Feuerung:

$$IK^{s,w,a,therm} = \widehat{IK}^{s,w,a,therm} + IK^{m3}, \quad [\text{II.2.15}]$$

die in Gleichung II.2.4 zur Berechnung der thermisch bedingten Emissionen eingehen. Eine Änderung der Emissionsfaktoren wird nicht vorgenommen.

### Inputsubstitution (Typ 4)

Bei Maßnahmen vom Typ 4 handelt es sich wie bei Typ 3 um Inputsubstitutionen, jedoch wird hier der Einsatz von Zwischenprodukten substituiert. Die emissionsmindernde Wirkung einer solchen Maßnahme liegt nicht bei der Anlage, an der sie durchgeführt wird, sondern zeigt sich erst durch eine niedrigere Aktivi-

tätsrate einer vorgelagerten Anlage. Hier wird der Vorteil einer Aufteilung des Prozesses in mehrere Prozessschritte genutzt, die es ermöglicht, Änderungen zwischen Prozessschritten zu modellieren. Solche Maßnahmen können ansonsten trotz aufwändiger Parameter-Schätzung nur unzureichend abgebildet werden. So kann zum Beispiel die Emissionsminderungsmaßnahme „Klinkerfaktor reduzieren“ im Zement-Sektor problemlos als prozessintegrierte Maßnahme modelliert werden.<sup>4</sup> Da der Klinkerfaktor als Inputkoeffizient der Zementmühle auftaucht, muss nur ein einziger Wert verändert werden. Die Emissionsfaktoren bleiben davon unberührt.

Maßnahmen des Typs 4 können mehrmals durchgeführt werden. Dazu wird eine Grenze definiert, bis zu welcher der zu ersetzende Stoff reduziert werden kann, ohne den Prozessablauf zu gefährden oder die Produktqualität wesentlich zu mindern.

Da prozessintegrierte Maßnahmen (Typ 2-4) eine Änderung der Anlage bzw. des Prozesses darstellen und in diesem aufgehen, wird ihnen keine eigenständige Lebensdauer zugeordnet. Die Lebensdauer der Anlage wird durch den Eingriff nicht geändert.

## Anwendbarkeit und Kombinierbarkeit von Emissionsminderungsmaßnahmen

Die Emissionsminderungsmaßnahmen werden sektorweise definiert und können auch innerhalb eines Sektors nur auf bestimmte Anlagentypen angewandt werden. Die Anwendbarkeit der EMM wird in der Matrix  $T^{anwendbar}$  definiert, welche die Anlagentypen gegen die Minderungsmaßnahmen aufträgt. Die Dimensionen der Matrix entsprechen folglich der Anzahl definierter Anlagentypen  $N_A$  sowie der Anzahl im Modell enthaltener EMM  $N_{EMM}$ . Neben der rein technisch betrachteten Möglichkeit einer Anwendung, die durch binäre Einträge in der Matrix abbildbar wäre, wird zusätzlich die Verfügbarkeit der Maßnahme festgehalten. Ist eine EMM  $m$  auf eine Anlage  $a$  nie anwendbar, so wird dies durch den Eintrag des Wertes unendlich an der Stelle  $T_{a,m}^{anwendbar} = \infty$  vermerkt. Ist eine Maßnahme  $l$  anwendbar,

<sup>4</sup>Der Klinkerfaktor stellt den Anteil des Zwischenprodukts Klinker am Endprodukt Zement dar und beträgt derzeit in Deutschland in den meisten Zementwerken um die 80%, zur Beschreibung der EMM vgl. Kapitel II.4.2.

so wird der Zeitpunkt  $t^{verfuegbar}$  vermerkt, zu dem die Maßnahme als technisch ausgereifte Maßnahme auf dem Markt verfügbar ist:  $T_{a,l}^{anwendbar} = t^{verfuegbar}$ . Auf diese Weise werden heute noch nicht marktreife Entwicklungen, sog. *emerging techniques*, wie z. B. die CCS-Technologie<sup>5</sup>, in das Modell einbezogen.

Welche EMM eingesetzt werden können, ist weiterhin von den bereits in einem Werk durchgeführten Maßnahmen abhängig. Lediglich technisch sinnvolle Kombinationen von Maßnahmen werden zugelassen. Die Kombinierbarkeit von Maßnahmen ist in einer weiteren Technik-Matrix  $T^{kombinierbar}$  der Dimension  $N_{EMM} \times N_{EMM}$  durch binäre Einträge definiert.

## Investitionsabhängige Kosten

Die Maßnahmentypen sind mit Investitionen in unterschiedlicher Größenordnung verbunden und wirken sich folglich auch auf die Kapitalstruktur der Unternehmung, hier die Abschreibungen, aus. Dabei wird angenommen, dass die Investitionsausgaben der Maßnahmen einer Größendegression unterliegen. Je nach Datenlage werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der Investitionsausgaben verwendet:

$$I^{s,w,a,m} = I_{ref}^m \cdot \left( \frac{Kap^{s,w,a}}{Kap_{ref}^m} \right)^{n_m} \quad [\text{II.2.16}]$$

$$\text{oder } I^{s,w,a,m} = ci_{fix}^m + ci_{var}^m \cdot Kap^{s,w,a} \quad [\text{II.2.17}]$$

Im ersten Ansatz (Gleichung II.2.16) wird die Größendegression durch den Größendegressionsexponenten  $n$  beschrieben, im zweiten Ansatz (Gleichung II.2.17) wird die Investition in einen größenunabhängigen  $ci_{fix}$  und einen größenabhängigen Teil  $ci_{var}$  aufgeteilt. Die Variable  $Kap$  beschreibt dabei die Kapazität der zu installierenden Abgasreinigungsanlage bzw. der von der Maßnahme betroffenen Produktionsanlage. Bei Maßnahmen des Typs 1 wird das Abgasvolumen als Kapazität zur Beschreibung der Anlagengröße verwendet, während die anderen

---

<sup>5</sup>Carbon Capture and Storage

Maßnahmen sich auf die Produktionskapazität beziehen.

Es wird angenommen, dass die Anlagen linear abgeschrieben werden. Damit ergeben sich die Abschreibungen der vorgenommenen Maßnahme durch eine Division der Investition durch die Lebensdauer  $LD^m$ , wobei entweder die Lebensdauer der Abgasreinigungsanlage, falls eine solche gebaut wird (Typ1), oder die verbleibende Restlaufzeit der betroffenen Anlage als Lebensdauer angesetzt wird. Bei Durchführung einer Maßnahme in Periode  $\hat{t}$  werden die Abschreibungen des Werkes  $Abs^{s,w,t}$  über die technische Nutzungsdauer der Maßnahme um die Abschreibungen der Maßnahme erhöht.

$$Abs^{s,w,t} = \widehat{Abs}^{s,w,t} + \frac{I^{s,w,a,m}}{LD^m} \quad \forall \quad t \in [\hat{t} \dots \hat{t} + LD^m - 1] \quad [\text{II.2.18}]$$

## II.2.2. Simulation des Entscheiderverhaltens

Unter Technologiediffusion wird hier die Ausbreitung neuer umweltfreundlicher Produktionsprozesse aber auch die Anwendung von Emissionsminderungsmaßnahmen in der Produktion verstanden. Die Durchdringung der Gesamtheit der deutschen Anlagen mit innovativen Technologien stellt einen wesentlichen Faktor bei der Emissionsberechnung dar. Die Trendschätzung der Emissionen beruht sowohl auf einer Schätzung der wirtschaftlichen Entwicklung als auch auf Prognosen über die Geschwindigkeit, mit der neue Technologien in den verschiedenen Werken zum Einsatz kommen.

Bei der Entscheidung eines Unternehmens in neue Technologie zu investieren spielen unterschiedliche Einflussfaktoren eine Rolle. Dabei werden unternehmensinterne und -externe Einflussfaktoren unterschieden. Unter den internen Einflussfaktoren sollen all jene Faktoren zusammengefasst werden, die aus der individuellen Situation eines Unternehmens resultieren und folglich für jedes Unternehmen unterschiedlich sind (z. B. Anlagenbestand, Unternehmenskultur, Marktanteil). Unter externen Faktoren sollen solche Faktoren verstanden werden, auf die von einzelnen Unternehmen kein Einfluss genommen werden kann (z. B. gesamt-

wirtschaftliche Lage, rechtliche Rahmenbedingungen, Verfügbarkeit neuer Technologien). Für diese externen Faktoren wird hier angenommen, dass sie für alle Werke identisch sind.

Da letztlich die Entscheidung über die verwendete Technologie bei den produzierenden Unternehmen liegt, stellt der hier gewählte Ansatz zur Simulation der Technologie-Ausbreitung diese Entscheidung der Unternehmen in den Mittelpunkt. Diese wird akteursbasiert simuliert. Die einzelnen Werke werden dazu als Akteure, also als eigenständig handelnde Einheiten, simuliert.

Die Handlungsmöglichkeiten eines Werkes bestehen in Änderungen der Anlagenstruktur unter Beibehaltung der bestehenden Referenzprozessfolge, also die Umsetzung von Emissionsminderungsmaßnahmen und die Erneuerung von Anlagen und Anlagenteilen, sowie in einer Modernisierung der Anlagen, in deren Rahmen die Referenzprozessfolge geändert werden kann. Weiterhin kann das Werk zur Stilllegung gezwungen sein und neue Werke können durch Neubau in den Markt eintreten. Sowohl bei Neubau als auch Modernisierung wird darüber entschieden, mit welcher Referenzprozessfolge das Werk betrieben werden soll.

Im Folgenden wird erläutert, wie Werke die verschiedenen zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen bewerten, welche Einflussfaktoren dabei wie berücksichtigt werden (Abschnitt II.2.2.1) und wie daraus Entscheidungen abgeleitet werden (Abschnitte II.2.2.2 und II.2.2.4).

Dabei ist zu beachten, dass einige der externen Einflussfaktoren sektorspezifisch sind, das heißt sie sind nur für Werke, die zu dem gleichen Sektor gehören, identisch. Variablen mit sektorspezifischen Werten werden im folgenden mit dem Index  $s$  gekennzeichnet.

### **II.2.2.1. Rangwert zur Bewertung der Handlungsoptionen**

Zur Bewertung seiner aktuellen Situation sowie der verfügbaren Handlungsoptionen verarbeitet der Akteur, in diesem Fall das Werk  $w$ , sowohl unternehmensexterne als auch -interne Informationen. Dazu werden zwei

werksspezifische Kennziffern erhoben. Die erste Kennziffer betrachtet die Kosten des Unternehmens und stellt damit die ökonomische Komponente der Bewertung dar. Die zweite Kennziffer wird aus den spezifischen Emissionen aller Schadstoffe berechnet und stellt eine ökologische Komponente dar. Die beiden Kennziffern können dabei in unterschiedlicher Gewichtung einfließen. Durch einen Strafterm wird die Einhaltung der Umweltschutzvorschriften hinsichtlich Schadstoffemissionen in die Luft berücksichtigt.

Aus dem Vergleich mit den anderen Werken des gleichen Sektors ergibt sich dann ein Wert, der die Stellung des Werkes im Markt beschreibt. Anhand dieses Wertes kann eine Rangfolge der Werke bestimmt werden, daher die Bezeichnung Rangwert  $RW$ .

### Ökonomische Kennziffer

Die ökonomische Kennziffer gibt an, zu welchen spezifischen Herstellkosten  $StK^{s,w,t}$  das Werk  $w$  in Periode  $t$  bei voller Auslastung produzieren kann. Dazu werden zunächst alle im Modell definierten Kosten des Werkes berechnet, aufsummiert und anschließend durch die Gesamtkapazität des Werkes  $Kap^{s,w}$  dividiert.

$$StK^{s,w,t} = \frac{\sum_c K_c^{s,w,t} (Kap^{s,w,t})}{Kap^{s,w,t}} \quad [\text{II.2.19}]$$

Die einzelnen Kostenkategorien  $c$  sind dabei analog zur Struktur der im makroökonomischen Modell verwendeten Input-Output-Tabelle gegliedert in Vorleistungen (Materialkosten), Gütersteuern, Arbeitsentgelte (Personalkosten), Produktionsabgaben, Abschreibungen und Nettobetriebsüberschuss. Die einzelnen Kategorien sind wie folgt definiert, wobei  $AR^{s,w,t}$  die Aktivitätsrate des Werkes bezeichnet.

#### 1. Materialkosten $K_1^{s,w,t}$ :

Die Materialkosten ergeben sich aus der zur Produktion benötigten Menge an Inputstoffen und den aktuellen Preisen dieser Güter. Die nach Gleichung II.2.7 ermittelten Inputkoeffizienten  $IK^{s,w,t}$  des Werkes geben an, welche

Mengen zur Produktion einer Einheit des Hauptproduktes  $j^*$  eingesetzt werden. Der Preisvektor  $P^{s,t}$  enthält die sektorspezifischen Preise der Inputstoffe und entspricht der entsprechenden Spalte der Preismatrix, wie sie im IOM berechnet wird. Das Skalarprodukt der beiden Vektoren gibt die Materialstückkosten an und wird mit der zu produzierenden Menge multipliziert, um die Materialgesamtkosten zu erhalten.

$$K_1^{s,w,t} = IK^{s,w,t} \cdot P^{s,t} \cdot AR^{s,w,t} \quad [\text{II.2.20}]$$

## 2. Gütersteuern $K_2^{s,w,t}$

Die zur Berechnung der Materialkosten verwendeten Preise sind Herstellpreise, auf die im Gegensatz zu Anschaffungspreisen keine Gütersteuern aufgeschlagen werden. Anstelle einer Umrechnung der Preise in Anschaffungspreise und dem damit einhergehenden Aufschlag der zu zahlenden Gütersteuern auf die Materialkosten, werden die Gütersteuern hier in Anlehnung an die Vorgehensweise im makroökonomischen Rahmenmodell getrennt berechnet und ausgewiesen.

Zwar werden die Auswirkungen einer Änderung der Gütersteuern in der Simulation explizit betrachtet, jedoch beschränkt sich dies auf die Besteuerung emissionsrelevanter Güter. Für Deutschland können hier die im allgemeinen Sprachgebrauch als Ökosteuern zusammengefassten Gütersteuern auf Energieträger, die Energie-<sup>6</sup> und Stromsteuer<sup>7</sup>, genannt werden. Lediglich für diese Gütersteuern ist daher eine zeitliche und sektorspezifische Differenzierung der Steuersätze erforderlich. Die übrigen Steuersätze sind für alle Sektoren gleich, wodurch es zu einer Verzerrung der berechneten Gütersteuern kommt. Dies wird durch die Einführung eines werksspezifischen Gütersteuerkoeffizienten  $GSK^{s,w,t}$  ausgeglichen. Der Gütersteuerkoeffizient stellt

<sup>6</sup>Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534; 2008 I S. 660; 1007), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 1. März 2011 (BGBl. I S. 282) geändert worden ist.

<sup>7</sup>Stromsteuergesetz vom 24. März 1999 (BGBl. I S. 378), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 1. März 2011 (BGBl. I S. 282) geändert worden ist.

einen Koeffizienten dar, der die zu zahlenden Gütersteuern je produzierter Einheit des Endprodukts angibt.<sup>8</sup> Zur Fortschreibung dieses Koeffizienten werden zunächst die absoluten Gütersteuern  $GS^{s,w,t}$  berechnet (Gleichung II.2.21) und dann deren Änderung im Vergleich zur Vorperiode verwendet (Gleichung II.2.22). Änderungen können dabei aus veränderten Steuersätzen oder einer Änderung des Produktionsverfahrens resultieren.

Die Berechnung der insgesamt von einem Werk auf alle gekauften Produkte zu zahlenden Gütersteuern  $GS^{s,w,t}$  besteht in einer Skalarmultiplikation des Vektors der Inputkoeffizienten mit den sektorspezifischen Gütersteuersätzen  $GSS^{s,t}$ .

$$GS^{s,w,t} = AR^{s,w,t} \cdot IK^{s,w,t} \cdot GSS^{s,t} \quad [\text{II.2.21}]$$

Die Relation der so berechneten Werte  $GS^{s,w,t}$  zu den entsprechenden Werten der Vorperiode  $GS^{s,w,t-1}$  wird zur Fortschreibung eines Gütersteuerkoeffizienten  $GSK^{s,w}$  genutzt:

$$GSK^{s,w,t} = GSK^{s,w,t-1} \cdot \frac{GS^{s,w,t}}{GS^{s,w,t-1}} \quad [\text{II.2.22}]$$

Damit ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der insgesamt zu zahlenden Gütersteuer  $K_2$ :

$$K_2^{s,w,t} = AR^{s,w,t} \cdot GSK^{s,w,t} \quad [\text{II.2.23}]$$

### 3. Personalkosten $K_3^{s,w,t}$

Der Inputfaktor Arbeit wird modelltechnisch genauso behandelt wie andere Inputfaktoren und ist folglich in dem werksübergreifenden Vektor der Inputkoeffizienten  $IK^{s,w,t}$  enthalten. Der Wert  $IK_{\text{Arbeit}}^{s,w,t}$  für den Inputfaktor  $i = \text{Arbeit}$  gibt somit an, wie viele Personenjahre Arbeitsleistung für die Produktion einer Einheit des Endproduktes benötigt werden. Damit berechnen

<sup>8</sup>Der Gütersteuerkoeffizient wird für das Startjahr aus der IO-Tabelle abgeleitet und für jede Anlagenkombination eines Referenzprozesses spezifisch angepasst, zur Berechnung siehe die sektorspezifischen Ausführungen in Kapitel II.4.

sich die Personalkosten analog zu den Materialkosten (Gleichung II.2.20), wobei als Preis für Arbeitsleistung sektorspezifische, zeitabhängige Arbeitsentgelte in der Variable  $Lohn^{s,t}$  verwendet werden.

$$K_3^{s,w,t} = IK_{Arbeits}^{s,w,t} \cdot Lohn^{s,t} \cdot AR^{s,w,t} \quad [II.2.24]$$

Die Bezeichnung der Variable  $Lohn$  umfasst neben Löhnen auch Gehälter und Lohnnebenkosten. Eine Differenzierung in verschiedene Arten von Arbeit (z. B. nach Berufsgruppen) ist für den Zweck dieser Arbeit nicht notwendig.

#### 4. Produktionsabgaben $K_4^{s,w,t}$

Die Produktionsabgaben werden in diesem Modell nicht genauer untersucht und daher als konstant über die Zeit und für alle Werke angenommen. Die Höhe der Abgaben wird sektorspezifisch aus den Angaben aus der IO-Tabelle abgeleitet.

#### 5. Umweltbezogene Kosten $K_5^{s,w,t}$

Die Umweltbezogenen Kosten werden in der Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes nicht explizit ausgewiesen. Im Rahmen des hier vorgestellten Modells werden sie im Input-Output-Modell den Produktionsabgaben zugeordnet, im Industriemodell hingegen als eigene Kostenkategorie berechnet.

An dieser Stelle zeigen die beiden umweltpolitischen Instrumente Schadstoffsteuer und Zertifikatehandel ihre Wirkung auf die Unternehmen und deren Entscheidungsgrundlagen. Beide Instrumente verursachen variable Kosten in Abhängigkeit von den mit der Produktion der Menge  $AR^{s,w,t}$  einhergehenden Emissionen  $E^{s,w,t}$  des Werkes.

$$K_5^{s,w,t} = ES^t \cdot E^{s,w,t} + EZ^t \cdot E^{s,w,t} \quad [\text{II.2.25}]$$

Wobei  $ES_p^t$  der Steuersatz auf die emittierte Menge des Schadstoffs  $p$  in der Periode  $t$  im Sinne einer Pigou-Steuer ist und  $EZ_p^t$  den Marktpreis in Periode  $t$  eines Zertifikats, das zur Emission einer definierten Menge des Schadstoff  $p$  berechtigt, wiedergibt.

Je Schadstoff und Periode ist jeweils nur für eine der beiden Variablen  $ES$  oder  $EZ$  ein Wert ungleich null möglich, da die beiden Instrumente Schadstoffsteuer und Handel mit Schadstoffzertifikaten nicht zugleich eingesetzt werden können. Wie den Gleichungen zu entnehmen ist, unterscheiden sich die beiden Instrumente in der Kostenberechnung nicht. Der Unterschied ihrer Wirkung besteht darin, dass der Steuersatz der Schadstoffsteuer exogen vorgegeben wird, während der Zertifikatepreis endogen in Abhängigkeit der vorgegebenen nationalen Verfügbarkeit von Zertifikaten, also der nationalen Emissionsmenge, bestimmt wird.

#### 6. Abschreibungen $K_6^{s,w,t}$

Für die Abschreibungen wird ähnlich wie bei den Gütersteuern ein Kostenkoeffizient aus der IO-Tabelle abgeleitet. Dieser wird werkspezifisch bei der Implementierung neuer Anlagen, Anlagenteile oder Minderungsmaßnahmen fortgeschrieben.

#### 7. Nettobetriebsüberschuss $K_7^{s,w,t}$

Obwohl der Nettobetriebsüberschuss keine Kostengröße darstellt, wird diese Größe hier in der Kostenkalkulation mit berücksichtigt. Dies liegt teils in der Definition des Nettobetriebsüberschusses in der IO-Rechnung, teils in der Verwendung der Größe Stückkosten im Modellkontext. Laut IO-Rechnung enthält der Nettobetriebsüberschuss die Entgelte für Eigen-

und Fremdkapital sowie für den Produktionsfaktor Boden. Da in der Kostenkalkulation auf die Berechnung von Fremdkapitalzinsen ebenso wie auf kalkulatorische Kosten, wie kalkulatorische Zinsen und Unternehmerlohn, verzichtet wurde, stellt der Nettobetriebsüberschuss hierzu eine Ersatzgröße da, die zum einen einfacher zu berechnen ist und zum anderen die Konsistenz zum IOM gewährleistet. Auch hier geschieht die Berechnung über einen aus der IO-Tabelle abgeleiteten Kostenkoeffizienten.

Die Kosten werden maßgeblich durch die im jeweiligen Werk eingesetzte Technologie bestimmt. Die Technologie spiegelt sich in den internen und damit individuellen Größen wie Inputkoeffizienten, Emissionsfaktoren und den daraus abgeleiteten Größen Abschreibungen, Gütersteuerkoeffizient und Emissionen wider. An externen Daten gehen Güterpreise, Lohnsätze und Steuersätze auf Güter und Emissionen sowie die Zertifikatspreise ein. Diese externen Größen sind für alle Werke eines Sektors gleich.

## Ökologische Kennziffern

Wie die umweltbezogenen Kosten so beziehen sich auch die ökologischen Kennziffern auf die mit der Produktion einhergehenden Emissionen. Für jeden Schadstoff wird eine Kennziffer berechnet, die bei der anschließenden Normierung zusammengefasst werden. Die Kennziffer entspricht den spezifischen Emissionen  $SE_p^{s,w,t}$  des Werkes bei voller Auslastung ( $AR^{s,w,t} = Kap^{s,w,t}$ ).

$$SE_p^{s,w,t} = \frac{E_p^{s,w,t}}{Kap^{s,w,t}} \quad [\text{II.2.26}]$$

## Normierung der Kennziffern

Um die oben beschriebenen Kennziffern zusammenzufassen, werden diese zunächst normiert. Dazu werden über alle Werke eines Sektors hinweg die höchsten und niedrigsten Werte  $StK^{s,max,t}$ ,  $SE^{s,max,t}$  und  $StK^{s,min,t}$ ,  $SE^{s,min,t}$  bestimmt und

diese als Grenzen zur Normierung herangezogen. Somit ergeben sich für jedes Werk normierte Kennziffern mit Werten zwischen 0 und 1.

$$\overline{StK}^{s,w,t} = \frac{StK^{s,w,t} - StK^{s,min,t}}{StK^{s,max,t} - StK^{s,min,t}} \quad [\text{II.2.27}]$$

$$\overline{SE}_p^{s,w,t} = \frac{SE_p^{s,w,t} - SE_p^{s,min,t}}{SE_p^{s,max,t} - SE_p^{s,min,t}} \quad [\text{II.2.28}]$$

Aus den normierten ökologischen Kennziffern wird der Mittelwert  $\overline{\overline{SE}}^{s,w,t}$  gebildet, wobei jeder der vier Schadstoffe die gleiche Gewichtung erhält.

$$\overline{\overline{SE}}^{s,w,t} = \sum_p \overline{SE}_p^{s,w,t} / 4 \quad [\text{II.2.29}]$$

### **Strafterm bei Nicht-Einhaltung der Grenzwerte**

Neben den beiden beschriebenen Kennziffern, die die Leistungsfähigkeit des Werkes am Markt beschreiben, stellt weiterhin die Fähigkeit zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte ein Kriterium bei der Bewertung der Handlungsoptionen dar. Die Nicht-Einhaltung von Grenzwerten ist in der Regel mit Sanktionen verbunden, die in der behördlichen Praxis durch einen teilweisen oder vollständigen Entzug der Betriebsgenehmigung umgesetzt werden können. Diese Art der Sanktion wird dadurch nachgebildet, dass die Marktposition, dargestellt durch den Rangwert, durch die Addition eines Strafterms so weit verschlechtert wird, dass dem betroffenen Werk eine Stilllegung des Betriebs aufgrund mangelnder Nachfrage droht.

Der Strafterm bezieht sich dabei auf die prozentuale Überschreitung der Grenzwerte und wird umso höher je mehr Perioden hintereinander ein Grenzwert nicht eingehalten wird.

Grenzwerte sind anlagenspezifisch definiert<sup>9</sup>, weshalb auch die prozentuale Überschreitung  $S_p^{s,w,a,t}$  für jede Anlage  $a$  des Werkes  $w$  berechnet wird:

<sup>9</sup>Vgl. Abschnitt II.5.1.1.

$$S_p^{s,w,a,t} = \max\left(0, \frac{\frac{E^{s,w,a,t}}{Agv^{s,w,a,t}} - GW_p^{s,w,a,t}}{GW_p^{s,w,a,t}}\right) \quad [\text{II.2.30}]$$

Dabei wird für die Berechnung der Emissionen  $E^{s,w,a,t}$  wiederum von einer Vollauslastung des Werkes ausgegangen. Da die Grenzwerte  $GW_p^{s,w,a,t}$  als Konzentrationen gegeben sind, müssen die Emissionen zu dem Abgasvolumen  $Agv^{s,w,a,t}$  in Beziehung gesetzt werden. Die Überschreitungen werden zunächst für jeden Schadstoff einzeln über alle Anlagen aufaddiert.

$$S_p^{s,w,t} = \sum_a S_p^{s,w,a,t} \quad [\text{II.2.31}]$$

Der Strafterm  $ST$  bezieht nicht nur Überschreitungen in der aktuellen Periode  $t = \hat{t}$  mit ein, sondern summiert die Überschreitungen der vergangenen Jahre bis zurück zu  $t = t_p^*$  auf. Dabei bezeichnet  $t_p^*$  die kürzest zurückliegende Periode ohne Überschreitung der Grenzwerte für den betrachteten Schadstoff  $p$ .

$$ST_p^{s,w,\hat{t}} = \sum_{t=t_p^*}^{\hat{t}} S_p^{s,w,t} \quad [\text{II.2.32}]$$

$$t_p^* = \max\{t | S_p^{s,w,t} = 0\} \quad [\text{II.2.33}]$$

Dadurch werden kurzfristige Überschreitungen geringer gewichtet als dauerhafte Überschreitungen. Zugleich führt eine Überschreitung nicht zwangsweise sofort beim ersten Auftreten zu einer Gegenmaßnahme, was mit den oftmals in Gesetztexten vereinbarten Übergangsfristen zur Anpassung der Produktionsanlagen vereinbar ist. So wird z. B. zugelassen, dass ein Werk, wenn es zum Zeitpunkt der Verschärfung der Grenzwerte bereits nahezu das Ende seiner Nutzungsdauer erreicht hat, keine neuen Minderungsmaßnahmen einbaut, sondern mit der Minderung bis zur Modernisierung der gesamten Anlage bzw. des Werkes wartet.

Anschließend wird der Strafterm über alle Schadstoffe aufaddiert:

$$\overline{ST}^{s,w,t} = \sum_p ST_p^{s,w,t} \quad [\text{II.2.34}]$$

### Zusammenfassung zum Rangwert

Zuletzt werden die beiden Kennziffern und der Strafterm additiv verknüpft und zum Rangwert  $RW$  zusammengefasst. Die beiden Kennziffern gehen dabei in wählbarer Gewichtung  $g_{oekonomisch}$  und  $g_{oekologisch}$  ein, deren Summe  $g_{oekonomisch} + g_{oekologisch} = 1$  ergibt.

$$RW^{s,w,t} = \overline{StK}^{s,w,t} \cdot g_{oekonomisch} + \overline{SE}^{s,w,t} \cdot g_{oekologisch} + \overline{ST}^{s,w,t} \quad [\text{II.2.35}]$$

Mit Hilfe des so berechneten Rangwerts  $RW^{s,w,t}$  lassen sich die Werke in eine Rangfolge bringen, die eine Präferenzreihenfolge der Kunden nachbildet, anhand derer die Allokation der Gesamtnachfrage vorgenommen wird, wie in Abschnitt II.2.3 beschrieben wird. Darin wird dasjenige Werk am besten bewertet, das sich am stärksten nach den Kundenwünschen ausrichtet.

Mit der Gewichtung wird die Möglichkeit geschaffen, Kundenpräferenzen im Modell abzubilden und deren Auswirkungen anhand von Szenarioanalysen zu untersuchen. Unterstellt man die oft gebrauchte Annahme des homo oeconomicus, so ist davon auszugehen, dass das Werk mit den niedrigsten Stückkosten den Kundenwünschen am ehesten entspricht. Dieser Annahme entspricht eine Gewichtung  $g_{oekonomisch} = 1$  für die ökonomische Kennziffer, während die ökologische Kennziffer nicht mehr in die Bewertung eingeht ( $g_{oekologisch} = 0$ ). Der andere Extremfall wäre eine Kundschaft, die ihre Kaufentscheidung ausschließlich nach ökologischen Gesichtspunkten trifft.

Der Strafterm verzerrt diese Präferenzreihenfolge zu Gunsten der Werke, die in der Lage sind, auch bei voller Auslastung die gesetzten Grenzwerte einzuhalten. Auf Grund der möglichen Aufsummierung des Strafterms über mehrere Perioden übt dieser Wert eine deutliche Wirkung auf den Rangwert und

damit die Nachfrageallokation aus. Dadurch besteht ein starker Anreiz für die Werke, die Grenzwerte einzuhalten.

### II.2.2.2. Investitionsentscheidung in Minderungsmaßnahmen

Mit der Durchführung von Emissionsminderungsmaßnahmen versucht der Akteur, das Werk  $w$ , seine Situation auf dem Markt zu verbessern und insbesondere der Gefahr einer Produktionseinstellung wegen Überschreitung der Grenzwerte entgegen zu wirken. Obwohl viele Parameter einer EMM, wie Minderungseffizienz und spezifische Investition, für alle Werke gleich sind, kann keine allgemein gültige Reihenfolge, welche Maßnahme zu bevorzugen sei, etwa in Form einer Kostenkurve, aufgestellt werden. Die Bewertung der Maßnahmen hängt von den individuellen Gegebenheiten des Werkes ab. Dabei spielen Skaleneffekte sowie die individuelle technische Ausstattung und damit die Vorgeschichte des Werkes eine Rolle. Folglich muss für jedes Werk eine individuelle Bewertung der Maßnahmen vorgenommen werden.

Das hierzu entwickelte Verfahren kann als statisches Verfahren der Investitionsrechnung eingeordnet werden, wobei es sowohl die mit der Maßnahme verbundenen Nachteile in Form von Kostensteigerungen als auch die Vorteile durch eine verbesserte Umweltperformance einbezieht. Durch den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Rangwert  $RW$  werden die Vor- und Nachteile in einer Kennziffer zusammengefasst, wodurch diese zur Bewertung der EMM herangezogen werden kann.

Da der Rangwert sich durch einen Vergleich des Werkes mit seinen Konkurrenten ergibt, ist er nicht allein von den Entscheidungen des Akteurs selbst, sondern auch von Änderungen bei den anderen Werken abhängig. Zur Bewertung der Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass der Akteur die Entscheidungen und Möglichkeiten der anderen Akteure nicht kennt und daher nicht berücksichtigen kann. Die zur Normierung der Kennziffern erforderlichen sektorweit minimalen und maximalen Ausprägungen derselben werden daher konstant gelassen, d. h. der Akteur

trifft seine Entscheidung unter der Annahme, dass seine Konkurrenten keine Maßnahmen durchführen.

Zunächst ist die Menge der zur Auswahl stehenden EMM zu bestimmen. Anhand der Matrix  $T^{anwendbar}$  werden für jede Anlage  $a$  des Werkes  $w$  die anwendbaren Maßnahmen identifiziert. Anlagen, deren Restlaufzeit nur noch fünf Perioden beträgt werden dabei nicht berücksichtigt, da hier angenommen wird, dass ein Werksbetreiber eine Investition in Umweltschutztechnik aufschieben wird, bis die Anlage als Ganzes erneuert wird.

Aus der so gefundenen Menge der technisch möglichen Maßnahmen werden die technisch sinnvollen Maßnahmen durch einen Vergleich mit den bereits an der Anlage angewandten Maßnahmen bestimmt. Eine Maßnahme ist dann technisch sinnvoll, wenn sie mit jeder bereits implementierten Maßnahme kombinierbar ist. Die Kombinierbarkeit von Maßnahmen wird dabei in der Matrix  $T^{kombinierbar}$  definiert.

Eine Maßnahme  $m$  wird als vorteilhaft eingestuft, wenn dadurch ein Rangwert  $RW^{s,w,t,m}$  erreicht werden kann, der kleiner ist als der Referenzrangwert  $RW^{s,w,t}$  ohne Durchführung einer Maßnahme. Eine Maßnahme gilt als finanzierbar, wenn das dem Werk zur Verfügung stehende Kapital  $\kappa^{s,w,t}$  ausreicht, um die mit der Maßnahme verbundenen Investitionsausgaben  $I^{s,w,a,m}$  zu bezahlen. Daraus ergeben sich die beiden Nebenbedingungen zur Beschränkung der zur Auswahl stehenden Menge an Maßnahmen:

$$I^{s,w,a,m} < \kappa^{s,w,t} \quad [\text{II.2.36}]$$

$$RW^{s,w,t,m} < RW^{s,w,t} \quad [\text{II.2.37}]$$

Als Entscheidungskriterium wird die Vorteilhaftigkeit  $V^{s,w,m}$  einer Maßnahme  $m$ , ausgedrückt durch die Differenz des erreichbaren Rangwertes  $RW^{s,w,t,m}$  und des Referenzwertes  $RW^{s,w,t}$  bezogen auf die damit verbundenen Investitionsausgaben  $I^{s,w,a,m}$ , herangezogen.

$$V^{s,w,m} = \frac{RW^{s,w,t} - RW^{s,w,t,m}}{I^{s,w,a,m}} \quad [\text{II.2.38}]$$

Die Investition mit der höchsten relativen Vorteilhaftigkeit  $V^{s,w,m}$  unter Einhaltung der beiden genannten Beschränkungen wird ausgewählt und durchgeführt. Die Änderungen aus der Anwendung der so bestimmten Minderungsmaßnahme werden sofort wirksam, eine Verzögerung durch mögliche Bauzeiten wird nicht abgebildet.

Emissionsminderungsmaßnahmen zielen definitionsgemäß auf eine Verbesserung der ökologischen Kennziffer des Werkes ab. Da sie in der Regel mit zusätzlichen Betriebskosten sowie mit Investitionsausgaben verbunden sind, haben sie allerdings einen negativen Einfluss auf die Herstellkosten und somit die wirtschaftliche Kennziffer des Werkes, woraus ein Zielkonflikt resultieren kann. Produktionsintegrierte Maßnahmen, insbesondere Inputsubstitutionen, sind hingegen in vielen Fällen mit Kosteneinsparungen verbunden, da sie teure Inputfaktoren (z. B. Brennstoffe) einsparen oder durch günstigere (Sekundär-brennstoffe) ersetzen, und wirken sich somit auf beide Kennziffern positiv aus. Die Verwendung des Rangwertes gewährleistet, dass diese Wechselwirkungen in die Entscheidung einbezogen werden, da er eine gewichtete Verknüpfung ökologischer und ökonomischer Größen darstellt.

Eine ökonomische Wirkung entfalten die EMM zunächst durch den Eingriff in die Kostenstruktur des Werkes. Damit können jedoch auch Effekte auf die Einnahmen in Form von geänderten Absatzmengen durch die geänderte Wettbewerbssituation auftreten. Der Rangwert, der durch die Normierung der Kennziffern die Werte der Konkurrenz mit berücksichtigt, ist gerade ein Maß für die Wettbewerbssituation des Unternehmens und daher auch geeignet einnahmenseitige Effekte zu antizipieren.

Ein Nachteil des angewandten statischen Verfahrens besteht darin, dass dem Akteur die Fähigkeit, vorausschauend zu planen, genommen wird. Er kann daher Gesetzesänderungen und Preisimpulse nicht antizipieren, sondern reagiert auf diese erst bei deren Eintreten. Lediglich werksinterne Investitionszyklen werden insoweit berücksichtigt, dass an alten Anlagen keine Investitionen mehr durchgeführt werden. Diese Kurzsichtigkeit führt jedoch lediglich zu einer zeitlichen Verschiebung der Entscheidung eine Minderungsmaßnahme durchzuführen und

ist daher im Rahmen einer vergleichenden Szenarioanalyse akzeptabel und wegen der enormen Rechenzeitverkürzung gegenüber eine dynamischen Investitionsrechnung sinnvoll.

### **II.2.2.3. Erneuerung von Anlagen**

Erreicht eine Anlage das Ende ihrer Lebensdauer, so wird sie durch eine neue Anlage ersetzt, die die entstehende Lücke in der Prozessfolge schließt, die also das gleiche Produkt herstellt wie die abgeschaltete Anlage. Die der alten Anlage zugeordneten Abgasreinigungsanlagen werden dabei ersatzlos entfernt. Eine neue Anlage muss dem Stand der Technik entsprechen, folglich muss die neuste verfügbare Anlage ausgewählt werden. Weiterhin müssen Neuanlagen alle Grenzwerte einhalten, dazu werden ggf. zusätzliche Emissionsminderungsmaßnahmen durchgeführt. Die Entscheidung, welche Maßnahmen durchgeführt werden, verläuft nach den gleichen Kriterien, wie in Abschnitt II.2.2.2 beschrieben, jedoch wird die finanzielle Beschränkung II.2.36 aufgehoben und es können beliebig viele Maßnahmen durchgeführt werden, bis alle Grenzwerte eingehalten werden.

### **II.2.2.4. Neubau und Stilllegung von Werken**

Neben den vergleichsweise kleinen Änderungen der Technologie durch Emissionsminderungsmaßnahmen oder der Erneuerung von einzelnen Anlagen, wird die Ausbreitung neuer Produktionsverfahren wesentlich durch Stilllegung und Neubau ganzer Werke bestimmt.

### **Zeitpunkt der Entscheidung**

Ist das Ende der Lebensdauer eines Werkes erreicht, wird dieses stillgelegt. Eine vorzeitige Stilllegung eines Werkes wird außerdem vorgenommen, wenn das Werk drei Perioden in Folge bei der Zuteilung der Nachfrage leer ausging und folglich nicht produziert hat.

Die Entscheidung über die Wiedereröffnung ebenso wie über den Neubau eines Werkes wird in Abhängigkeit von der Gesamtnachfrage des Sektors getroffen. Nur wenn die gesamte installierte Kapazität in einem Sektor  $Kap^{s,t}$ , gemindert um die abgeschalteten Werke, kleiner als die Gesamtnachfrage  $X^{s,t}$  der aktuellen Periode ist, wird ein neues Werk eröffnet. Diese Bedingung  $Kap^{s,t} < X^{s,t}$  wird am Ende jeder Periode abgefragt und führt gegebenenfalls zum Neubau eines Werkes.

### **Wahl des Referenzprozesses**

Beim Neubau bzw. der Wiedereröffnung ist eine Entscheidung über den zu verwendenden Referenzprozess zu treffen. Die bisher verwendete Technologie spielt dabei nur insofern eine Rolle, dass ein Werk, welches zuvor einen ökologisch günstigen Prozess fuhr, nicht zu einem weniger günstigeren wechseln kann. Welcher Referenzprozess als günstiger angesehen wird, wird exogen vorgegeben und orientiert sich im Wesentlichen am Energiebedarf und Emissionsausstoß der Anlagen.

Die Auswahl des geeigneten Referenzprozesses wird anhand des Kapitalwertkriteriums getroffen. Anders als bei der Investitionsentscheidung in EMM wird hier kein statisches Verfahren angewandt, da hier auch langfristige Trends in Preisen und gesetzlichen Vorschriften Berücksichtigung finden sollen.

Die Auszahlungen zur Berechnung des Cashflows sind in ihrer Struktur und ihren Beträgen mit den Kosten zur Berechnung der Herstellkosten weitestgehend identisch. Die Abschreibungen werden durch Investitionsausgaben ersetzt, die nur in der ersten Periode anfallen. Die kalkulatorischen Kosten, die in der Größe Nettobetriebsüberschuss zusammengefasst sind, werden nicht berücksichtigt, da mit ihnen kein Zahlungsstrom verbunden ist. Zur Berechnung der Einzahlungen wird angenommen, dass das neue Werk bei voller Auslastung arbeitet und alles absetzen kann. Als Verkaufspreis wird der aktuelle Preis für alle zukünftigen Perioden verwendet.

### II.2.3. Marktsimulation

Das makroökonomische Rahmenmodell liefert die Gesamtnachfrage  $X^{s,t}$  nach dem Produkt des betrachteten Sektors. In der Realität sorgt der Marktmechanismus für die Aufteilung der Gesamtnachfrage auf die einzelnen Unternehmen. Diese Allokation der Nachfrage auf die einzelnen Anbieter wird im Modell in vereinfachter Form durch die Marktsimulation nachgebildet.

Die Nachfrage wird im makroökonomischen Rahmenmodell preisabhängig bestimmt und kann daher an dieser Stelle als gegeben und damit als vollkommen unelastisch angesehen werden. Die Angebotsseite besteht aus einer Vielzahl unabhängiger Anbieter, die als Preisnehmer betrachtet werden können. Es wird daher zunächst von vollständiger Konkurrenz ausgegangen.

Da von linearen Produktionsfunktionen ausgegangen wird, haben die Anbieter konstante Grenzkosten und sind somit bestrebt, so viel wie möglich abzusetzen. Die angebotene Menge eines Werkes entspricht somit der Kapazität des Werkes. Da hier die gesamte Nachfrage eines Jahres auf einmal gehandelt wird, können die Werke sich in ihrer Angebotsgestaltung nicht an kurzfristigen Kriterien, also der Deckung der variablen Kosten, orientieren, sondern müssen mit dem Erlös auch ihre fixen Kosten decken. Der Preis, zu dem die Werke anzubieten bereit sind, entspricht daher den spezifischen Herstellkosten und nicht, wie unter der Annahme vollständiger Konkurrenz üblich, den Grenzkosten. Die Herstellkosten enthalten dabei, wie im vorangegangenen Abschnitt II.2.2.1 beschrieben, auch die Größe Nettobetriebsüberschuss, die einen kalkulatorischen Unternehmerlohn sowie Kosten für Eigen- und Fremdkapital abdeckt.

Als weitere Abweichung von den Annahmen der vollständigen Konkurrenz soll die Annahme eines einzigen homogenen Gutes je Markt aufgehoben werden. Unter der Annahme homogener Güter ist der Preis des Gutes das einzige Kriterium zur Bewertung der Angebote. Wird weiterhin ein ökonomisch rationales Verhalten der Kunden unterstellt, so ergibt sich eine Präferenzrangfolge der Angebote anhand der Preise. Im Rahmen des Modells wird jedoch angenommen, dass Kunden

nicht allein nach Preisen bewerten, sondern bereit sind für eine umweltschonendere Produktion der Produkte einen höheren Preis zu bezahlen. Dabei wird unterstellt, dass eine solche Kundenpräferenz für ökologische Produkte sich nicht allein auf die Endprodukte sondern auch auf Vorleistungsprodukte auswirkt und damit auch für die betrachteten Sektoren, die nur in sehr geringem Umfang direkt an den Endverbraucher liefern, relevant sind. Die Präferenzrangfolge wird daher nicht anhand der Preise vorgenommen, stattdessen wird die in Abschnitt II.2.2.1 entwickelte Kennziffer des Rangwerts verwendet. Wie dort beschrieben, gehen in diesen Wert die Stückkosten als wirtschaftliche Kennzahl sowie die spezifischen Emissionen als ökologische Kennzahl mit unterschiedlichen Gewichtungen ein, wobei die Gewichtungen Annahmen über die Wertschätzung der Kunden für eine ökologische Produktion darstellen. Weiterhin wird ein Strafterm addiert, der ein Werk bei Überschreitung gesetzlicher Grenzwerte durch deutliche Anhebung des Rangwerts in der Rangfolge nach hinten verschiebt.

Um die Aufteilung der Gesamtnachfrage  $X^{s,t}$  zu berechnen, werden die Kehrwerte der Rangwerte  $RW$  gebildet und aufsummiert. Die Aufteilung richtet sich nach dem Anteil des Kehrwertes des individuellen Rangwerts  $\frac{1}{RW^{s,w,t}}$  an der Summe der Kehrwerte  $\sum_w \frac{1}{RW^{s,w,t}}$ . Das „beste“ Werk hat folglich den höchsten Kehrwert und erhält somit den höchsten Anteil der Nachfrage zugeteilt. Die zugeteilte Nachfrage bzw. zu produzierende Menge  $pm^{s,w,t}$  für das Werk  $w$  darf dabei dessen Produktionskapazität  $Kap^{s,w}$  nicht übersteigen. Daher ist ein iterativer Ansatz notwendig. Dabei bezeichnen  $pm_n^{s,w,t}$  die nach  $n$  Iterationsschritten dem Werk  $w$  zugeteilte Menge und  $X_n^{s,t}$  die in Iterationsschritt  $n$  noch zu verteilende Menge. Als Startwerte gelten:

$$pm_{n=0}^{s,w,t} = 0 \quad \text{und} \quad X_{n=0}^{s,t} = X^{s,t}$$

$$pm_n^{s,w,t} = pm_{n-1}^{s,w,t} + \min\left\{X_n^{s,t} \cdot \frac{\frac{1}{RW^{s,w,t}}}{\sum_w \frac{1}{RW^{s,w,t}}}; Kap^{s,w} - pm_{n-1}^{s,w,t}\right\} \quad [\text{II.2.39}]$$

$$X_{n+1}^{s,t} = X^{s,t} - \sum_w pm_n^{s,w,t} \quad [\text{II.2.40}]$$

Als Abbruchkriterium wird überprüft, ob das „beste“ noch nicht vollständig ausgelastete Werk  $w^*$  genügend freie Kapazität hat, um die restliche Nachfrage aufzunehmen:

$$X_{n+1}^{s,t} < Kap^{s,w^*} - pm_n^{s,w^*,t} \quad [\text{II.2.41}]$$

Diese wird ihm dann vollständig zugeteilt, sodass sich für die zugeteilte Menge ergibt:

$$pm^{s,w \neq w^*,t} = pm_n^{s,w,t} \quad [\text{II.2.42}]$$

$$pm^{s,w=w^*,t} = pm_n^{s,w^*,t} + X_{n+1}^{s,t} \quad [\text{II.2.43}]$$

Darauf folgend wird die Produktion dieser Menge  $pm^{s,w,t}$  für jedes Werk simuliert und insbesondere die dabei entstehenden Emissionen berechnet.



## II.3. Makroökonomisches Rahmenmodell

Eine exogene Vorgabe der wirtschaftlichen Entwicklung, insbesondere der zu produzierenden Güter, würde die Tatsache ignorieren, dass die Implementierung umweltpolitischer Instrumente ebenso wie die Reaktionen der betroffenen Wirtschaftssubjekte Rückwirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung haben können. Insbesondere der Bedarf und die Bereitstellung von Energie in ihren verschiedenen Erscheinungsformen müssen flexibel auf die Änderungen im Verhalten der Industrie- und Privatkunden reagieren können und dazu endogen modelliert werden. Um diese sektorübergreifenden Interdependenzen abzubilden und gesamtwirtschaftliche Rahmenbedingungen bereitzustellen, ist die Modellierung eines makroökonomischen Modells notwendig. Wegen der expliziten Betrachtung der intersektoralen Verflechtungen ist die Wahl eines Ansatzes basierend auf der Input-Output-Rechnung naheliegend.

Die Input-Output-Analyse basiert auf einer sog. Input-Output-Tabelle (IO-Tabelle), die die Lieferverflechtungen aller Sektoren einer Volkswirtschaft untereinander zusammenstellt und somit die Struktur einer Volkswirtschaft beschreibt.<sup>1</sup> Diese Tabelle erlaubt statische Analysen der Lieferstrukturen mit dem großen Vorteil, auch indirekte Auswirkungen von Nachfrage- oder Preisschwankungen abbilden und dadurch hervorgerufene Multiplikatoreffekte abschätzen zu können.

Im Folgenden wird zunächst eine allgemeine Einführung in die theoretischen und empirischen Grundlagen der Input-Output-Modellierung gegeben (Abschnitt II.3.1) und anschließend die spezielle Ausgestaltung des verwendeten Modells und dessen Besonderheiten hinsichtlich der Endogenisierung und Dynamisierung beschrieben (Abschnitt II.3.2).

---

<sup>1</sup>Vgl. Leontief (1951).

## II.3.1. Einführung in die Input-Output-Modellierung

### II.3.1.1. Die Input-Output-Tabelle

Die Grundlage der Input-Output-Analyse (IO-Analyse) ist die Input-Output-Tabelle, die für die betrachtete Volkswirtschaft und den betrachteten Zeitraum empirisch erhoben wird.

Eine allgemeine Beschreibung des Aufbaus der IO-Tabelle findet sich z. B. in Holub und Schnabl (1994a) und ausführlicher in Holub und Schnabl (1994b). Die einzelnen Einträge in der IO-Tabelle sind als reale Güterströme zu verstehen. Die erforderliche Aggregation der Tabelle führt dazu, dass das „Gut“ eines Produktionsbereiches in Wirklichkeit ein Güterbündel darstellt. Die Messung der Güterströme in physischen Einheiten wird dadurch erschwert bzw. unmöglich, weshalb in der Regel auf eine Messung in monetären Einheiten zurückgegriffen wird.

Eine allgemeine Darstellung einer IO-Tabelle liefert Abbildung II.3.1. In dieser vereinfachten Darstellung werden  $N$  Produktionsbereiche unterschieden, weiterhin werden  $M$  Endnachfragebereiche und  $L$  Primäraufwandsbereiche angenommen. Die voneinander abgegrenzten und mit römischen Ziffern gekennzeichneten Teilmatrizen werden analog zu den darin enthaltenen Strömen wie folgt bezeichnet:

- Quadrant I: Vorleistungsmatrix
- Quadrant II: Endnachfragematrix
- Quadrant III: Primäraufwandsmatrix
- Quadrant IV: Verflechtungsmatrix des Primäraufwands und der Endnachfrage

Die IO-Tabelle kann spaltenweise oder auch zeilenweise gelesen werden. Betrachtet man eine Spalte  $j$  unter den ersten  $N$  Spalten, so kann man daraus die zur Produktion in Produktionsbereich  $j$  eingesetzten Inputströme entnehmen. Dabei werden Vorleistungsströme  $a_{ij}$  und Primäraufwandsströme  $w_{lj}$  unterschieden.

		Produktionsbereiche					Endnachfragebereiche			
		1	2	3	...	$N$	1	2	3	$M$
Prod. bereiche	1	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	...	$a_{1N}$	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1M}$
	2	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	...	$a_{2N}$	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2M}$
	3	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	...	$a_{3N}$	$y_{31}$	$y_{32}$	...	$y_{3M}$
	.	.	.	.		.	.	.		.
	.	.	.	.		.	.	.		.
					<b>I</b>					
						<b>II</b>				
Primär- aufwands- bereiche	$N$	$a_{N1}$	$a_{N2}$	$a_{N3}$	...	$a_{NN}$	$y_{N1}$	$y_{N2}$	...	$y_{NM}$
	1	$w_{11}$	$w_{12}$	$w_{13}$	...	$w_{1N}$	<b>IV</b>			
	2	$w_{21}$	$w_{22}$	$w_{23}$	...	$w_{2N}$				
	3	$w_{31}$	$w_{32}$	$w_{33}$	...	$w_{3N}$				
	.	.	.	.	...					
$L$	$w_{L1}$	$w_{L2}$	$w_{L3}$	...	$w_{LN}$					
					<b>III</b>					

Abb. II.3.1.: Grundschemata einer IO-Tabelle nach Holub und Schnabl (1994a)

Bei den Vorleistungsströmen handelt es sich um Lieferungen anderer Produktionsbereiche an den betrachteten Produktionsbereich. Die Primäraufwandsströme umfassen im Wesentlichen Aufwandspositionen aus dem Einsatz der Primärfaktoren Kapital, Arbeit und Boden, die als wertschöpfende Faktoren in den Produktionsprozess eingehen. Oft werden auch indirekte Steuern und Importe einbezogen, die dann als Aufwand für Leistungen des Staates bzw. des Auslands interpretiert werden können. Die Aufteilung der Primäraufwandsbereiche kann je nach Ausgestaltung der IO-Tabelle variieren. Die Spaltensumme gibt die Summe aller zur Herstellung verwendeten Inputs an und damit den Wert der gesamten Produktion, den sog. Produktionswert  $x_j$  des Produktionsbereichs  $j$ . Die Spalte eines Produktionsbereichs ist somit ein Abbild der in der betrachteten Periode eingesetzten Technologie ausgedrückt in absoluten Wertströmen. Eine Division der eingesetzten Inputströme durch den Produktionswert ergibt die Koeffizienten der Produktionsfunktion des Produktionsbereichs.

Einer Zeile  $i$  mit  $i = \{1 \dots N\}$  hingegen kann entnommen werden, wozu die produzierten Güter eines Produktionsbereiches verwendet werden. Güter gehen entweder als Vorleistung  $a_{ij}$  in die Produktion anderer Produktionsbereiche ein

oder werden an einen der Endnachfragebereiche zur letzten Verwendung geliefert ( $y_{im}$ ). Als Endnachfragebereiche werden üblicherweise die Kategorien privater und staatlicher Konsum, Investitionen<sup>2</sup> sowie Exporte unterschieden. Die Zeilensumme stellt damit die gesamte Verwendung der Güter eines Produktionsbereiches dar und muss mit dem gesamten Aufkommen, also der Spaltensumme des entsprechenden Produktionsbereichs, übereinstimmen.<sup>3</sup>

Neben der Untergliederung der Endnachfrage- und der Primäraufwandsbereiche stehen zahlreiche weitere Gestaltungsspielräume bei der Erstellung einer Input-Output-Tabelle zur Verfügung. Auch das Statistische Bundesamt stellt mehrere Tabellen zur Verfügung, die sich im Wesentlichen hinsichtlich der Kriterien *Prinzip der Sektorenbildung*, zugrundeliegende *Preisbasis* sowie Art der *Einführung der Importe* unterscheiden.

### II.3.1.2. Das statische offene Input-Output-Modell

Im Folgenden wird das statische offene Grundmodell der Input-Output-Analyse in seinen Ausprägungen als Mengen- und als Preismodell vorgestellt, das die Grundlage jedes weitergehenden Input-Output-Modells darstellt.<sup>4</sup> Das statische Modell betrachtet nur eine Periode anhand einer gegebenen IO-Tabelle für diese Periode und wird im Rahmen von *ex-post*-Analysen eingesetzt. Das Mengenmodell untersucht die Auswirkungen einer Nachfrageerhöhung auf die Produktion, während sich das Preismodell mit Änderungen der Kostensätze der Primärinputfaktoren, z. B. Lohnsteigerungen, und deren Effekt auf die Preise der Güter befasst. Dabei werden neben den direkten Wirkungen, also den Auswirkungen auf den Sektor, in dem eine Änderung zunächst geschieht, auch die durch die intersektoralen Verflechtungen hervorgerufenen indirekten Effekte berücksichtigt.

---

<sup>2</sup>Der Begriff Investitionen kann leicht zu Missverständnissen führen, da die Produktionsbereiche hier sowohl als Endabnehmer als auch als Lieferanten auftreten. In der IO-Tabelle werden die von einem Produktionsbereich produzierten und gelieferten Investitionsgüter als Endnachfragestrom ausgewiesen. Die IO-Tabelle enthält keine Angaben über die getätigten Investitionen eines Produktionsbereichs oder darüber, an wen die Investitionsgüter geliefert werden.

<sup>3</sup>Die Gleichheit von gesamter Verwendung und gesamtem Aufkommen gilt nur unter geeigneter Einbeziehung der Importe und Exporte oder für eine geschlossene Volkswirtschaft. Zu Möglichkeiten zur Ausweisung der Außenhandelsströme vgl. Holub und Schnabl (1994a).

<sup>4</sup>Die Darstellung erfolgt in Anlehnung an Holub und Schnabl (1994b).

Solange nur eine Periode betrachtet wird, sind Rückwirkungen von Produktionssteigerungen auf die Endnachfrage vernachlässigbar, weshalb hier von einer exogen gegebenen Endnachfrage ausgegangen wird. Solange solche Rückkopplungen auf die Endnachfrage, wie sie sich z. B. durch Einkommensänderungen ergeben können, nicht berücksichtigt werden, spricht man von offenen Modellen.

### **Wesentliche Annahmen**

Die erste Annahme, die aus der zugrundeliegenden IO-Tabelle übernommen wird, wird als *Homogenitätsannahme* bezeichnet. Diese Annahme geht davon aus, dass jeder Betrieb eines Sektors wert- und mengenmäßig das gleiche Güterbündel produziert, das folglich als homogenes Gut aufgefasst werden kann. Damit ist monopolistische Konkurrenz durch Produktdifferenzierung ausgeschlossen. Weiterhin wird dabei angenommen, dass Vorleistungslieferungen unabhängig davon, in welchem Produktionsbereich sie eingesetzt werden, immer die gleiche Qualität und mengenmäßige Zusammensetzung des Güterbündels aufweisen.

Eine weitere wesentliche Annahme, die dem statischen Modell zugrunde liegt, ist die *Proportionalitätsannahme*, nach der alle Input-Koeffizienten konstant und auch die Verhältnisse der Koeffizienten untereinander konstant sind, was implizit bedeutet, dass die einzelnen Güter nicht substituierbar sind. Die IO-Analyse geht folglich von *linear-limitationalen Produktionsfunktionen* aus. In der Analyse bedeutet dies, dass auch beliebig große Nachfragezuwächse zu keiner Änderung der Koeffizienten, also der Technologie, führen. Damit werden Skalen- und Lerneffekte ausgeschlossen, außerdem wird von unbegrenzten Produktionskapazitäten ausgegangen. Eine sinnvolle Anwendung dieses Modells wird folglich auf übertrieben hohe Steigerungen der Endnachfrage verzichtet, um mit diesen beiden Annahmen nicht in Konflikt zu geraten.

## Herleitung der zentralen Formel der Input-Output-Rechnung

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Input-Output-Tabelle enthält die notwendigen Daten zur Durchführung einer IO-Analyse, deren zentrale Formel im Folgenden hergeleitet wird.<sup>5</sup>

Die wichtigsten Daten sind dabei die wertmäßigen Vorleistungsströme zwischen den  $N$  verschiedenen Produktionsbereichen  $a_{ij}$ , die zusammen mit den Endnachfrageströmen  $y_i$  die gesamte Produktion  $x_i$  eines Produktionsbereiches  $i$  definieren. Dabei stellt  $y_i$  die Summe aller einzelnen Endnachfragekomponenten dar.

$$y_i = \sum_m y_{im} \quad [\text{II.3.1}]$$

Die Produktion  $x_i$  ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11} + a_{12} + \cdots + a_{1N} + y_1 \\ &\vdots \\ x_i &= a_{i1} + a_{i2} + \cdots + a_{iN} + y_i \\ &\vdots \\ x_N &= a_{N1} + a_{N2} + \cdots + a_{NN} + y_N \end{aligned} \quad [\text{II.3.2}]$$

Aus den Vorleistungsströmen  $a_{ij}$  lassen sich durch Division durch die Produktionswerte  $x_j$  die sog. *direkten Input-Koeffizienten*  $b_{ij}$  ableiten, die angeben, welche Menge von Gut  $i$  gemessen in monetären Einheiten zur Herstellung von einer Einheit des Guts  $j$ , ebenfalls in monetären Einheiten, in der betrachteten Periode verwendet wurde.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{x_j} \quad [\text{II.3.3}]$$

Da diese Koeffizienten als konstant angenommen werden, besteht folglich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Output  $x$  eines Produktionsbereichs

<sup>5</sup>Ein kurzer Einstieg, insbesondere in die mathematischen Grundlagen der Input-Output-Rechnung, findet sich z. B. in Chiang und Wainwright (2006). Die hier dargestellte Herleitung folgt im Wesentlichen Miller und Blair (2009).

und den verschiedenen Inputfaktoren in dem Sinne, dass ein Vervielfachen des Outputs um einen bestimmten Faktor auch den Inputbedarf um diesen Faktor erhöht, was in der Proportionalitätsannahme seinen Ausdruck findet. An den Input-Koeffizienten lässt sich die dem Input-Output-Modell zugrundeliegende Produktionsfunktion II.3.4 erkennen.

$$x_j = \min\left(\frac{a_{1j}}{b_{1j}}, \frac{a_{2j}}{b_{2j}}, \dots, \frac{a_{Nj}}{b_{Nj}}\right) \quad [\text{II.3.4}]$$

Durch die Annahme konstanter Koeffizienten  $b_{ij}$  ergibt sich zugleich auch ein konstantes Verhältnis der Güterströme zueinander ( $\frac{a_{ij}}{a_{kj}} = \text{const}$ ), was bedeutet, dass diese nicht substituierbar sind. Das IOM geht also von linear-limitationalen Produktionsfunktionen aus.<sup>6</sup>

Mit Hilfe der Koeffizienten kann nun die Produktion in jedem Produktionsbereich in Abhängigkeit der Produktion der anderen Produktionsbereiche berechnet werden, wozu die Vorleistungsströme in Gleichung II.3.2 entsprechend der Gleichung II.3.3 ersetzt werden.

$$\begin{aligned} x_1 &= b_{11}x_1 + \dots + b_{1i}x_i + \dots + b_{1N}x_N + y_1 \\ &\vdots \\ x_i &= b_{i1}x_1 + \dots + b_{ii}x_i + \dots + b_{iN}x_N + y_i \\ &\vdots \\ x_N &= b_{N1}x_1 + \dots + b_{Ni}x_i + \dots + b_{NN}x_N + y_N \end{aligned} \quad [\text{II.3.5}]$$

Die gesuchte Größe ist die Gesamtnachfrage  $x$ , nach der das Gleichungssystem aufzulösen ist.

<sup>6</sup>Zu Eigenschaften verschiedener Produktionsfunktionen siehe auch Fandel (1996).

## Über den Zwischenschritt

$$\begin{array}{rcl}
x_1 - b_{11}x_1 & - \cdots - b_{1i}x_i & - \cdots - b_{1N}x_N = y_1 \\
\vdots & & \\
x_i - b_{i1}x_1 & - \cdots - b_{ii}x_i & - \cdots - b_{iN}x_N = y_i \\
\vdots & & \\
x_N - b_{N1}x_1 & - \cdots - b_{Ni}x_i & - \cdots - b_{NN}x_N = y_N
\end{array}$$

gelangt man zu folgendem Gleichungssystem:

$$\begin{array}{rcl}
(1 - b_{11})x_1 & - \cdots - b_{1i}x_i & - \cdots - b_{1N}x_N = y_1 \\
\vdots & & \\
- b_{i1}x_1 & - \cdots + (1 - b_{ii})x_i & - \cdots - b_{iN}x_N = y_i \quad [\text{II.3.6}] \\
\vdots & & \\
- b_{N1}x_1 & - \cdots - b_{Ni}x_i & - \cdots + (1 - b_{NN})x_N = y_N
\end{array}$$

Die  $N$  Gleichungen II.3.6 werden vielfach in Matrixschreibweise zusammengefasst. Dazu sollen zunächst die folgenden Vektoren und Matrizen definiert werden:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N1} & b_{N2} & \cdots & b_{NN} \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}$$

Gleichung II.3.6 stellt sich nun wie folgt dar:

$$(I - B) \cdot x = y \quad [\text{II.3.7}]$$

wobei  $I$  die Einheitsmatrix darstellt. Die Matrix  $B$  wird aufgrund der darin enthaltenen Koeffizienten als *Matrix der direkten Input-Koeffizienten* bezeichnet.<sup>7</sup>

<sup>7</sup>Weitere in der Literatur geläufige Bezeichnungen sind Input-Output-Matrix und Matrix der technischen Koeffizienten.

Um die Gleichung II.3.7 nach  $x$  aufzulösen, ist es notwendig die Inverse  $(I - B)^{-1}$  zu bilden, was nur möglich ist, sofern  $(I - B)$  eine nichtsinguläre Matrix ist.<sup>8</sup>

$$x = (I - B)^{-1} \cdot y = Ly \quad [\text{II.3.8}]$$

wobei  $(I - B)^{-1} = L = [l_{ij}]$  als *Leontief-Inverse* oder *Gesamtbedarfsmatrix* bekannt ist.

## Anwendung in Mengen- und Preismodellen

Das statische offene Mengenmodell, wie es durch Gleichung II.3.8 beschrieben wird, dient der Abschätzung der Produktionsmengen aller Sektoren, die nötig sind eine gegebene Endnachfrage zu befriedigen. Das Mengenmodell geht dabei von konstanten Preisen für alle Güter aus, unabhängig der umgesetzten Mengen.

Die Formulierung eines Preismodells hingegen ermöglicht die Abschätzung von Preisänderungen als Reaktion auf exogene Änderungen einzelner Preise unter Annahme konstanter Mengenrelationen. Steigt der Preis eines Inputfaktors an, ist die direkte Auswirkung eine Reaktion des betroffenen Produktionsbereiches auf gestiegene Kosten durch Anpassung des Preises für das hergestellte Gut. Indirekte Effekte ergeben sich daraus, dass das nun teurere Gut als Input in andere Güter eingeht, wodurch auch hier Preisanpassungen aufgrund gestiegener Kosten nötig sind.

Die Güterpreise  $p_j$  bilden den Vektor  $p$ , während der Vektor  $w$  die Wertschöpfung als Summe der Primärfaktoren darstellt, wobei  $l \in L$  die unterschiedenen Primärfaktoren darstellt.

$$w_j = \sum_l w_{lj} \quad [\text{II.3.9}]$$

Die Formulierung der Modellgleichung des Preismodells gleicht dem Mengenmodell.

$$p = (I - B^T)^{-1} \cdot w \quad [\text{II.3.10}]$$

<sup>8</sup>Zu den Voraussetzungen der Invertierbarkeit von Matrizen sei auf Chiang und Wainwright (2006) verwiesen.

Während im Mengenmodell die Impulse von der Zeilensumme ausgehen, welche die Produktionsmenge darstellt, werden beim Preismodell die Gesamtkosten, dargestellt durch die Spaltensumme, verändert. Daher wird die transponierte Matrix der direkten Koeffizienten  $B^T$  verwendet. Ausgangspunkt der Preisänderungen sind ausschließlich Änderungen in den Preisen der eingehenden Primärfaktoren  $l$ . Da Substitutionseffekte zwischen Vorleistungsgütern durch die Annahme konstanter Mengenrelationen ausgeschlossen sind, kommt es tendenziell zu einer Überschätzung der Preiseffekte. Auch die Annahme, dass die Preise den Stückkosten entsprechen und Kostenänderungen somit sofort an die Kunden weitergeben werden können, deutet auf eine Überschätzung hin.

Sowohl im Mengen- als auch im Preismodell gehen exogene Impulse nur über die Endnachfrage bzw. den Einsatz von Primärfaktoren in das Modell ein. Die intersektoralen Vorleistungsbeziehungen, dargestellt durch die Matrix der direkten Koeffizienten  $B$ , werden in beiden Fällen konstant gehalten.

### **II.3.2. Beschreibung des implementierten Input-Output-Modells**

In seiner konkreten Ausgestaltung orientiert sich das implementierte Input-Output-Modell an den Bedürfnissen des otello-Modellsystems nach einem konsistenten wirtschaftlichen Rahmen. Insbesondere bei der Ausgestaltung der zentralen Input-Output-Matrizen ist die Nähe zum Teilmodell Industrie & Energieversorgung ein ausschlaggebendes Kriterium, wie im folgenden Abschnitt II.3.2.1 erläutert wird. Die Berechnung der Aktivitätsraten der einzelnen Sektorenmodelle erfolgt mit Hilfe eines Mengenmodells, welches in Abschnitt II.3.2.2 näher beschrieben wird. Es handelt sich dabei um ein teilendogenisiertes Modell, das einzelne Bestandteile der Endnachfrage, im einzelnen den Konsum der privaten Haushalte sowie die privaten Investitionen, endogen abbildet.<sup>9</sup>

In Abschnitt II.3.2.3 wird beschrieben, wie der Übergang von einem statischen zu einem dynamischen Modell unter Einbeziehung der Impulse aus der im Industriemodell simulierten technischen Entwicklung erreicht wird.

---

<sup>9</sup>Das beschriebene Modell entspricht dem in Ilse vorgestellten Input-Output-Modell.

### II.3.2.1. Gestaltung der Input-Output-Matrizen

#### Auswahl der IO-Tabelle

Die Input-Output-Tabelle stellt die Datenbasis und das Gerüst des Modells dar und muss daher entsprechend der Zielsetzungen des Modells ausgestaltet sein. Um eine Verknüpfung mit dem Teilmodell Industrie zu ermöglichen, muss die IO-Tabelle die technischen Gegebenheiten in den einzelnen Produktionsbereichen möglichst genau abbilden. D. h. die Spalten sollen möglichst genau beschreiben, welche Inputströme zur Herstellung eines bestimmten Gutes notwendig sind.

Zum Aufbau des hier vorgestellten Modells wurde daher die symmetrische Input-Output-Tabelle „Inländische Produktion und Importe“ aus dem Veröffentlichungsprogramm des Statistischen Bundesamtes verwendet.<sup>10</sup> Diese Tabelle ist in Produktionsbereiche gegliedert, was einer funktionellen Sektor-Einteilung entspricht. In funktionellen Tabellen definieren sich die Sektoren durch einen möglichst homogenen Output, die Input- und Output-Ströme der Produktionsstätten werden dazu getrennt nach Haupt- und Nebenprodukten ausgewiesen. Außerdem weist diese Tabelle in der Vorleistungsmatrix sowohl Vorleistungen, die im Inland erstellt wurden, als auch importierte Vorleistungen aus. Importe zur letzten Verwendung werden nach Ursprungsbereichen geordnet als zusätzliche Zeile im 3. Quadranten der IO-Tabelle ausgewiesen. Die Vorleistungsströme werden zu Herstellungspreisen bewertet. Demnach sind Handels- und Transportleistungen nicht im Preis enthalten, sondern werden als Vorleistungen der entsprechenden Produktionsbereiche verbucht. Die Ausweisung der Gütersteuern erfolgt in einer zusätzlichen Zeile, in der der gesamte von einem Produktionsbereich für alle eingekauften Güter zu zahlende Betrag an Gütersteuern beziffert wird. Demnach beschreibt die Tabelle technologiebedingte Lieferverflechtungen zwischen den Produktionsbereichen, ohne diese durch Preisaufschläge in Form von Steuern oder Transportleistungen und die unterschiedliche Behandlung inländischer und importierter Güter zu verzerren.

---

<sup>10</sup>Vgl. Statistisches Bundesamt (verschiedene Jahrgänge).

Die Endnachfragebereiche werden weitestgehend vom Statistischen Bundesamt übernommen. Es werden die Bereiche privater  $kp$  und staatlicher Konsum  $ks$ , Investitionen  $inv$  sowie Exporte  $ex$  unterschieden. Der Konsum privater Organisationen ohne Erwerbszweck wird dem staatlichen Konsum zugerechnet, Vorratsänderungen werden nicht berücksichtigt.

Die Aufteilung der Primäraufwandsbereiche entspricht der Aufteilung, die auch vom Statistischen Bundesamt gewählt wurde. Die einzelnen Größen sind:  $ae$ : Arbeitsentgelte,  $pa$ : Produktionsabgaben und indirekte Steuern abzüglich Subventionen,  $ab$ : Abschreibungen,  $nb$ : Nettobetriebsüberschuss. Ebenfalls der Primäraufwandsmatrix zugeordnet werden die Gütersteuern  $gs$ , die sich aus den Vorleistungen ergeben. Weiterhin werden als  $im$  Importe gleichartiger Güter nach Ursprungsbereichen in der Tabelle ausgewiesen. Die Spaltensumme über Vorleistungen, Gütersteuern und Primäraufwand ergibt den Produktionswert  $x$ , der nur im Inland produzierte Güter berücksichtigt. Addiert man weiterhin die Importe  $im$  ergibt sich das Gesamte Aufkommen  $\chi$ , welches mit der Gesamten Verwendung, d. h. der Zeilensumme, übereinstimmt. Im Folgenden werden Gütersteuern und auch Importe als Primäraufwand mitgezählt, da sie genauso wie die tatsächlichen Primäraufwandsfaktoren in die Modellgleichungen eingehen.

### **Disaggregation der Produktionsbereiche**

Das Statistische Bundesamt unterscheidet in seinen IO-Tabellen 72 Produktionsbereiche. Es werden dabei jedoch nur vier Produktionsbereiche im Bereich der Energiebereitstellung unterschieden, was für die gewünschte Anwendung zu ungenau ist. Daher ist eine Anpassung der Tabelle hinsichtlich der Unterteilung der Energieträger notwendig. Ausgehend von der Energieträgerrechnung, welche Daten zum Energieverbrauch der Produktionsbereiche liefert, wurde eine der Fragestellung angepasste Disaggregation der Tabelle vorgenommen. Die Energieträgerrechnung unterscheidet 30 Energieträger und 120 Produktionsbereiche, die Unterbereiche der 72 Produktionsbereiche darstellen.

Unter Zuhilfenahme zusätzlicher Daten muss ein Güterstrom, also die Lieferung eines Güterbündels, wieder in seine Einzelteile zerlegt werden, wozu das Verhältnis der darin enthaltenen Güter bekannt sein muss. An einem konkreten Beispiel bedeutet dies, dass für jeden Produktionsbereich die Lieferung an Kohle in Lieferungen an Braun- bzw. Steinkohle getrennt werden muss (Aufteilung der Zeile). Außerdem muss für den Produktionsbereich Kohle unterschieden werden, welche Vorleistungslieferungen in die Herstellung von Braunkohle und welche in die von Steinkohle fließen (Aufteilung der Spalte).

Da hauptsächlich Energiesektoren gesplittet werden, bietet es sich an Daten der Energieträgerrechnung zur Berechnung der Verhältnisse heranzuziehen. Diese gibt für jeden Produktionsbereich an, welche Energieträger verwendet werden und liefert damit die Daten zur Aufteilung der Zeilen. Jedoch enthält die Energieträgerrechnung nur Daten in physischen Einheiten, hier TJ, während die aufzuteilende Vorleistungsmatrix in monetären Einheiten erfasst ist. Die Daten der Energieträgerrechnung müssen folglich zunächst mit Hilfe absoluter Preise in monetäre Einheiten umgerechnet werden. Als absolute Preise werden Angaben aus der Probas-Datenbank<sup>11</sup> verwendet und mit eigenen Schätzungen ergänzt. Da lediglich das Preisverhältnis der in einem Ausgangssektor enthaltenen Energieträger zueinander von Bedeutung ist, um die Wertverhältnisse aus den Verbrauchsverhältnissen in TJ zu berechnen, kann hier vereinfachend von gleichen Lieferpreisen für alle Produktionsbereiche ausgegangen werden.

Zur Aufteilung der Spalten, also der in den aufgeteilten Sektoren verwendeten Vorleistungen, gehen aus der Energieträgerrechnung nur Daten hervor, sofern es sich bei den Vorleistungen um Energieträger handelt. Für andere Vorleistungsgüter wird daher angenommen, dass diese sich entsprechend der Wertschöpfungsanteile der neuen Sektoren an dem alten Sektor aufteilen. Entsprechend wird hier von einer homogenen Inputstruktur ausgegangen, d. h. die Inputkoeffizienten (bezogen auf die Wertschöpfung) für Nicht-Energieträger sind in allen neuen Sektoren iden-

---

<sup>11</sup>Unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php?> stellen das Umweltbundesamt und das Öko-Institut im Rahmen des gleichnamigen Vorhabens „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente“ zur Verfügung, worin zahlreiche öffentlich verfügbare Datenquellen zu Lebenszyklusanalysen integriert werden.

tisch.<sup>12</sup> Neben den Energiesektoren wird außerdem für den Bereich der Eisen und Stahl-Verarbeitung eine weitere Unterteilung vorgenommen, um hier eine bessere Übereinstimmung der Abgrenzung mit dem Sektor Stahl im Industriemodell zu erreichen. Da die Energieträgerrechnung einige der Dienstleistungssektoren weniger genau ausweist als die IO-Tabelle, müssen diese zusammengefasst werden. Eine Gegenüberstellung der verwendeten 65 Produktionsbereiche zu den ursprünglichen 72 Produktionsbereichen findet sich in Tabelle II.10.1 im Anhang.

Auf die Problematik der in der Realität nicht homogenen Güterbündel wird insofern eingegangen, als im Modell durchgehend mit produktionsbereichsspezifischen Brennstoffpreisen gerechnet wird, die diese Unterschiede in den Güterbündeln abfangen und die aus einer Division der monetären Vorleistungsströme durch die entsprechenden Energiebedarfe aus der Energieträgerrechnung hervorgehen.

Als Ausgangstabelle wird die Tabelle für das Jahr 2000 verwendet. Die verwendete Tabelle in vereinfachter Form ist in Abbildung II.3.2 dargestellt.

### **Umrechnung ergänzender Daten außerhalb der IO-Tabelle**

Neben den Daten aus der IO-Tabelle sind weitere Daten zur Beschreibung der Produktionsbereiche, wie das Bruttoanlagevermögen und die Bruttoanlageinvestitionen, für die Modellierung notwendig. Diese Daten werden für ganze Betriebe erhoben und können nur schwierig unterschiedlichen fachlichen Betriebsteilen zugeordnet werden, wie dies für eine funktionelle Sektoreinteilung nötig wäre. Daher liegen Informationen zu diesen Größen nur in der Einteilung der Wirtschaftszweige, nicht aber für Produktionsbereiche vor. Für die weitere Modellierung wird daher angenommen, dass die Aufteilung dieser Größen mit der Aufteilung der in einem Wirtschaftszweig produzierten Güter auf die Produktionsbereiche übereinstimmt. Diese Aufteilung der Güter kann der Aufkommenstabelle<sup>13</sup> entnommen werden. Die Werte aus der Aufkommens-

---

<sup>12</sup>Dieses Vorgehen folgt einer Veröffentlichung des Statistischen Bundesamtes zur Aufstellung einer hybriden IO-Tabelle (Mayer (2007)).

<sup>13</sup>Die Aufkommenstabelle ist Teil des Veröffentlichungsprogramms des Statistischen Bundesamtes im Rahmen der Input-Output-Rechnung.

		Produktionsbereiche					Endnachfragebereiche			
		1	2	3	...	65	1	2	3	4
Prod. bereiche	1	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	...	$a_{1,65}$	$kp_1$	$ks_1$	$inv_1$	$ex_1$
	2	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	...	$a_{2,65}$	$kp_2$	$ks_2$	$inv_2$	$ex_2$
	3	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	...	$a_{3,65}$	$kp_3$	$ks_3$	$inv_3$	$ex_3$
	.	.	.	.		.	.	.		.
	.	.	.	.		.	.	.		.
	.	.	.	.		.	.	.		.
Primär- aufwands- bereiche	65	$a_{65,1}$	$a_{65,2}$	$a_{65,3}$	...	$a_{65,65}$	$kp_{65}$	$ks_{65}$	$inv_{65}$	$ex_{65}$
		$gs_1$	$gs_2$	$gs_3$	...	$gs_{65}$				
	1	$ae_1$	$ae_2$	$ae_3$	...	$ae_{65}$				
	2	$pa_1$	$pa_2$	$pa_3$	...	$pa_{65}$				
	3	$ab_1$	$ab_2$	$ab_3$	...	$ab_{65}$				
	4	$nb_1$	$nb_2$	$nb_3$	...	$nb_{65}$				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_{65}$				
		$im_1$	$im_2$	$im_3$	...	$im_{65}$				
		$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	...	$\chi_{65}$				

Abb. II.3.2.: Schematische Darstellung der verwendeten IO-Tabelle

tabelle werden dazu in die Verflechtungsmatrix  $\sigma^{WZ}$  zur Umrechnung von Wirtschaftszweigen nach Produktionsbereichen übernommen.

Die Umrechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$Variable_i^{PB} = \sigma_i^{WZ} \cdot Variable^{WZ}, \quad [II.3.11]$$

wobei  $Variable_i^{PB}$  den Wert einer bestimmten Variablen für den Produktionsbereich  $i$  angibt, während  $Variable^{WZ}$  den Vektor mit den Werten derselben Variable für die verschiedenen Wirtschaftszweige darstellt.

### Definition der Matrizen

Die im ersten Quadranten der IO-Tabelle enthaltenen Vorleistungsströme  $a_{ij}$  bilden die *Vorleistungsmatrix*  $A$  und sind absolute Ströme in Werteinheiten EUR. Die Koeffizientenmatrix, die durch Division aller Elemente von  $A$  durch den jeweiligen Produktionswert berechnet wird (Gleichung II.3.12), soll im Folgenden als

Matrix der *wirtschaftlichen Koeffizienten*  $B$  bezeichnet werden, da sie die Kostenstruktur eines Produktionsbereiches wiedergibt und in Werteinheiten [EUR/EUR] notiert wird. Diese Matrix  $B$  gibt die Kostenstruktur für Produkte wieder, die im Inland hergestellt werden. Jedoch kann sie, da Importe nicht berücksichtigt werden, nicht zur Berechnung der gesamten Nachfrage herangezogen werden. Daher wird im Folgenden unterschieden zwischen  $B$  und  $BETA$ , deren Elemente wie folgt berechnet werden.

$$b_{ij} = a_{ij}/x_j \quad [\text{II.3.12}]$$

$$\beta_{ij} = a_{ij}/\chi_j \quad [\text{II.3.13}]$$

Im Gegensatz dazu soll weiterhin eine *Matrix der technischen Koeffizienten*  $C$  in physischen Einheiten berechnet werden, die das Bindeglied zu dem ausschließlich in physischen Einheiten rechnenden Simulationsmodell darstellt. Hierzu wird die gesamte Vorleistungsmatrix  $A$  elementweise durch die *Preismatrix*  $P$  dividiert, um die Vorleistungsströme in physischen Einheiten zu berechnen:

$$a_{ij}^{\text{physisch}} = a_{ij}/P_{ij} \quad [\text{II.3.14}]$$

Die Lieferungen der Energiebereiche werden in TJ angegeben. Die Preise der Energieträger werden, wie oben erwähnt, durch einen Vergleich der Lieferströme der Energieträgerrechnung und der Vorleistungsströme der IO-Tabelle berechnet und sind produktionsbereichsspezifisch, um den Unterschieden in den gelieferten Güterbündeln Rechnung zu tragen. Die physischen Einheiten der übrigen Sektoren werden so gewählt, dass eine Einheit im Jahr 2000 genau 1 EUR kostet; dies führt letztlich dazu, dass für das Jahr 2000 die physischen Ströme  $a_{ij}^{\text{physisch}}$  dieser Sektoren vom Betrag her identisch sind mit den monetären Größen  $a_{ij}$ . Auch die Produktionswerte werden durch eine Bewertung mit den entsprechenden Preisen in physische Einheiten umgerechnet. Dazu werden die Diagonalelemente der Preismatrix verwendet:

$$z_j = x_j/P_{jj} \quad [\text{II.3.15}]$$

$$\zeta_j = \chi_j/P_{jj} \quad [\text{II.3.16}]$$

Schließlich ergibt sich die Matrix der technischen Koeffizienten  $C$  aus:

$$c_{ij} = a_{ij}^{\text{physisch}}/z_j \quad [\text{II.3.17}]$$

$$\gamma_{ij} = a_{ij}^{\text{physisch}}/\zeta_j \quad [\text{II.3.18}]$$

Auch hier werden zwei Matrizen definiert, um zum einen die technischen Koeffizienten der inländischen Produktion  $C$  darzustellen, die im Industriemodell verwendet und fortgeschrieben werden, und zum anderen eine Matrix  $\Gamma$ , in der die Koeffizienten auf das Gesamte Aufkommen  $\chi$  bezogen sind.

Im weiteren Verlauf werden auch Koeffizientenmatrizen aus den Angaben im dritten Quadranten der IO-Tabelle, der neben den Primäraufwandsbereichen die Gütersteuern und Importe ausweist, gebildet. Die Elemente des dritten Quadranten sollen dazu als Matrix  $\hat{A}$  bezeichnet werden. Die zugehörigen Koeffizientenmatrizen werden analog zum Vorgehen für den 1. Quadranten berechnet und in der Bezeichnung mit einem Dach gekennzeichnet. Auch hier werden inländische ( $\hat{B}$  und  $\hat{C}$ ) und Gesamt-Matrizen ( $\widehat{BETA}$  und  $\hat{\Gamma}$ ) unterschieden.

### II.3.2.2. Teilendogenisiertes Mengenmodell

Das Mengenmodell berechnet, wie in Abschnitt II.3.1.2 beschrieben, die Vorleistungsnachfrage ausgehend von der Endnachfrage. In einem teilendogenisierten Modell werden zumindest Teile der Endfrage in Abhängigkeit von der Gesamtnachfrage berechnet. Im vorliegenden Modell werden die Endnachfragekomponenten *Konsum der privaten Haushalte* und *Investitionen* endogen bestimmt.

## Endnachfrage

Zunächst wird die Berechnung der verschiedenen Komponenten der Endnachfrage beschrieben. Hierbei steht der Index  $t$  für die Periode, in der eine Variable berechnet wird. Die Endnachfrage besteht aus folgenden Komponenten.

### 1. Privater Konsum

Aus dem geschätzten Produktionswert können über die Koeffizientenmatrix  $B$  die Größen Arbeitsentgelte und Nettobetriebsüberschuss berechnet werden. Diese werden aufsummiert zur Berechnung des verfügbaren Einkommens der privaten Haushalte herangezogen, woraus der Gesamtkonsum  $KP_t$  zu Anschaffungspreisen abgeleitet wird. Dabei werden die Nettobetriebsüberschüsse als Kapitaleinkünfte gewertet, Transferleistungen und Sparanteile werden analog der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung einbezogen.

Das Konsummodell selbst basiert auf einem linear-expenditure-System<sup>14</sup>. Der Gesamtkonsum  $KP_t$  wird darin auf die verschiedenen Verwendungszwecke  $v$  aufgeteilt, wobei

$$KP_t = \sum_v kp_{v,t}^{VZ} \quad [\text{II.3.19}]$$

gilt und der Index  $VZ$  auf die Einteilung in Verwendungszwecke im Gegensatz zur Einteilung nach den Gütern der Produktionsbereiche  $PB$  hinweist. Die Verwendungszwecke entsprechen dabei der COICOP-Klassifikation.<sup>15</sup> Jedem dieser Verwendungszwecke ist ein Mindestkonsum  $kp_v^{VZ,min}$  zugeordnet, der die Grundversorgung der Konsumenten darstellt. Bis zu diesem Minimum ist die Nachfrage vollkommen unelastisch. Die darüber hinausgehende Nachfrage  $kp_v^{VZ,zusatz}$  wird über Nutzen-Kurven ermittelt. Diese Nutzen-Kurven werden aufgrund historischer Daten geschätzt. Die

<sup>14</sup>Eine Beschreibung des Ansatzes des linear-expenditure-system findet sich u. a. in Pollak und Wales (1969).

<sup>15</sup>Classification of Individual Consumption by Purpose.

Nachfrage ist damit abhängig vom verfügbaren Einkommen und den Preisverhältnissen zwischen den Warenkörben der Verwendungszwecke. Die Nachfrage nach Verwendungszweck 4: *Wohnen* kann unter Einbindung des Wohngebäudemodells genauer untergliedert und dort in Abhängigkeit von Nutzerverhalten, politischen Instrumenten und anderen Einflussgrößen simuliert werden. Die Preise gehen dabei nominal als Anschaffungspreise ein.

$$kp_{v,t}^{VZ} = kp_{v,t}^{VZ,min} + kp_{v,t}^{VZ,zusatz} \quad [\text{II.3.20}]$$

Die Umrechnung der Konsumnachfrage nach Verwendungszwecken  $kp_{v,t}^{VZ}$  in Konsumnachfrage nach Güterklassen  $kp_{i,t}^{PB,ap}$  erfolgt mit Hilfe einer konstanten Konsumverflechtungstabelle  $\sigma^{VZ}$ , die aus der Input-Output-Rechnung des Jahres 2000 entnommen wird. Diese gibt spaltenweise die Anteile der verschiedenen Gütergruppen an einem Verwendungszweck  $v$  wieder.

$$kp_{i,t}^{PB,ap} = \sum_v (\sigma_{i,v}^{VZ} \cdot kp_{v,t}^{VZ}) \quad [\text{II.3.21}]$$

Die Konsumnachfrage nach Güterklassen ist dabei zunächst noch zu Anschaffungspreisen bewertet, was durch den Index  $ap$  dargestellt ist. Um auf die Konsumnachfrage zu Herstellungspreisen  $kp_{i,t}^{PB,hp}$  zu kommen, werden Handels- und Transportdienstleistungen sowie Gütersteuern abgezogen.

## 2. Staatlicher Konsum

Der staatliche Konsum  $ks_{i,t}$  umfasst zusätzlich die Konsumausgaben privater Organisationen ohne Erwerbszweck und wird exogen vorgegeben.

## 3. Bruttoanlageinvestitionen

Um die Nachfrage nach Investitionsgütern zu modellieren, werden zuerst die Investitionen der einzelnen Produktionsbereiche  $bai_{j,t}$  ermittelt. Dabei wird zunächst nicht zwischen Ausrüstungs- und Bauinvestitionen

unterschieden. Berechnet werden die Bruttoinvestitionen, die sich aus Reinvestitionen zur Kapitalerhaltung in Höhe der Abschreibungen und den Investitionen zur Kapazitätsanpassung zusammensetzen.

In Abhängigkeit von dem für die laufende Periode prognostizierten Produktionswert  $\tilde{x}_{j,t}$  fallen die Investitionen geringer oder höher als die Abschreibungen aus. Dabei wird eine multiplikative Verknüpfung der Abschreibungen  $abs_j$  mit der erwarteten Produktionssteigerung gewählt:

$$bai_{j,t} = abs_{j,t-d} \cdot \frac{\tilde{x}_{j,t}}{x_{j,t-1}} \quad [\text{II.3.22}]$$

Wird eine höhere Produktion als im vorangegangenen Jahr erwartet, so übersteigen die Bruttoinvestitionen die Abschreibungen, was einem Kapazitätszubau entspricht. Die Variable  $d$  hat dabei für  $d > 1$  eine dämpfende Wirkung, da nicht die Abschreibungen des Vorjahres, sondern aus weiter zurückliegenden Perioden verwendet werden. Dadurch kann ein übermäßiges Anwachsen des Kapitalstocks und ein Aufschaukeln der Investitionen verhindert werden.

Der Kapitalstock eines Produktionsbereichs, dargestellt durch das Bruttoanlagevermögen  $bav_j$ , wird periodisch fortgeschrieben durch Addition der Bruttoinvestitionen und Subtraktion der Abschreibungen.

$$bav_{j,t} = bav_{j,t-1} + bai_{j,t} - abs_{j,t} \quad [\text{II.3.23}]$$

Da sich die Abschreibungen wiederum aus einer Division des Bruttoanlagevermögens durch die durchschnittliche Nutzungsdauer  $nd_j$  der Anlagen berechnen

$$abs_{j,t} = bav_{j,t-1} / nd_j, \quad [\text{II.3.24}]$$

kommt es zu einer positiven Rückkopplung bei entsprechenden Produktionserwartungen. Der Dämpfungsparameter  $d$  wird so gewählt, dass

ein Aufschaukeln der Gesamtwirtschaft verhindert wird. Die gewählte Abbildung liefert damit eine stabile Schätzung der getätigten Investitionen und ist somit im Rahmen einer vergleichenden Szenarioanalyse zielführend, obwohl es sich dabei um eine stark vereinfachte Abbildung handelt.

Um aus den Bruttoanlageinvestitionen  $bai_{j,t}$  der Produktionsbereiche die Endnachfrage nach Investitionsgütern  $inv_{i,t}$  zu berechnen, werden die Investitionsausgaben der Produktionsbereiche zunächst über eine konstante Quote  $qausr_j$  in Ausrüstungs- und Bauinvestitionen geteilt.

$$bai_{j,t}^{ausr} = bai_{j,t} \cdot qausr_j \quad [\text{II.3.25}]$$

$$bai_{j,t}^{bau} = bai_{j,t} \cdot (1 - qausr_j) \quad [\text{II.3.26}]$$

Die Verteilung der Investitionsausgaben  $bai_{j,t}^{ausr}$  und  $bai_{j,t}^{bau}$  auf die Güterklassen wird anhand zweier konstanter Verteilungsvektoren  $\sigma^{bai}$  vorgenommen. Mangels Daten muss angenommen werden, dass die Verteilung für jeden Produktionsbereich gleich ist. Der Verteilungsvektor gibt an, welcher Anteil der Investitionsausgaben auf eine bestimmte Gütergruppe  $i$  entfällt und ist der IOT des Jahres 2000 entnommen.

$$\begin{aligned} inv_{i,t} = & \sum_j (bai_{j,t}^{ausr}) \cdot \sigma_i^{bai,ausr} \\ & + \sum_j (bai_{j,t}^{bau}) \cdot \sigma_i^{bai,bau} \end{aligned} \quad [\text{II.3.27}]$$

Die im Simulationsmodell berechneten Investitionsausgaben für Minderungsmaßnahmen und Kapazitätsausbau der Sektoren werden als zusätzliche Investitionsnachfrage nach Gütern des Produktionsbereichs 33: *Herstellung von Maschinen* gewertet, denn dort ist die Unterklasse *Herstellung von Apparaten zum Filtrieren oder Reinigen von Luft oder anderen Gasen, einschließlich Katalysatoren für Kraftfahrzeuge* zu finden.

#### 4. Exporte

Die Exporte  $ex_{i,t}$  werden exogen vorgegeben.

Die einzelnen Komponenten der Endnachfrage werden für jedes Gut aufaddiert und gehen als Endnachfragevektor  $y$  in das Mengenmodell ein.

$$y_{i,t} = kp_{i,t}^{PB, hp} + ks_{i,t} + inv_{i,t} + ex_{i,t} \quad [\text{II.3.28}]$$

### Berechnung der Vorleistungsnachfrage über das Mengenmodell

Im Mengenmodell wird ausgehend von der Endnachfrage  $y$  über die Matrix der Vorleistungsverflechtungen  $A$  und die daraus abgeleitete Koeffizientenmatrix  $BETA$  die Gesamtnachfrage  $\chi$  berechnet, die zugleich dem Gesamten Aufkommen entspricht.<sup>16</sup>

$$\chi_t = (I - BETA_t)^{-1} \cdot y_t \quad [\text{II.3.29}]$$

Das Gesamte Aufkommen ist definiert als Aufkommen aus inländischer Produktion  $x$ , das in Werteinheiten angegeben den Produktionswerten der Produktionsbereiche entspricht, zuzüglich der Importe  $im$  der entsprechenden Güter.

$$\chi_{j,t} = x_{j,t} + im_{j,t} \quad [\text{II.3.30}]$$

Die Ableitung des Produktionswertes  $x$  wird hier jedoch durch eine multiplikative Verknüpfung erreicht, wozu zunächst der Importanteil  $qimp$  in EUR/EUR wie folgt definiert wird:

$$qimp_{j,t} = \frac{im_{j,t}}{\chi_{j,t}} \quad [\text{II.3.31}]$$

Dieser Importanteil wird im Rahmen der Aktualisierung der Technologiematrix fortgeschrieben, wie später (Abschnitt II.3.2.3) noch gezeigt wird. Damit ergibt sich der Produktionswert eines Produktionsbereiches  $x_j$  zu

$$x_{j,t} = \chi_{j,t} \cdot (1 - qimp_{j,t}). \quad [\text{II.3.32}]$$

<sup>16</sup>Zur Herleitung der Formel siehe Abschnitt II.3.1.2.

Aus dem Produktionswert  $x$  zu Herstellungspreisen und dem entsprechenden Preisindex  $ip$  wird ein Produktionsindex  $ix$  berechnet, der angibt, wie sich die nachgefragte Menge an Gütern in physischen Einheiten ändert.

$$ix_{j,t} = ix_{j,t-1} \cdot \frac{x_{j,t} \cdot ip_{j,t-1}}{x_{j,t-1} \cdot ip_{j,t}} \quad [\text{II.3.33}]$$

Dieser Produktionsindex ist eine wesentliche Eingangsgröße für das Industriemodell.

### II.3.2.3. Dynamisierung des Modells

Die Dynamik der wirtschaftlichen Entwicklung wird in dem beschriebenen Modell durch die Änderung der technischen Koeffizienten erreicht. Diese spiegeln den technischen Fortschritt in der Volkswirtschaft wider, der sich im Einsatz neuer Technologie sowie der Steigerung der Produktivität zeigt. Einerseits wird die Faktorproduktivität der Primärfaktoren Arbeit und Kapital erhöht, wobei diese exogen vorgegeben wird. Andererseits findet eine Anpassung der technischen Koeffizienten der Vorleistungen entsprechend der Simulation der technischen Entwicklung aus dem Industriemodell statt. Als weitere Effekte gehen Auswirkungen politischer Instrumente über die Größen Gütersteuern und Produktionsabgaben in das Modell ein. Preisänderungen auf dem Weltmarkt werden ebenfalls berücksichtigt. Die Anpassungen werden an der Matrix der technischen Koeffizienten  $C$  bzw.  $\hat{C}$  vorgenommen, um die Ergebnisse aus dem Industriemodell ohne Umrechnung verwenden zu können.

Die verschiedenen Anpassungen der Koeffizienten sowohl für die Vorleistungen (Matrix  $C$ ) als auch für die Primärfaktoren (Matrix  $\hat{C}$ ) führen zu Inkonsistenzen in der IO-Tabelle. Daher wird ein Preismodell der erneuten Verwendung des Mengenmodells vorgeschoben. Das Preismodell berechnet Preisänderungen, die die Inkonsistenzen im System ausgleichen und die Umrechnung der neuen technischen Matrix  $C$  in eine konsistente Matrix wirtschaftlicher Koeffizienten  $B$  ermöglicht. Zugleich werden auf diese Weise Preisimpulse aus den exogenen Vorgaben des Weltmarkts in das Modell aufgenommen.

Zunächst wird beschrieben, wie die verschiedenen Einflüsse sich in Änderungen der Koeffizienten niederschlagen. Im Anschluss wird die Ausgestaltung des Preismodells und Neuberechnung der im Mengenmodell verwendeten Matrix der wirtschaftlichen Koeffizienten erläutert.

### Anpassung der technischen Koeffizienten

Die Anpassungen der Primärfaktoren werden in den meisten Fällen für alle Sektoren vorgenommen, während Effekte auf die Vorleistungskoeffizienten nur für die vom Industriemodell abgedeckten Sektoren betrachtet werden.

Da das Industriemodell nur die inländische Produktion umfasst, kann zunächst nur die inländische Matrix  $C$  bzw.  $\hat{C}$  aktualisiert werden.

### Gütersteuern

Der Koeffizient  $\hat{c}_{gs,j}$  beschreibt den Gesamtbetrag der mit dem Kauf von Gütern einhergehenden Gütersteuern und muss explizit ausgewiesen werden, da die Vorleistungen zu Herstellpreisen bewertet sind. Die Änderung der Gütersteuersätze auf Energieträger stellt eines der zu untersuchenden politischen Instrumente dar und ist somit exogen. Die Gütersteuern  $GS_{j,t}$ , die ein Produktionsbereich  $j$  in Periode  $t$  zu zahlen hat, werden abhängig von den Vorleistungskoeffizienten sowie der Steuersätze der Güter berechnet. Hierzu wird Gleichung II.2.21 aus dem Industriemodell, entsprechend auf Produktionsbereiche übertragen, verwendet:

$$GS_{j,t} = \sum_i c_{i,j,t} \cdot GSS^{i,j,t}, \quad [\text{II.3.34}]$$

wobei  $GSS^{i,j,t}$  die produktionsbereichsspezifischen Gütersteuersätze als Mengensteuer auf das Produkt  $i$  in EUR pro physischer Einheit in der Periode  $t$  angeben.

Wie auch in der Kostenrechnung im Industriemodell<sup>17</sup> werden nicht die absoluten Werte sondern nur deren Änderung weitergegeben. Analog zu

<sup>17</sup>Vgl. Abschnitt II.2.2.1.

Gleichung II.2.22 wird die Änderung des absoluten Betrages zu zahlender Gütersteuern  $GS$  auf den Koeffizienten übertragen:

$$\hat{c}_{gs,j,t} = \hat{c}_{gs,j,t-1} \cdot \frac{GS_{j,t}}{GS_{j,t-1}} \quad [\text{II.3.35}]$$

Das politische Instrument der Gütersteuern auf Energieträger wirkt sich somit auf alle Produktionsbereiche aus.

### Arbeitsentgelte

Eine Änderung der Arbeitsentgelte kann auf einer Veränderung der Arbeitsproduktivität gemessen in Personenjahren pro Einheit Output oder auf einer Änderung der Lohnsätze in EUR pro Personenjahr beruhen. Beide Größen werden exogen vorgegeben und daher an dieser Stelle nicht getrennt ausgewiesen sondern in der Variable  $\Delta sae_{j,t}$  als Änderung der spezifischen Arbeitsentgelte des Produktionsbereichs  $j$  zusammengefasst. Der zu ändernde Koeffizient für Arbeitsentgelte  $\hat{c}_{ae,j}$  im Produktionsbereich  $j$  wird entsprechend in EUR pro Einheit Output notiert und berücksichtigt beide Einflussgrößen. Seine Änderung ergibt sich wie folgt:

$$\hat{c}_{ae,j,t+1} = \hat{c}_{ae,j,t} \cdot \Delta sae_{j,t} \quad [\text{II.3.36}]$$

### Produktionsabgaben und -subventionen

Produktionsabgaben sind Abgaben, die im Gegensatz zu Gütersteuern nicht beim Kauf der Güter erhoben werden, sondern direkt mit der Produktion einhergehen. Relevanter sind die Produktionssubventionen, wie sie beispielsweise in der Agrarwirtschaft und im Bergbau bestehen. Obwohl u. a. die Subvention des Kohleabbaus durch verzerrte Preissignale auch Auswirkungen auf umweltpolitische Fragestellungen haben kann, werden Produktionsabgaben und -subventionen hier nicht näher betrachtet und in Folge dessen die entsprechenden Koeffizienten konstant gehalten.

Als neue Kostenkategorie treten mit dem europäischen Emissionshandelssystem Kosten für Emissionszertifikate auf, welche nicht explizit in der IO-Tabelle ausgewiesen sind. Um die Struktur der Tabelle nicht abändern zu müssen, werden diese im hier vorgestellten Ansatz den Produktionsabgaben zugeordnet. Kosten aus dem Handel mit Emissionsrechten werden nur für die im Industriemodell betrachteten Sektoren ausgewiesen und für diese dort berechnet.

### **Abschreibungen**

Für die im Industriemodell genauer untersuchten Produktionsbereiche ergeben sich die Änderungen der Abschreibungen aus den, mit den dort simulierten Änderungen der Produktionsverfahren einhergehenden, investitionsabhängigen Ausgaben. Diese werden einerseits, wie in Abschnitt II.3.2.2 beschrieben, den Bruttoanlageinvestitionen in Maschinen zugerechnet. Andererseits ändern sich durch solche Investitionen die Abschreibungen eines Werkes und somit auch die durchschnittlichen Abschreibungen im Sektor, die im IOM dem Koeffizienten  $\hat{c}_{ab,j}$  entsprechen.

### **Nettobetriebsüberschuss**

Die Größe Nettobetriebsüberschuss enthält als Gewinne interpretierbare jedoch zum Output weitestgehend proportionale Kostenarten, wie etwa Unternehmerlöhne und kalkulatorische Zinsen. Diese Gewinne gehen als Gewinnmarge in die Stückkosten ein, wobei dieser Gewinnaufschlag als konstant angenommen wird. Ausnahmen bilden hier die beiden Produktionsbereiche 3: *Forstwirtschaft* und 41: *Recycling*. Für diese beiden Produktionsbereiche bzw. ihre Güter ist eine Bestimmung des Preises allein aufgrund geänderter Produktionskosten nicht ausreichend. Zum einen ist der Preis von Sekundärrohstoffen im Industriemodell entscheidungsrelevant und der Holzpreis stellt im Teilmodell Wohngebäude bei der Energieträgerwahl ein relevantes Kriterium dar.<sup>18</sup> Zum anderen ist die Verfügbarkeit dieser beiden Ressourcen nicht unbeschränkt, was einer

---

<sup>18</sup>Vgl. Teil III.

der Grundannahmen des IO-Ansatzes widerspricht. Daher wird der Preis der Güter aus diesen beiden Produktionsbereichen künstlich durch Erhöhung der Gewinnmarge in die Höhe getrieben. Die Erhöhung erfolgt in Abhängigkeit der nachgefragten Menge durch exogen vorgegebene lineare Angebotsfunktionen.

### Vorleistungen

Die Änderungen der Vorleistungskoeffizienten, also der Koeffizienten der Technologie-Matrix  $C$ , gehen aus dem Industriemodell hervor und betreffen folglich nur die dort simulierten Sektoren.

Im Industriemodell, das in Kapitel II.2 beschrieben wird, wird auf disaggregierter Ebene für jedes abgebildete Werk ein eigenes Produktionsverfahren simuliert. Dieses wird in Form von Inputkoeffizienten für jedes Gut dargestellt und ändert sich durch Investitionen in Minderungsmaßnahmen, neue Anlagen oder bei Marktein- bzw. -austritt eines Werkes.

Um die Informationen über die Umstellung der Produktion auf neue Verfahren an das IOM weiterzugeben, müssen die Inputkoeffizienten auf Sektorebene zusammengefasst werden. Dazu werden die Sektor-Inputkoeffizienten  $IK^s$  als gewichteter Durchschnitt der Werkskoeffizienten  $IK^w$  gebildet und stellen somit den Prozess-Mix auf Sektorebene dar. Als Gewichtung wird der Anteil eines Werkes an der Gesamtproduktion der vorangegangenen Periode  $t - 1$  verwendet. Die Produktion wird dabei als Aktivitätsrate  $AR^w$  des Werkes bzw.  $AR^s$  des Sektors bezeichnet.

$$IK^{s,t} = \sum_w (IK^{w,t} \cdot \frac{AR^{w,t-1}}{AR^{s,t-1}}) \quad [\text{II.3.37}]$$

Die Unterschiede in den Zeitindizes resultieren daraus, dass über die zu tätigen Investitionen zu Beginn der aktuellen Periode  $t$  entschieden wird, bevor die Produktionsanteile der Werke bekannt sind.

Stimmt ein Sektor  $s$  in seiner Abgrenzung vollständig mit dem zugehörigen Produktionsbereich  $j^*$  überein, so wäre definitionsgemäß eine Übereinstimmung der Koeffizienten in der Matrix  $C$  mit den Inputkoeffizienten des Sektors für jedes Gut  $i$  gegeben:

$$c_{i,j^*} = IK_i^s \quad [\text{II.3.38}]$$

Eine Aktualisierung der Matrix  $C$  wäre damit durch einfaches Austauschen der Koeffizienten möglich:

$$c_{i,j^*,t} = IK_i^{s,t} \quad [\text{II.3.39}]$$

Diese Formel muss jedoch in zweierlei Hinsicht angepasst werden.

1. Das Industriemodell betrachtet schwerpunktmäßig die zur Produktion der Güter eingesetzte Technologie und vernachlässigt dabei meist betriebliche Hilfs- und Nebenprozesse wie z. B. Handhabung und Verwaltung, die einen Verbrauch von nicht technologiespezifischen Inputfaktoren bedingen. Die IO-Tabelle hingegen weist z. B. auch aus, wie viel Getränke, Kleidung, Papier, Dienstleistungen etc. in der Stahl- oder Zementindustrie verwendet werden. Diese Hilfsgüter, die nicht in den eigentlich Produktionsprozess einfließen, werden im Industriemodell nicht betrachtet und ihr Verbrauch mit null angesetzt. Damit einher geht die Annahme, dass der Verbrauch dieser Hilfsgüter pro hergestellter Einheit des Produktes unverändert bleibt. Die Übereinstimmung aus Gleichung II.3.38 ist damit nicht mehr gegeben. Zur Aktualisierung der Koeffizienten in der Matrix wird daher die relative Änderung der Inputkoeffizienten im Industriemodell weitergegeben.

$$c_{i,j^*,t} = c_{i,j^*,t-1} \cdot \frac{IK_i^{s,t}}{IK_i^{s,t-1}} \quad [\text{II.3.40}]$$

Die Koeffizienten der Hilfsgüter bleiben entsprechend konstant.

2. Weiterhin stimmt die Abgrenzung der Sektoren und ihrer zugehörigen Produktionsbereiche in keinem der betrachteten Fälle vollständig überein. Die Produktionsbereiche umfassen dabei mehr Industriebetriebe als ein Sektor, so ist z. B. die Zementindustrie dem Produktionsbereich 27: *Herstellung von Keramik, Bearbeitung von Steinen und Erden* zugeordnet, dem auch die Kalkindustrie sowie die Weiterverarbeitung von Kalk und Zement angehören. Die Änderungen aus dem Sektor Zement beziehen sich daher nur auf einen Teil des Produktionsbereiches.

Die Koeffizienten des Produktionsbereiches werden daher aufgeteilt:

$$c_{i,j^*} = c_{i,j^*}^{Sektor} + c_{i,j^*}^{Rest} \quad [\text{II.3.41}]$$

$c_{i,j^*}^{Sektor}$  stellt dabei den Teil des gesamten an den Produktionsbereich gelieferten Güterstroms dar, der in die Produktion des Sektors einfließt, während unter  $c_{i,j^*}^{Rest}$  der restliche Güterstrom zusammengefasst ist. Die Berechnung der neuen Koeffizienten erfolgt nun wie folgt:

$$c_{i,j^*,t} = c_{i,j^*,t-1} \cdot \frac{c_{i,j^*,t}^{Sektor} + c_{i,j^*}^{Rest}}{c_{i,j^*,t-1}^{Sektor} + c_{i,j^*}^{Rest}}, \quad [\text{II.3.42}]$$

wobei  $c_{i,j^*,t}^{Sektor}$  wieder nach Gleichung II.3.40 berechnet wird:

$$c_{i,j^*,t}^{Sektor} = c_{i,j^*,t-1}^{Sektor} \cdot \frac{IK_i^{s,t}}{IK_i^{s,t-1}}$$

und  $c_{i,j^*}^{Rest}$  als im Zeitverlauf konstant angenommen wird.

## Preismodell

Zum Ausgleich der Änderungen der Koeffizienten ist eine Anpassung der Preise nötig. Nur so kann bei einer Rückrechnung in Wertströme (Matrix A) die Übereinstimmung von Zeilen- und Spaltensummen gewährleistet werden. Neben Änderungen in den Produktionsverfahren resultieren Preisänderungen aus Änderungen in den Kostensätzen für Primärinputfaktoren.

Die Matrix  $C$  enthält nur Informationen über Produktionsvorgänge innerhalb Deutschlands und kann daher auch nur Auskunft über Preisanpassungen der in Deutschland produzierten Güter geben. Um auch Preisänderungen importierter Güter in die Betrachtung einbeziehen zu können, muss die Matrix zunächst transformiert werden. Die Matrix  $C$  wird dazu für jeden Produktionsbereich  $j$  mit dem Anteil der im Inland produzierten Güter am Gesamten Aufkommen  $q_{inl,j}$  multipliziert:

$$\gamma_{i,j,t}^{gesamt} = c_{i,j,t} \cdot qinl_j \quad [\text{II.3.43}]$$

$$\hat{\gamma}_{l,j,t}^{gesamt} = \hat{c}_{l,j,t} \cdot qinl_j, \quad [\text{II.3.44}]$$

wobei  $l = \{gs, ae, pa, ab, nb\}$ . Der mengenmäßige Inlandsanteil  $qinl_j$  wird dabei als konstant angenommen. Die Importe werden als weiterer Primärinput behandelt und in der Matrix  $\hat{\Gamma}$  angegeben. Im Gegensatz zu den im Inland produzierten Gütern werden die Importe auch in der Matrix der technischen Koeffizienten in EUR verbucht. Damit ändert sich der entsprechende Koeffizient trotz der Annahme konstanter mengenmäßiger Produktionsanteile  $qinl_j$  aufgrund der Preisänderungen  $\Delta p^{ausland}$  auf dem Weltmarkt.

$$\hat{\gamma}_{im,j,t} = \hat{\gamma}_{im,j,t-1} \cdot \Delta p_{j,t}^{ausland} \quad [\text{II.3.45}]$$

Die Berechnung der Preisänderungen erfolgt über ein Preismodell wie in Abschnitt II.3.1.2 beschrieben. Dazu wird zunächst der Einsatz aller Primärfaktoren je Produktionsbereich entsprechend Gleichung II.3.9 aufaddiert, um die Wertschöpfung  $\omega$  je Einheit Output zu erhalten:

$$\omega_{j,t} = \sum_l \hat{\gamma}_{l,j,t}, \quad [\text{II.3.46}]$$

wobei nun  $l = \{gs, ae, pa, ab, nb, im\}$  auch die Importe umfasst. Die neuen Preise  $\pi_t$  werden über die Formel des Preismodells unter Verwendung der Transponierten der neuen Matrix  $\Gamma_t^T$  sowie dem Vektor der Wertschöpfungen  $\omega_t$  berechnet:

$$\pi_t = (I - \Gamma_t^T)^{-1} \cdot \omega_t \quad [\text{II.3.47}]$$

Das Preismodell geht von einer Homogenität der Inputpreise aus, d. h. der Preis eines Gutes ist unabhängig von dem Produktionsbereich, der es bezieht, derselbe. Diese Annahme wurde zur Abbildung der Unterschiede in den Güterbündeln

insbesondere der energiewirtschaftlichen Produktionsbereiche bereits aufgehoben. Somit können nicht die Preise selbst verwendet werden, sondern es muss eine Preisänderung  $\Delta\pi$  berechnet werden.

$$\Delta\pi_{i,t} = \frac{\pi_{i,t}}{\pi_{i,t-1}} \quad [\text{II.3.48}]$$

Diese Preisänderung  $\Delta\pi_{i,t}$  kann nun auf die Matrix der Preise  $P$  übertragen werden

$$P_{i,j,t} = P_{i,j,t-1} \cdot \Delta\pi_{i,t} \quad [\text{II.3.49}]$$

Die neue Matrix der wirtschaftlichen Koeffizienten  $B$  bzw.  $BETA$  wird dann durch eine Umrechnung der bereits gegebenen neuen  $C$ -Matrix mit den neuen Preisen  $P_t$  ermittelt. Die nächste Periode der Gesamtsimulation verwendet somit eine aktualisierte Preismatrix  $P$  und eine aktualisierte Kostenstrukturmatrix  $BETA$  zur Berechnung der Nachfrage, welche an das Industriemodell weitergegeben wird. Die wirtschaftliche Entwicklung berücksichtigt somit Produktivitätssteigerungen und Preissignale aus dem Ausland als exogene Einflüsse sowie endogen die technische Fortentwicklung der simulierten Sektoren.



## II.4. Implementierung und Datengrundlage der abgebildeten Sektoren

Das folgende Kapitel beschreibt die modelltechnische Umsetzung der drei betrachteten Sektoren *Zement, Eisen & Stahl* und *Energie* und die dazu verwendeten Daten. In Abschnitt II.4.1 werden zunächst allgemeine Daten und deren Quellen beschrieben, die in allen Sektoren Verwendung finden. Die Darstellung der Sektoren (Abschnitte II.4.2 bis II.4.4) beginnt jeweils mit einer Beschreibung der dort eingesetzten Prozesse und Verfahren sowie der dabei entstehenden Schadstoffemissionen. Daraus werden die zu modellierenden Referenzprozesse und Anlagen aufgrund ihrer Relevanz als Schadstoffquelle abgeleitet und definiert. Weiterhin werden relevante Emissionsminderungsmaßnahmen beschrieben und für den Einsatz im Modell ausgewählt. Neben sektorspezifischer Literatur dienen vor allem die BVT-Merkblätter<sup>1</sup> und die Arbeiten der Expert Group on Techno-Economic Issues (EGTEI)<sup>2</sup> als Datenquelle.

Bei der Berechnung der Emissionen wird den Empfehlungen der Handbücher zur Emissionsinventarerstellung, dem Emission Inventory Guidebook von CORINAIR (EEA (2009)) und den „Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“ des IPCC (2006) gefolgt und der dort als 2. Genauigkeitsstufe (Tier 2) beschriebene Ansatz durchgeführt.

---

<sup>1</sup>EIPPCB (2010a) und EIPPCB (2001).

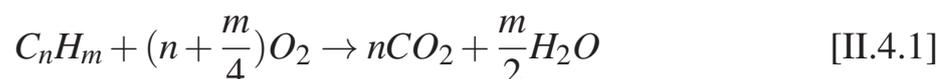
<sup>2</sup>EGTEI ist ein Expertengremium unter der UNECE/CLRTAP mit dem Ziel Informationen über Kosten von Emissionsminderungsmaßnahmen zusammenzutragen und in einer Datenbank als Modell-Input bereitzustellen, vgl. [http://www.citepa.org/forums/egtei/egtei\\_index.htm](http://www.citepa.org/forums/egtei/egtei_index.htm).

## II.4.1. Sektorübergreifende Prozesse und Daten

### II.4.1.1. Verbrennungsprozesse

Die Umwandlungsprozesse der hier modellierten Sektoren sind in hohem Maße mit Verbrennungsprozessen verbunden. Auch in anderen Industriezweigen spielen Verbrennungsprozesse eine bedeutende Rolle.

Die Entstehung von Emissionen wird durch Verbrennungsparameter, wie Flammenführung, Verbrennungstemperatur, Verweildauer, Luftüberschuss u. a. sowie durch die eingesetzten Brennstoffe beeinflusst.<sup>3</sup> Der Verbrennungsprozess stellt die Reaktion der im Brennstoff enthaltenen Kohlenwasserstoffe mit Sauerstoff zu Wasser und Kohlendioxid dar:



Bei vollständiger Verbrennung reagiert der Kohlenstoffanteil der Brennstoffe vollständig zu Kohlendioxid. Produkte unvollständiger Verbrennung sind folglich Kohlenwasserstoffe, die nicht vollständig oxidiert wurden. Dabei kann es sich bspw. um Alkohole, Aldehyde oder organische Säuren, sowie Kohlenmonoxid handeln. Zu unvollständiger Verbrennung kommt es vor allem, wenn nicht genügend Sauerstoff für die Reaktion zur Verfügung steht, weshalb der Luftüberschuss eine wichtige Größe für eine schadstoffarme Fahrweise von Verbrennungsprozessen darstellt. Da bei unvollständiger Verbrennung vielfach toxische Stoffe entstehen, ist eine vollständige Verbrennung durch geeignete Einstellung und Betriebsweise der Verbrennungsprozesse anzustreben.

Neben dem Kohlenstoffanteil, dem Wasserstoff und dem Sauerstoff enthalten Brennstoffe Schwefel in organischen oder mineralischen Verbindungen, Stickstoff sowie mineralische Bestandteile zu unterschiedlichen Anteilen. Diese beeinflussen maßgeblich die Emissionen an Schwefeldioxid, Stickoxiden und Partikeln (Feinstaub).

---

<sup>3</sup>Die Darstellung folgt dabei im Wesentlichen Baumbach (1993).

Der Schwefelanteil reagiert bei vollständiger Verbrennung zu Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ). In Abhängigkeit von Verbrennungstemperatur und den Eigenschaften der Asche kann der Schwefel aus den Brennstoffen auch in der Asche eingebunden werden, anstatt als  $\text{SO}_2$  mit den Abgasen emittiert zu werden. Die Emissionen an Schwefeldioxid aus Verbrennungsprozessen hängen damit wesentlich von den Schwefelgehalten der eingesetzten Brennstoffe ab.

$\text{NO}_x$ -Emissionen bestehen in erster Linie aus Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$ , erst im Anschluss an die Verbrennung entsteht das giftigere Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  bei ausreichend vorhandenem Sauerstoff in den Abgasen oder in der Atmosphäre. Für die Entstehung von Stickstoffoxiden sind im Wesentlichen drei Bildungsmechanismen von Bedeutung. Der Mechanismus der thermischen  $\text{NO}$ -Bildung setzt den Stickstoff der Verbrennungsluft bei hohen Temperaturen ab etwa  $1300^\circ\text{C}$  und ausreichendem Sauerstoffüberschuss zu  $\text{NO}$  um. Wesentliche Einflussfaktoren auf diesen Mechanismus stellen das Brennstoff/Luft-Verhältnis, die Temperatur in der Reaktionszone sowie die Verweilzeit der Gase dar. Bei sauerstoffarmer Verbrennung reagieren Brennstoff-Radikale (z. B.  $\text{CH}$ ) mit molekularem Stickstoff über Cyanverbindungen und elementarem Stickstoff zu  $\text{NO}$ . Dieser Mechanismus der prompten  $\text{NO}$ -Bildung setzt ab etwa  $1500^\circ\text{C}$  ein und spielt nur eine untergeordnete Rolle. Brennstoff- $\text{NO}$  entsteht über den dritten Mechanismus bereits bei niedrigeren Temperaturen ( $>1000^\circ\text{C}$ ) durch die Oxidation der im Brennstoff vorliegenden Amine ( $\text{R-NH}_2$ ), Amide ( $\text{R-CO-NH}_2$ ) und anderer Stickstoffverbindungen.

Die Bildung von prompten und Brennstoff- $\text{NO}$  ist nur wenig temperaturabhängig im Gegensatz zur thermischen  $\text{NO}$ -Bildung und wird von diesem Mechanismus meist überlagert. Daher führt ein niedriger Stickstoffgehalt der Brennstoffe nur bedingt zu einer Minderung der Emissionen. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen aus dem thermischen Bildungsmechanismus sind außerdem hinsichtlich ihrer Abhängigkeit vom Luftüberschuss gegenläufig zu den Produkten unvollständiger Verbrennung.

Neben den gasförmigen Emissionen werden auch Partikel emittiert, die teilweise lungengängig sind und daher ebenfalls zu den Luftschadstoffen zählen. Bei diesen Partikeln handelt es sich im Wesentlichen um Ruß, kondensierte Kohlenwasser-

stoffe, Ascheteilchen (z. B. Metalloxide) und unverbrannte Kohlenstoffpartikel. Die Entstehung dieser Stäube beim Verbrennungsprozess ist abhängig von den eingesetzten Brennstoffen und insbesondere deren Anteile an mineralischen Bestandteilen, weiterhin der Art und Weise der Brennstoffaufbereitung und ebenfalls von den Verbrennungsbedingungen.

#### **II.4.1.2. Möglichkeiten der Emissionsminderung**

Maßnahmen zur Vermeidung von Emissionen werden als primäre Maßnahmen bezeichnet. Solche Maßnahmen bestehen in der Umstellung auf emissionsärmere Prozesse oder einer Verbesserung des bestehenden Prozesses durch Anpassung der Prozessparameter.

Sekundäre Maßnahmen hingegen sind in der Regel dem eigentlichen Prozess nachgeschaltet und können somit auch für anderweitige Produktionsverfahren eingesetzt werden. Dazu werden die Schadstoffe durch chemische und physikalische Trennprozesse aus dem Abgas entfernt, bevor dieses an die Umgebung abgegeben wird. Im Folgenden werden die grundlegenden Verfahren zur Abgasreinigung vorgestellt, sektorspezifische Ausprägungen und Weiterentwicklungen werden in den jeweiligen Abschnitten beschrieben.

#### **Primäre Maßnahmen**

Eine Minderung der in Verbrennungsprozessen entstehenden Emissionen kann durch die Brennstoffwahl und -aufbereitung sowie durch die Gestaltung der Ofenanlage erreicht werden. Eine gleichmäßige Betriebsweise des Ofens trägt außerdem zur Minderung bei.

Eine Vermeidung der CO<sub>2</sub>-Emissionen kann nur durch den Einsatz nachwachsender oder sekundärer Brennstoffe erreicht werden. Auch die Verbrennung nicht-fossiler Brennstoffe setzt CO<sub>2</sub> frei, von einer Vermeidung kann nur in dem Sinne gesprochen werden, dass die mittelfristige CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz im Vergleich zur Verbrennung fossiler Brennstoffe geringer ausfällt. Dabei wird berücksichtigt, dass

nachwachsende Brennstoffe das freiwerdende CO<sub>2</sub> zuvor während ihrer Wachstumsphase aufgenommen haben bzw. dass Abfälle (Sekundärbrennstoffe) möglicherweise anderweitig ohne Nutzung der freiwerdenden Wärme verbrannt würden. Mit der Verbrennung geht außerdem eine Einsparung fossiler Energieträger einher.

Primäre Maßnahmen zur Minderung von NO<sub>x</sub> setzen vor allem am Luftüberschuss und der Verbrennungstemperatur an. Sogenannte Low-NO<sub>x</sub>-Brenner erreichen durch gestufte Verbrennung einen Rückgang der NO<sub>x</sub>-Emissionen ohne dabei die Freisetzung von Produkten unvollständiger Verbrennung zu riskieren. Dazu wird durch eine stufenweise Verbrennung zunächst in der heißen Hauptreaktionszone das Brennstoff/Luft-Verhältnis auf unter 1 abgesenkt um die NO<sub>x</sub>-Entstehung zu vermeiden. Die dabei übrig bleibenden Produkte unvollständiger Verbrennung werden in einer Ausbrennzone bei relativ niedriger Temperatur (>750°C) nachverbrannt. Die Stufung wird über eine stufenweise Luftzufuhr erreicht und kann durch eine weitergehende stufenweise Brennstoffzufuhr unterstützt werden. Das Minderungspotential primärer NO<sub>x</sub>-Maßnahmen liegt je nach Brennstoff bei 40-70% im Vergleich zu herkömmlichen Öfen.

Aufgrund der starken Abhängigkeit der SO<sub>2</sub>-Emissionen vom eingesetzten Brennstoff und den darin enthaltenen Schwefelverbindungen setzen primäre Maßnahmen zur Vermeidung von Schwefeloxiden an den Brennstoffen an. Neben der Umstellung des Prozesses auf andere Brennstoffe, z. B. von Kohle auf Gas, kann auch eine Entschwefelung der Brennstoffe durchgeführt werden. Die Absenkung des Schwefelgehalts bei flüssigen Brennstoffen hat in den vergangenen Jahren zu einem deutlichen Rückgang der Schwefelemissionen beigetragen.

## **Sekundäre Maßnahmen**

**Stickoxide NO<sub>x</sub>:** Zur Abscheidung von NO<sub>x</sub> aus Abgasen werden meist Reduktionsverfahren eingesetzt. Am bekanntesten sind dabei das Verfahren der *selektiven nicht-katalytischen Reduktion (SNCR)* und die *selektive katalytische Reduktion*.

tion (SCR). Die nicht-katalytische Reduktion läuft in einem Temperaturbereich zwischen 850 und 1000°C ab und erreicht eine Minderung von 30-80%. Als Reduktionsmittel werden Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) oder Harnstoff ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) verwendet, als Reaktionsprodukte entstehen  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Das Reduktionsmittel wird direkt im Feuerraum den Rauchgasen zugegeben. Der Temperaturbereich muss relativ genau eingehalten werden, denn bei niedrigeren Temperaturen kann es zum sog. Ammoniakschlupf kommen, bei dem Ammoniak nicht vollständig umgesetzt wird.

Durch den Einsatz eines Katalysators ist die Reduktion der Stickoxide auch bei niedrigeren Temperaturen möglich. Das SCR-Verfahren arbeitet bei Temperaturen zwischen 280 und 450°C je nach eingesetztem Katalysator. Als Katalysator werden meist Zeolithe aus Metalloxiden (wie z. B. Titanoxid, Aluminiumoxiden, Siliciumoxiden unter Zugabe von Vanadium-, Molybdän- oder Wolframoxiden) verwendet. Mit der selektiven katalytischen Reduktion lassen sich Minderungsgrade von 70 bis 90% erreichen. Wie bei der nicht-katalytischen Reduktion stellen auch hier die Temperatur, das Molverhältnis von  $\text{NH}_3$  zu  $\text{NO}$  und die Verweilzeit der Rauchgase in Kontakt mit dem Reduktionsmittel wichtige Einflussgrößen auf die Minderung dar.

Bei dem Aktivkoksverfahren werden die Rauchgase adsorbtiv an Aktivkoks gebunden. Durch Zugabe von Ammoniak wird  $\text{NO}_x$  wiederum katalytisch zu elementarem Stickstoff reduziert. Außer den Stickoxiden wird auch Schwefeldioxid adsorbiert und reagiert zu Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Durch thermische Desorption werden die gebundenen Schwefelverbindungen wieder ausgetrieben und der Aktivkoks kann erneut eingesetzt werden.

**Schwefeldioxid  $\text{SO}_2$ :** Zur Abscheidung von Schwefeldioxid werden im Wesentlichen drei Verfahrensarten unterschieden, die auf der chemischen Absorption des  $\text{SO}_2$  an erdalkalischen oder auch alkalischen Absorptionsmitteln beruhen. Meist wird Kalk ( $\text{CaO}$  oder  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) oder Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) verwendet, aber auch die entsprechenden Magnesiumverbindungen kommen zum Einsatz, z. B. beim Einsatz von Dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) als Ausgangsstoff.

Bei den Trockenverfahren werden trockene Additive zu den Rauchgasen gegeben. Die eingesetzten Zusatzstoffe werden in Abhängigkeit der Temperatur der Rauchgase gewählt. Die Zugabe kann an unterschiedlichen Stellen in der Prozessfolge erfolgen, z. B. durch Beimischung zu den Brennstoffen, Zugabe in den Feuerraum oder in die Abgasleitung. Die Reaktionsprodukte werden meist über den Staubfilter abgefangen.

Durch Hydrierung der Additive kann deren Reaktionsvermögen deutlich erhöht werden, was in den Halbtrocken-Verfahren ausgenutzt wird. Hierbei werden die Additive in Form von Suspensionen als Sprühnebel in die Rauchgase gesprüht. Als Rückstand entsteht u. a. Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), die Rückstände sind trocken und können über den Staubfilter abgeschiedenen werden.

Letztlich können auch nasse Verfahren eingesetzt werden. Die Rauchgase werden dabei in Gas-Flüssigkeit-Kontaktapparaten wie Waschtürmen mit der Suspension oder Lösung der Sorptionsmittel in Kontakt gebracht. Als Rückstand kann REA-Gips aus dem Abwasser abgetrennt werden, der in der Bauindustrie Verwendung findet.

Als weitere nasse Entschwefelungsverfahren können z. B. noch das Walther-Verfahren und das Wellman-Lord-Verfahren genannt werden.

**Feinstaub:** Die einfachsten Ausführungen zur Staubabscheidung stellen die Massenkraftentstauber dar. Massenkraftentstauber bedienen sich der Trägheit der Partikel, um diese von dem Trägergas zu trennen. Durch die einfache Konstruktionsweise sind Massenkraftabscheider recht günstig, ihre Abscheideleistung ist jedoch eher gering und sie eignen sich nicht zur Abscheidung von Feinstaub, da feinere Partikel nicht träge genug sind. Bei der Nassentstaubung wird die Masse der Partikel durch die Bindung an Tropfen einer Waschflüssigkeit erhöht, um die Massenkraftentstaubung zu verbessern. Dabei wird jedoch die Verunreinigung vom Abgas auf die Waschflüssigkeit verlagert, weshalb Verfahren dieser Art im Wesentlichen nur zur Abscheidung brennbarer Stäube verwendet werden.

Hohe Abscheideraten zwischen 95 und 99% auch für Feinstaub lassen sich mit Elektroabscheidern erreichen. Im Elektroabscheider werden die im Abgas mitge-

fürten Partikel durch ein elektrisches Feld aufgeladen und an Niederschlagsselektroden abgeschieden. Ähnliche Abscheideraten weisen auch filternde Entstauber auf. Als Filtermaterialien werden Gewebe oder Vliesstoffe verwendet. Durch den Einsatz von Kunstfasern und Geweben aus feinen Metallfäden konnten die Abscheideleistung, aber auch die Widerstandsfähigkeit gegen schleißende und chemische Einflüsse deutlich erhöht und damit der Einsatzbereich erweitert werden. Die meisten Filter zur Staubabscheidung werden in Form von Schlauchfiltern gebaut.

## Datenquellen

Zur Berechnung verbrennungsbedingter Emissionen sind Daten über die Eigenschaften der eingesetzten Brennstoffe nötig. Neben Heizwerten sind vor allem Schwefel- und Aschegehalt von Interesse. Hierzu werden die Daten zu Emissionsfaktoren für CO<sub>2</sub> der Deutschen Emissionshandelsstelle<sup>4</sup> und die daraus abgeleiteten Emissionsfaktoren, wie sie im Nationalen Inventarbericht (Umweltbundesamt (2010b)) veröffentlicht sind, verwendet. Emissionsfaktoren für weitere Schadstoffe werden aus LUBW (2005) sowie der Datenbank „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas)“<sup>5</sup>, die das Umweltbundesamt gemeinsam mit dem Öko-Institut bereitstellt, entnommen.

### II.4.1.3. Weitere Emissionsquellen

Als weitere industrieübergreifende Emissionsquelle können Lager- und Handhabungsvorgänge genannt werden, die eine der wichtigsten Quellen für Staubemissionen darstellen.<sup>6</sup> Dabei sind die Emissionen aus diesen Vorgängen nur schwer zu erfassen und bleiben daher meist als diffuse Emissionen ohne Abscheidung. Der allergrößte Teil der Industrieemissionen an CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> steht mit der Bereitstellung von Energie und damit mit Verbrennungsprozessen in Verbindung. Jedoch setzen auch Umwandlungsprozesse insbesondere in der rohstoffnahen Produktion

---

<sup>4</sup>siehe Deutsche Emissionshandelsstelle (2005).

<sup>5</sup>Zu ProBas vgl. Abschnitt II.3.2.1.

<sup>6</sup>Vgl. EIPPCB (2006).

Emissionen dieser Schadstoffe frei. Da diese jedoch nicht allgemein beschrieben werden können, sei hier auf die folgenden Abschnitte II.4.2, II.4.3 und II.4.4 bzw. sektorspezifische Literatur verwiesen.

## II.4.2. Zementsektor

Die Zementindustrie erwirtschaftete 2009 einen Jahresumsatz von 2.204 Mio. EUR, dazu wurden 30.441 Mt Zement produziert. Damit einher gehen u. a. Emissionen in Höhe von 22.355 Mt CO<sub>2</sub>, 23,3 Mt NO<sub>x</sub>, 5,8 Mt SO<sub>2</sub> und 2,3 Mt Feinstaub<sup>7</sup>, womit die Zementindustrie etwa 1% (CO<sub>2</sub> 2,5%) zu den Emissionen der Industrie beiträgt.

Die Produktionszahlen haben 2009 wieder das Niveau vor der Wirtschaftskrise erreicht. Jedoch zeigen die Beschäftigtenzahlen und auch die Anzahl der Werke einen rückläufigen Trend an.

### II.4.2.1. Abbildung der Produktionsprozesse

Die verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Zement folgen im Wesentlichen den gleichen Verfahrensschritten, weshalb nur eine Referenzprozessfolge definiert wird. Die Rohstoffe werden zunächst zu Rohmehl oder Rohschlamm verarbeitet, woraus Zementklinker in Form von nussgroßen, graugrünen Körpern gebrannt wird. Der Zementklinker wird dann mit weiteren Zuschlagstoffen zermahlen, wodurch Zement entsteht.<sup>8</sup>

Zementklinker ist der Hauptbestandteil von Zement und seine Herstellung der energieaufwändigste Verfahrensschritt in der Zementherstellung. Das Brennen von Zementklinker stellt eine Sinterung des Rohstoffgemisches bei Temperaturen von etwa 1450°C dar. Kalkstein, Kreide, Ton und Kalksteinmergel stellen die wichtigsten Rohstoffe zur Herstellung von Zementklinker dar. Kalkstein, Kreide und Mergel liefern Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) für die Calcinierungsreaktion, bei der Cal-

<sup>7</sup>Die Zahlen entsprechen den Emissionen des Jahres 2008 der Quellkategorien 2A1 und 1A2f1 aus den Nationalen Inventarberichten (vgl. Umweltbundesamt (2010b,a)).

<sup>8</sup>Eine ausführliche Beschreibung der Verfahrensweise findet sich in Achternbosch und Bräutigam (2000).

ciumcarbonat mit Sauerstoff unter Freisetzung von Kohlendioxid zu Calciumoxid reagiert. Über Tonkomponenten und ggf. Korrekturbestandteile (Bauxit, Eisenerz, Sand) werden weiterhin Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in den Prozess eingebracht. Für 1t Klinker werden etwa 1,5-1,6 t an mineralischen Rohstoffen aufgewendet.

Je nach Feuchte und Zusammensetzung des Rohmaterials werden verschiedene Verfahren zur Herstellung des Klinkers unterschieden: Das Nassverfahren ist das älteste Verfahren zur Klinkerherstellung, das aufgrund des hohen thermischen Energiebedarfs in Deutschland nicht mehr eingesetzt wird. Auch das Halbnassverfahren wird in Deutschland nur noch an einem Standort angewandt. Das Halbtrockenverfahren setzt trockene Rohstoffe ein, die mit Wasser verdichtet einem Rostvorwärmeofen (Lepolofen) aufgegeben werden. Etwa 5,8% der genehmigten Klinkerkapazität in Deutschland entfallen derzeit auf dieses Verfahren.<sup>9</sup> Das Trockenverfahren setzt Drehrohröfen mit mehrstufigen Zyklonvorwärmern mit oder ohne Calcinator ein, auf die trockenes Rohmehl aufgegeben wird. Zyklonvorwärmeöfen mit oder ohne Calcinator haben einen geringeren Energiebedarf und stellen in Deutschland 2009 einen Anteil von 93,1% an der Produktionskapazität.<sup>10</sup>

Da die Aufbereitung der Rohstoffe, die Vorwärmung und ggf. Vorcalcinierung sehr eng mit dem eigentlichen Brennprozess verbunden sind und die prozesstechnischen Änderungen dieser Teilprozesse einander bedingen, werden diese Prozesse im Modell in einem Prozessschritt zusammen gefasst. Die abgebildete Prozessfolge besteht somit aus der Herstellung von Zementklinker und dem anschließenden Mahlvorgang zu Zement, wie in Abbildung II.4.1 dargestellt.

Entsprechend der in Deutschland eingesetzten Verfahren werden folgende Anlagen definiert (vgl. Tabelle II.4.1): Anlagentyp 210101<sup>11</sup> deckt die restlichen verbliebenen Schachtöfen ab und hat maximal eine Kapazität von 800 t pro Tag.

---

<sup>9</sup>Vgl. BDZ (2010).

<sup>10</sup>ebenda.

<sup>11</sup>Die Nummerierung der Anlagentypen nennt zunächst den Sektor S, dann die Referenzprozessfolge R, dann zweistellig die Stufe in der Referenzprozessfolge ss und zuletzt ebenfalls zweistellig eine laufende Nummer nn für Anlagentypen dieser Stufe: SRssnn.

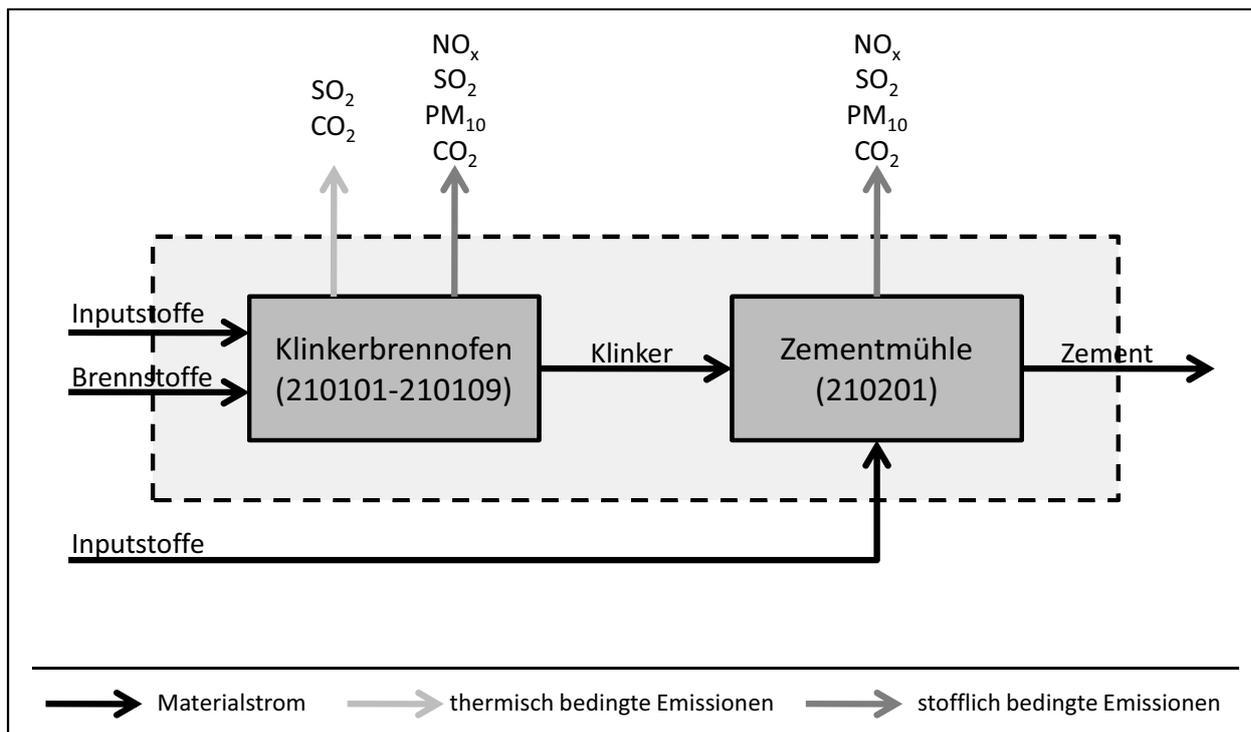


Abb. II.4.1.: Schematische Darstellung der Referenzprozessfolge im Zementsektor

Alle anderen Anlagentypen repräsentieren Drehrohröfen (DRO). Die Anlagentypen 210102 bis 210104 stellen Lepolöfen mit Rostvorwärmern in drei verschiedenen Größenklassen dar. Die Anlagen 210105 bis 210109 sind Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern, wobei die Anlagentypen 210108 und 210109 außerdem mit Vorcalcinatoren ausgestattet sind. Auch hier werden verschiedene Größenklassen unterschieden. Die Unterschiede in den Verfahren bestehen im Wesentlichen im Energiebedarf sowie in den Emissionsfaktoren. Tabelle II.4.1 enthält nur Angaben zu stofflich bedingten Emissionen. Die thermisch bedingten Emissionen bewegen sich abhängig von den eingesetzten Brennstoffen zwischen 30 bis 105 g SO<sub>2</sub>/t Klinker bzw. 230 bis 470 kg CO<sub>2</sub>/t Klinker.

Für den Prozessschritt Zementmahlen ist nur ein Anlagentyp 210201 definiert, da die hier möglichen Änderungen der Anlagentechnik nur unwesentlich zu Änderungen der Emissionssituation beitragen.

Tab. II.4.1.: Anlagentypen im Zementsektor und charakteristische Kenngrößen

Typ	Bezeichnung	Kapazität	therm. Energiebedarf <sup>1</sup>	EF NO <sub>x</sub> <sup>1</sup>	EF SO <sub>2</sub> <sup>23</sup>	EF PM <sub>10</sub> <sup>4</sup>	EF CO <sub>2</sub> <sup>25</sup>
		[t K./d]	[GJ/t K.]	[g/t K.]	[g/t K.]	[g/t K.]	[kg/t K.]
210101	Schachtofen	<800	6	3000	2760	34000	530
210102	Lepolofen	<1000	5	4600	2760	34000	530
210103		1000 - 4000	4,6	3500	2760	34000	530
210104		>4000	4,2	2400	2760	34000	530
210105	DRO mit	<1000	4	4600	2760	34000	530
210106	Zyklon-	1000 - 4000	3,7	3500	2760	34000	530
210107	vorwärmer	>4000	3,5	2400	2760	34000	530
210108	DRO mit	1000 - 4000	2,9	1350	2760	34000	530
210109	Vorkalzinerer	>4000	2,9	1350	2760	34000	530
		[t Z./d]	[GJ/t Z.]	[g/t Z.]	[g/t Z.]	[g/t Z.]	[kg/t Z.]
210201	Zementmühle					20000	

Durch die Kalibrierung des Modells kann es zu geringfügigen Abweichungen von den Werten in den Quellen kommen.

<sup>1</sup> Vgl. Rentz u. a. (1999a).

<sup>2</sup> In der Tabelle sind nur die rohstoffbedingten SO<sub>2</sub>- bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgeführt.

<sup>3</sup> berechnet aus Angaben aus VDZ (2002) für Einsatz von Rohstoffen mit hohen Sulfidgehalten.

<sup>4</sup> aus der RAINS-Datenbank, Aufteilung der Staubemissionen auf Ofen und Mühle folgt Angaben aus EIPPCB (2010a).

<sup>5</sup> aus ZSE.

## II.4.2.2. Emissionsminderungsmaßnahmen

Der Energiebedarf der Zementherstellung wird im Wesentlichen vom dem Prozess des Klinkerbrennens bestimmt. Der theoretisch minimale thermische Energiebedarf liegt laut VDZ (2010) aufgrund der chemischen und thermodynamischen Gegebenheiten des Prozesses inklusive der Trocknung der Rohstoffe bei etwa 2500 MJ/t Klinker. Der durchschnittliche spezifische Brennstoffenergieeinsatz aller Zementwerke in Deutschland betrug im Jahr 2001 2790 MJ/t Zement.<sup>12</sup> Als Brennstoffe werden fossile Brennstoffe, vor allem Stein- und Braunkohle, verwendet. Zur Senkung der Emissionen und insbesondere der Brennstoffkosten werden diese jedoch zunehmend durch Sekundärbrennstoffe ersetzt. Hierzu werden u. a.

<sup>12</sup>Daten für das Jahr 2001 wurden, wenn nicht anders genannt, aus VDZ (2002) entnommen.

Altreifen, Altöl, Industrie- und Gewerbeabfälle, Siedlungsabfälle, Tiermehle und -fette sowie Klärschlamm eingesetzt. Der Anteil an Sekundärbrennstoffen erreichte im Jahr 2001 bereits 30% des Gesamtenergiebedarfs. Mit den hohen Temperaturen und den langen Verweilzeiten der Verbrennungsgase im Drehrohrofen eignet sich der Klinkerbrennprozess besonders zur Müllmitverbrennung, da organische Reaktionsprodukte, wie etwa Dioxine und Furane, mit hoher Wahrscheinlichkeit vollständig zerstört werden.<sup>13</sup> Modellseitig ermöglicht die Maßnahme *Brennstoffsubstitution* den Werken eine stufenweise Erhöhung des Anteils an Sekundärbrennstoffen auf 30%, 60%, 80% und 100%. Auch eine Substitution in umgekehrter Richtung ist möglich. Eine Substitution ist immer mit einer vergleichsweise geringen Investition in zusätzliche Anlagen zur Aufbereitung der Brennstoffe verbunden. Wird ein Sekundärbrennstoffanteil von 60% überschritten, sind die schärferen Grenzwerte der 17. BImSchV einzuhalten. Es wird angenommen, dass kein gefährlicher Abfall mitverbrannt wird.

Neben dem maßgeblichen Energieverbrauch stellt der Brennprozess auch die Hauptquelle an Emissionen dar. Bedingt durch die Verbrennung werden Stickoxide, Schwefeloxid und Kohlendioxid freigesetzt. Weiterhin werden an diversen Stellen im Prozess Staubemissionen frei.

## Stickstoffoxide

Die Bildung der Stickoxide erfolgt im Calcinator überwiegend nach dem Brennstoff-NO-Mechanismus, im Drehrohrofen überwiegt aufgrund der hohen Temperatur die thermische NO-Bildung.<sup>14</sup> Primärmaßnahmen zur Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen bestehen im Einsatz von Low-NO<sub>x</sub>-Brennern, die durch *Luft- und/oder Brennstoffstufung* Luftüberschuss und Flammentemperatur so regeln, dass es zu einer verminderten NO<sub>x</sub>-Bildung bei vollständigem Ausbrand der eingesetzten Brennstoffe kommt.<sup>15</sup>

---

<sup>13</sup>Vgl. Bolwerk u. a. (2006).

<sup>14</sup>zu den Bildungsmechanismen vgl. Abschnitt II.4.1.1.

<sup>15</sup>vgl. hierzu Abschnitt II.4.1.2.

Als Sekundärmaßnahme wird in vielen Werken die *selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR)* eingesetzt, wobei eine Ammoniaklösung verwendet wird, die sowohl im Ofen als auch im Vorwärmer oder Vorcalciner zu den Abgasen eingedüst werden kann. Das *SCR-Verfahren* wird in Deutschland bisher nur im Zementwerk Solnhofen in einem Pilotprojekt angewandt.<sup>16</sup> In einer weiteren Pilotanlage in Bayern wird die Anwendung einer Hoch-Effizienz-SNCR-Anlage getestet.<sup>17</sup> Für die beiden letzt genannten Minderungsmaßnahmen wird eine Verfügbarkeit ab 2005 bzw. 2010 angenommen.

## Schwefeldioxid

Schwefel kann zum einen über die Rohstoffe und zum anderen über die Brennstoffe in den Klinkerbrennprozess eingetragen werden. Der in den Brennstoffen enthaltene Schwefel wird bei der Verbrennung in Schwefeldioxid umgewandelt. Dieses reagiert mit den Alkalien, die über die Rohstoffe in den Prozess eingetragen werden, zu verhältnismäßig stabilen Alkalisulfaten. Überschüssiges  $\text{SO}_2$  reagiert mit dem bei der Entsäuerung des Kalksteins entstehenden  $\text{CaO}$  zu  $\text{CaSO}_4$ . Da diese Sulfate mit dem Brenngut wieder dem Ofen zugeführt werden, bildet sich ein Schwefelkreislauf. Je nach Höhe des Alkaliüberschusses stellt sich ein Gleichgewicht mit dem Austrag des Schwefels über den Klinker ein. In den Rohstoffen liegt Schwefel als Sulfit oder als Sulfat gebunden vor. Die mit den Rohstoffen eingetragenen Sulfate werden in der Sinterzone teilweise zersetzt. Danach wird das gebildete  $\text{SO}_2$  von den in den Rohstoffen vorliegenden Alkalien gebunden und mit dem Klinker fast vollständig ausgetragen. Folglich treten erhöhte  $\text{SO}_2$ -Emissionen nur bei den Ofenanlagen auf, in denen sulfidhaltige Rohstoffe eingesetzt werden oder die ohne Abgasverwertung betrieben werden.<sup>18</sup> Im Modell werden drei verschiedene Schwefelgehalte der Rohstoffe unterschieden und die Emissionen der Werke entsprechend angepasst. Um die Einbindung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen in den Klinker

---

<sup>16</sup>Vgl. Umweltbundesamt (2003).

<sup>17</sup>Vgl. Bolwerk u. a. (2006).

<sup>18</sup>Vgl. (VDZ, 2008, S.80-82).

in Form von Sulfaten abzubilden, wird bei der Berechnung der brennstoffbedingten SO<sub>2</sub>-Emissionen ein Korrekturfaktor von 0,1 angesetzt.<sup>19</sup> Der Emissionsgrad beträgt somit lediglich 10%.

Primärmaßnahmen, wie ein gleichmäßiger Ofenbetrieb, gute Vorhomogenisierung und gleichmäßige Dosierung der Roh- und Brennstoffe sowie der Betrieb bei ausreichendem Sauerstoffüberschuss, werden nicht abgebildet, da angenommen wird, dass diese bereits in jedem Werk durchgeführt werden. Aus dem gleichen Grund wird auch die Möglichkeit durch den Betrieb der Ofenanlage im Verbund mit der Mahltrocknung SO<sub>2</sub>-Emissionen zu mindern<sup>20</sup> nicht abgebildet.

Als eine sekundäre Maßnahme zur SO<sub>2</sub>-Minderung wird das *Trockenadditivverfahren* oder Trockensorptionsverfahren eingesetzt. Dabei werden Kalkhydrat (Ca(OH)<sub>2</sub>) oder Kalkmilch dem Brennprozess als Additiv am günstigsten Ort für die Entstehung von SO<sub>2</sub> hinzugegeben. Das SO<sub>2</sub> wird von dem Additiv absorbiert und als Sulfat über den Klinker ausgetragen oder in einem Entstauber abgeschieden.

Bei Rohstoffen aus Lagerstätten mit vergleichsweise hohen Sulfidgehalten reicht das Trockenadditivverfahren meist nicht aus, um die geforderten Grenzwerte einzuhalten. In diesem Fall wird meist ein Verfahren der *Nassentschwefelung* eingesetzt. Das entstaubte Abgas wird durch einen Waschturm geleitet, wo das SO<sub>2</sub> durch ein Adsorptionsmittel ausgewaschen wird. Hierzu werden Kalkstein, Ofenmehl oder Elektrostaub in einer wässrigen Suspension verwendet.

## Kohlendioxid

Das Treibhauspotential der bei der Zementherstellung entstehenden Emissionen ist nahezu vollständig dem Kohlendioxid zuzurechnen. Andere bekannte Treibhausgase werden nur in sehr geringen Mengen emittiert. Bei der Freisetzung von CO<sub>2</sub> werden thermisch bedingte und rohstoffbedingte Emissionen unterschieden. Zur Senkung der thermisch bedingten, im Emissionshandel berücksichtigten CO<sub>2</sub>-

---

<sup>19</sup>Vgl. hierzu Gleichung II.2.4.

<sup>20</sup>Vgl. dazu Seidler (2005).

Emissionen, die bei der Umsetzung von Brennstoffenergie zu Prozesswärme entstehen, werden vermehrt Sekundärbrennstoffe eingesetzt.

Rohstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen bei der Entsäuerung von Kalkstein, bei der CaO<sub>3</sub> zu CaO und CO<sub>2</sub> umgesetzt wird. Die Höhe der rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen kann in geringem Maß über die Rohstoffrezeptur beeinflusst werden. Jedoch handelt es sich um eine zum Erreichen der vorgegebenen Zusammensetzung des Klinkers notwendige Reaktion, so dass eine Reduzierung der Emissionen pro Tonne Klinker praktisch nicht möglich ist. In Deutschland lagen die rohstoffbedingten Emissionen 2009 bei 0,53 t CO<sub>2</sub>/t Klinker bzw. 0,398 t CO<sub>2</sub>/t Zement. Eine Verminderung der Emissionen bezogen auf die Tonne Zement kann jedoch erreicht werden, indem Klinker durch beispielsweise Hüttensand und ungebrannten Kalkstein substituiert wird. In der am weitesten verbreiteten Zementsorte, dem Portlandzement, kann so bis zu 40% des Klinkers substituiert werden.<sup>21</sup> Der Anteil an Klinker im Zement wird mit dem sog. Klinkerfaktor beschrieben. Dieser lag im Jahr 2001 in Deutschland durchschnittlich bei 0,78 t Klinker/t Zement.<sup>22</sup>

Die Möglichkeit der Minderung des Klinkerfaktors ist als wiederholbare Maßnahme implementiert, wobei der Klinkerfaktor schrittweise um 0,1 auf minimal 0,6 gesenkt werden kann.

## **Staub**

Staub gelangt hauptsächlich über Abgas- und Abluftströme wie dem Ofen- bzw. Rohmühlenabgas und der Abluft von Klinkerkühlern, Zementmühlen und Trocknungsanlagen in die Umwelt. Es gibt außerdem eine Vielzahl von kleineren Quellen, beispielsweise Absaugeeinrichtungen für Silos, Transportbänder oder Materialübergabestellen, an denen die Emissionen nur schwer erfasst werden können. Die erfassten Abgas- und Abluftströme werden in *Gewebefiltern* oder *Elektroabscheidern*<sup>23</sup> behandelt, mit denen Reingasgehalte von 10 bis 50 mg/m<sup>3</sup> erreicht

---

<sup>21</sup> Vgl. Bolwerk u. a. (2006).

<sup>22</sup> Neben Hüttensand werden auch anderweitige sekundäre Einsatzstoffe zur Substitution von Klinker gesucht. Pelisser u. a. (2011) untersuchen beispielsweise den Einsatz von Gummi aus Altreifen.

<sup>23</sup> Zur Wirkungsweise siehe wiederum Abschnitt II.4.1.2.

Tab. II.4.2.: Emissionsminderungsmaßnahmen im Zementsektor

Maßnahme	Minderung	Investition [EUR]	Datenquelle
Luftstufung in der Verbrennung	25% NO <sub>x</sub>	450.000	EGTEI
Luft- und Brennstoffstufung	35% NO <sub>x</sub>	750.000	NOX <sup>1</sup>
SNCR	55% NO <sub>x</sub>	600.000	EGTEI
Hocheffiziente SNCR	85% NO <sub>x</sub>	900.000	BREF
SCR	85% NO <sub>x</sub>	1.700.000	NOX <sup>1</sup>
Trockenadditivverfahren	60% SO <sub>2</sub>	200.000	EGTEI
Nassentschwefelung	75% SO <sub>2</sub>	5.500.000	EGTEI
Elektroabscheider	99,95% TSP	1.500.000	EGTEI
Gewebefilter	99,96% TSP	1.750.000	EGTEI
Brennstoffsubstitution		150.000	
Minderung Klinkerfaktor		150.000	

Durch die Kalibrierung des Modells kann es zu geringfügigen Abweichungen von den Werten in den Quellen kommen.

<sup>1</sup> Vgl. Rentz u. a. (1999a), angepasst an EGTEI (2003)

werden können. Die Minderungsmaßnahmen zur Staubabscheidung sind sowohl auf die erste Anlage (Drehrohrofen) als auch auf die Zementmühle anwendbar.

Die beschriebenen Emissionsminderungsmaßnahmen sind im Einzelnen in der Tabelle II.4.2 mit ihren jeweiligen Minderungseffizienzen aufgeführt. Die angegebenen Investitionen beziehen sich auf ein Werk mit der Referenzkapazität von 1100 t Klinker/Tag. Die Daten zu Minderungseffizienz und Investitionen sind im Wesentlichen EGTEI (2003) entnommen. Ergänzende Daten aus anderen Quellen wurden hinsichtlich der Investitionen zu den Angaben von EGTEI in Bezug gesetzt und entsprechend angepasst, so dass ein konsistenter Datensatz entsteht.

### II.4.2.3. Ausgangskonfiguration der Werke

Für die Ausgestaltung der Startbedingungen der einzelnen Zementwerke werden die Daten des EPER-Verzeichnisses aus dem Jahr 2001 zugrunde gelegt.<sup>24</sup> Das Verzeichnis weist in diesem Jahr 41 Zementwerke aus, die alle im Modell darge-

<sup>24</sup>Vgl. EEA (2001).

stellt werden. Vereinfachend wird angenommen, dass diese den eingesetzten Klinker vollständig selbst produzieren und weiterhin die gesamte Menge an hergestelltem Klinker zu Zement verarbeitet wird.

Um die Kapazität sowie die Anlagenausstattung der einzelnen Werke festzulegen, werden die berichteten Emissionen mit den Emissionsfaktoren der möglichen Kombinationen von Anlagen und Minderungsmaßnahmen verglichen. Dabei werden die Schadstoffe  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{CO}_2$  betrachtet, welche sowohl im EPER-Verzeichnis aufgeführt sind als auch im Modell abgebildet werden.

Im Zementsektor sind  $N_{\text{Zement}} = 15552$  Kombinationen von Anlagen und Emissionsminderungsmaßnahmen möglich. Diese ergeben sich aus neun Ofentypen, die mit vier Brennstoff-Mischungen, vier verschiedenen Klinkerfaktoren, drei primären und zwei sekundären  $\text{NO}_x$ -Maßnahmen, drei unterschiedlichen Sulfidgehalten der Rohstoffe und drei  $\text{SO}_2$ -Abscheidevorrichtungen, sowie zwei Staubabscheidern kombiniert werden können. Die Möglichkeit, die Anlage ohne Maßnahmen zu betreiben, wird jeweils mitgezählt. Es wurde angenommen, dass im Jahr 2001 kein Werk mit 100% Sekundärbrennstoffen betrieben wurde und dass alle Werke mit einer Anlage zur Staubabscheidung ausgerüstet sind.

$$N_{\text{Zement}} = 9 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 = 15552$$

Die tatsächlichen Emissionen  $\hat{E}_p^w$  eines jeden Schadstoffs  $p$  eines Werkes  $w$ , wie sie aus dem EPER-Verzeichnis hervorgehen, werden durch den entsprechenden Emissionsfaktor  $EF_p^k$  einer Kombination  $k$  dividiert, was zu einer theoretischen Aktivitätsrate  $AR_p^{w,k}$  führt. Die so erhaltenen vier Aktivitätsraten sollten im Idealfall übereinstimmen, daher wird als Bewertungskriterium  $\Phi^{w,k}$  für eine Kombination  $k$  die Summe der quadratischen Abweichungen der vier Aktivitätsraten von deren Mittelwert  $\overline{AR}^{w,k}$  verwendet. Neben der bestmöglichen Kombination zur Abbildung der Emissionen eines Werkes, erhält man so auch die dazu passende Aktivitätsrate des Werkes  $\overline{AR}^{w,k}$ .

$$\Phi^{w,k} = \sum_p (AR_p^{w,k} - \overline{AR}^{w,k})^2 \quad [\text{II.4.2}]$$

Neben dem Ziel, die Emissionen des Werkes abzubilden, sind insbesondere auch sektorübergreifende Summen und Durchschnittswerte möglichst genau zu treffen. Es stehen Informationen zur Verfügung über den Kapazitätsanteil bestimmter Ofentypen an der Gesamtkapazität sowie über den durchschnittlichen Sekundärbrennstoff-Einsatz. Weiterhin können Angaben zur Anzahl implementierter Minderungsmaßnahmen gefunden werden.<sup>25</sup> Als einzige werkspezifische Information wird dem Werk Solnhofen eine SCR-Anlage zugeordnet. Zur Festlegung der Anfangsausstattung der Werke wird die Summe des Bewertungskriteriums  $\Phi^{w,k}$  über alle Werke minimiert unter Einhaltung geringer Abweichungen der Durchschnittswerte von den realen Werten als Nebenbedingungen.

#### II.4.2.4. Ergänzende wirtschaftliche Daten

Die spezifischen Abschreibungen sowie der in Abschnitt II.2.2.1 beschriebene Gütersteuereffizient werden aus weiteren Daten des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt (2003)) abgeleitet. Danach betragen die Abschreibungen der Zementindustrie<sup>26</sup> im Jahr 2001 insgesamt 256.329.000 EUR. Daraus lässt sich zunächst ein Durchschnittswert für die spezifischen Abschreibungen  $\overline{SAB}^{\text{Zement}}$  ableiten. Dazu werden die Abschreibungen durch die aus Verbandsstatistiken bekannte Produktionsmenge von 32.118.000 t Zement im Jahr 2001 dividiert.<sup>27</sup> Daraus ergibt sich für die durchschnittlichen spezifischen Abschreibungen ein Wert von  $\overline{SAB}^{\text{Zement}} = 7,98$  EUR/t Zement bezogen auf die Jahreskapazität.<sup>28</sup> Dies entspricht für ein Werk mit einer Kapazität von 1100 t

<sup>25</sup>Vgl. VDZ (2002).

<sup>26</sup>Nach der Wirtschaftszweigklassifikation WZ2003 ist die Herstellung von Zement dem Wirtschaftszweig 2651 zugeordnet.

<sup>27</sup>Aus BDZ (2002).

<sup>28</sup>Dabei wird vereinfachend von einer Vollausslastung der Werke ausgegangen.

Zement/Tag bei 320 Tagen/Jahr Betrieb und einer Lebensdauer von 35 Jahren einem Anlagenwert von knapp 100 Mio. EUR.

Um die Relationen der Investitionen der verschiedenen Anlagentypen zueinander abzuschätzen, wird die Annahme getroffen, dass alle Werke zu gleichen Stückkosten produzieren können. Die Annahme beruht darauf, dass höhere Investitionen in neuere Technologie sich durch niedrigere Material- und Arbeitskosten auszahlen. Zusätzlich bestehen Vorteile durch höhere Produktivität gemessen in t/h, die jedoch nicht in die Berechnung einfließen. Implizit wird damit eine Amortisationszeit der Investition über die gesamte Lebensdauer der Anlage unterstellt. Die Unterschiede in den Investitionen der Anlagentypen werden daher tendenziell unterschätzt.

Bei gleichen Stückkosten für alle Öfen ist die Spannweite der spezifischen Abschreibungen gleich der Spannweite der Summen aus Material- und Personalkosten. Es ergeben sich daraus spezifische Abschreibungen zwischen 7,22 und 8,74 EUR/t Zement.

Zur Berechnung des durchschnittlichen Gütersteuernkoeffizienten werden die Angaben zu Gütersteuern aus der IO-Tabelle 2001 für den Produktionsbereich 26 „H.v. Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“ verwendet. Als durchschnittlicher Gütersteuernkoeffizient ergibt sich ein Wert von  $\overline{GSK}^{Zement} = 0,49$  EUR/t Zement. Die Unterschiede der kombinationsspezifischen Gütersteuernkoeffizienten werden aus den nach Gleichung II.2.21 berechneten Gütersteuern  $GS^k$  abgeleitet.

### II.4.3. Eisen- und Stahlsektor

Die deutsche Stahlindustrie hält mit einer Produktion von 32,7 Mio. t Rohstahl im Jahr 2009 einen Weltmarktanteil von etwa 3%. Innerhalb der EU27 stellt die deutsche Produktion an Rohstahl mit 24% den größten Anteil dar. Während die Produktionszahlen von 2000 bis 2008 relativ konstant auf einem Niveau von 45 Mio. t Rohstahl blieben, musste die Stahlindustrie aufgrund der Wirtschaftskrise im Jahr 2009 einen Produktionsrückgang um 13 Mio. t verkraften.

Zur Stahlproduktion werden in Deutschland nur noch das Oxygenstahl- und das Elektrostahl-Verfahren angewandt, wobei letzteres 2009 einen Anteil von 35% an der Gesamtproduktion hatte.

Oxygenstahl wird in der Regel in integrierten Hüttenwerken hauptsächlich aus dem Primärrohstoff Eisenerz hergestellt. Das Eisenerz wird im Hochofen zu Roheisen reduziert und anschließend im Sauerstoffkonverter zu Rohstahl aufbereitet. Die Produktion in Elektrostahlwerken hingegen setzt maßgeblich eisenhaltigen Schrott als Sekundärrohstoff zur Herstellung von Stahl ein und schmilzt diesen in Elektrolichtbogenöfen (Electronic Arc Furnace (EAF)) auf.

Die Anteile der beiden Prozesslinien an der Gesamtproduktion haben sich in den letzten Jahren zunehmend in Richtung Elektrostahl verschoben. Dies kann hauptsächlich auf die deutlichen Unterschiede im Energieeinsatz zurückgeführt werden. Der Hochofen/Konverter-Prozess zur Herstellung von Oxygenstahl weist einen spezifischen Energiebedarf von durchschnittlich 19,4 GJ/t Rohstahl in Form primärer Energieträger, zuzüglich 0,35 GJ/t Rohstahl an elektrischer Energie, auf.<sup>29</sup> Bei der Herstellung von Elektrostahl werden hingegen nur 1,8 GJ/t Rohstahl an elektrischer Energie und 0,5 GJ/t Rohstahl an fossiler Energie benötigt.

Auch die tendenziell steigenden Preise für Eisenerz begünstigen diesen Trend. Die Nettoimporte an Eisenerz betragen im Jahr 2006 44,85 Mio. t, wovon mehr als die Hälfte aus Brasilien stammte. Jedoch ist die Produktion von Elektrostahl durch das Schrottaufkommen begrenzt. Die Möglichkeit direkt reduziertes Eisen (DRI) als Eisenträger im EAF einzusetzen, wird bisher an zwei Standorten in Deutschland genutzt.<sup>30</sup>

Neben der zunehmenden Produktion über Elektrolichtbogenöfen haben auch die Weiterentwicklung der Prozesse, insbesondere die Optimierung der Energieverbundwirtschaft, zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz beigetragen. Der spezifische Primärenergiebedarf in Deutschland konnte von 20,6 GJ/t Rohstahl im Jahr 1990 auf 18,7 GJ/t Rohstahl im Jahr 2009 gesenkt werden. Damit

---

<sup>29</sup>Vgl. (EIPPCB, 2001, S.14).

<sup>30</sup>Vgl. VDEh/WV Stahl (2010).

verbunden sind auch die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1,59 t CO<sub>2</sub>/t Rohstahl 1990 auf 1,414 t CO<sub>2</sub>/t Rohstahl 2009 zurückgegangen.<sup>31</sup> Laut VDEh werden rund 62,8% des Gesamtenergiebedarfs in der Stahlproduktion in Form von Reduktionsmitteln eingesetzt, wo sich aufgrund der gegebenen Prozesstechnik nur noch geringe Einsparmöglichkeiten ergeben. Einsparpotentiale werden „nahezu ausschließlich“<sup>32</sup> bei den verbleibenden 37,2%, nämlich dem Bedarf an Brenngasen und elektrischer Energie gesehen. In der erweiterten Selbstverpflichtungserklärung zur Klimavorsorge vom Mai 2001 hat die Stahlindustrie eine Reduktion des spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bezogen auf die produzierte Menge an Rohstahl von 22% gegenüber 1990 bis 2012 zugesagt.<sup>33</sup> Mit insgesamt 54,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Ausstoß trug laut Umweltbundesamt (2010b) die Stahlindustrie 2008 einen Anteil von 6,3 % zu den CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen in Deutschland bei. Auch bei den Luftschadstoffen konnten außer bei NH<sub>3</sub> und NMVOC beachtliche Rückgänge in den spezifischen Emissionen verzeichnet werden.

### II.4.3.1. Abbildung der Produktionsprozesse

Entsprechend werden im Stahlsektor zwei Referenzprozessfolgen unterschieden. Die erste simuliert die Herstellung von Oxygenstahl über die Hochofen/Konverterroute und besteht aus einer Abfolge von sechs Anlagen: Sinteranlage, Kokerei, Winderhitzer, Hochofen, Sauerstoffblaskonverter, Sekundärmetallurgie/Walzstraße.<sup>34</sup>

Die zweite Referenzprozessfolge bildet die Herstellung von Elektrostahl ab. Sie unterscheidet zwischen zwei Anlagen, dem Elektrolichtbogenofen sowie auch hier Sekundärmetallurgie/Walzstraße. Die letzte Anlage ist dabei bei beiden Routen dieselbe. Außerdem besteht die Möglichkeit einen gewissen Teil des eingesetzten Eisenschrotts durch direkt reduziertes Eisen zu ersetzen. Dieses wird in einer zusätzlichen Anlage aus Eisenerz und einem Reduktionsmittel (zumeist Erdgas) reduziert.

---

<sup>31</sup>Die Zahlen beruhen auf Angaben des Stahlverbandes, vgl. VDEh/WV Stahl (2010).

<sup>32</sup>siehe VDEh/WV Stahl (2010).

<sup>33</sup>Vgl. Ghenda (2009).

<sup>34</sup>Für eine detailliertere Beschreibung der Prozessschritte siehe Rentz u. a. (1999b).

Abbildung II.4.2 gibt einen schematischen Überblick über die beiden Referenzprozessfolgen. Für jede Prozessstufe ist jeweils nur eine Anlage definiert.

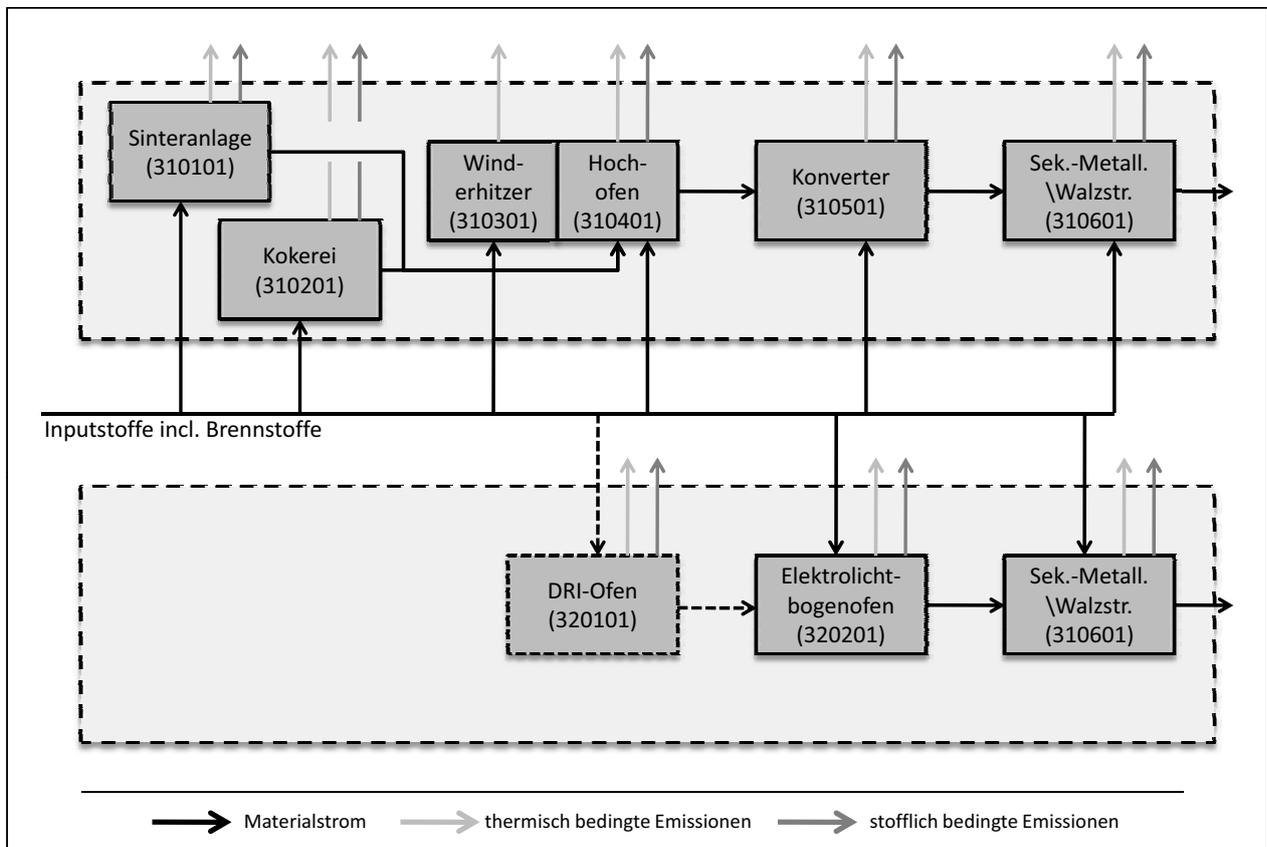


Abb. II.4.2.: Schematische Darstellung der Referenzprozessfolgen im Stahlsektor

### II.4.3.2. Emissionsminderungsmaßnahmen

Die an den einzelnen Anlagen möglichen Emissionsminderungsmaßnahmen sind in Tabelle II.4.3 zusammengefasst.<sup>35</sup> Eine optimierte Prozessführung wird dabei nicht als Minderungsmaßnahme modelliert, da angenommen wird, dass Maßnahmen zur Sicherstellung eines gleichmäßigen und optimalen Betriebes bereits in allen Werken für alle Prozessstufen getroffen wurden.

<sup>35</sup>Die Darstellung und Auswahl der EMM folgen im Wesentlichen EIPPCB (2010b).

Tab. II.4.3.: Emissionsminderungsmaßnahmen im Eisen &amp; Stahl-Sektor

<b>Maßnahme</b>	<b>Minderung</b>	<b>Investition [EUR]</b>
<i>Sinteranlage</i>		
Elektro-Abscheider (EA)	Staub 95%	3.900.000
EA mit bewegten Elektroden	Staub 99%	5.300.000
Schlauchfilter + Löschkalk	Staub 99%, SO <sub>2</sub> 40%	7.200.000
primäre SO <sub>2</sub> -Minderung	SO <sub>2</sub> 20%	600.000
Schwefel-Wäscher	SO <sub>2</sub> 85%	20.000.000
SCR	NO <sub>x</sub> 90%	14.500.000
RAC 1	SO <sub>2</sub> 95% NO <sub>x</sub> 40%	6.400.000
RAC 2	SO <sub>2</sub> 95% NO <sub>x</sub> 80%	8.700.000
Abgas-Rückführung	Abgasvolumen sinkt, Energieeinsparung	4.600.000
<i>Kokerei</i>		
Vorbeugung diffuser Staubemissionen	Staub 70%	1.000.000
primäre NO <sub>x</sub> -Minderung	NO <sub>x</sub> 20%	2.000.000
SCR	NO <sub>x</sub> 90%	6.500.000
Koksofengas-Reinigung	SO <sub>2</sub> 85%	2.500.000
<i>Hochofen und Winderhitzer</i>		
Direkt-Einblasen von Kohle	CO <sub>2</sub> u. a.	1.000.000
Gichtgasentspannungsturbine	Energieeinsparung	2.000.000
Entstaubung der Abstichlöcher und Gießrinnen	Staub 99%	4.000.000
Staubunterdrückung in HO-Gießhallen	Staub 99%	3.100.000
opt. Prozessführung der Winderhitzer	Energieeinsparung	6.300.000
<i>Konverter</i>		
Konvertergas-Nutzung	Energieeinsparung	2.000.000
Sekundärentstaubung	Staub 85%	2.500.000
<i>Elektrolichtbogenofen</i>		
Schrottvorwärmung in Fingerschaftofen	Energieeinsparung	5.300.000
CONSTEEL-Prozess	Energieeinsparung	10.600.000
Staubabscheidung	Staub 95%	25.000.000
<i>Sekundärmetallurgie/Walzstraße</i>		
Staubabscheidung	Staub 96%	5.000.000

Die Angaben zu Minderungseffizienz und Investitionen folgen im Wesentlichen EIPPCB (2001) sowie Rentz u. a. (1999a). Durch die Kalibrierung des Modells kann es zu geringfügigen Abweichungen von den Werten in den Quellen kommen.

## Sinteranlage

Im integrierten Hüttenwerk stellt die Sinteranlage die größte Quelle für Staubemissionen dar. Neben den primären Emissionen durch den Sintervorgang selbst, entstehen auch sekundäre (diffuse) Emissionen durch das Mischen der Rohstoffe, die Zerkleinerung und das Abkühlen des Sinters. Die gefilterten Stäube werden meist auf die Sinteranlage zurückgeführt, wodurch auch die Abwärme im Abgas genutzt werden kann. Durch die *Abgasrückführung* verkleinert sich das Volumen des zu behandelnden Abgasstromes und eine Energieeinsparung von bis zu 20% ist möglich je nach Auslegung. Zur Abscheidung primärer und sekundärer Stäube werden in den meisten Fällen *Elektro-Abscheider (EA)* mit einer Minderungseffizienz größer 95% eingesetzt. Als EA mit höherer Abscheideleistung steht beispielsweise ein *Elektro-Abscheider mit bewegten Elektroden* zur Verfügung. Oftmals wird dem EA noch ein *Schlauchfilter* nachgeschaltet, der durch die Zugabe von gelöschtem Kalk zusätzlich in der Lage ist, neben feinen Staubpartikeln auch gasförmige Schadstoffe insb.  $\text{SO}_2$  abzuscheiden. Schwefeldioxidemissionen sind maßgeblich durch den Schwefeleintrag über den Koksgrus bedingt, daher können Minderungen durch primäre Maßnahmen in Form einer Substitution der eingesetzten Rohstoffe erreicht werden. Reichen diese *primären  $\text{SO}_2$ -Minderungsmaßnahmen* nicht aus, kann ein *Schwefel-Wäscher* mit einer Minderungseffizienz von bis zu 90% eingesetzt werden. Durch den Verbrennungsprozess kommt es auch zur Entstehung von  $\text{NO}_x$ , das durch eine nachgeschaltete *SCR-Anlage* gemindert wird. Ein bisher in Deutschland noch wenig verbreitetes Verfahren setzt *regenerative Aktiv-Kohle (RAC)* zur Minderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen ein. Bevor das Abgas das Aktivkohlebett erreicht, wird außerdem Ammoniak injiziert um zugleich eine  $\text{NO}_x$ -Minderung zu erreichen. Verbrennungsbedingt entstehen weiterhin Kohlendioxid sowie PCDD/F und andere organische Verbindungen.<sup>36</sup>

<sup>36</sup>Zur Minderung von PCDD/F siehe insbesondere Hillmann (2003).

## Kokerei

In der Kokerei entstehen hauptsächlich durch die Unterfeuerung verbrennungsbedingte Emissionen. Weiterhin sind diffuse Staubemissionen durch Undichtigkeiten sowie Lade- und Fördervorgänge zu erwarten. Abdichtung und regelmäßige Wartung und Reinigung aller Öffnungen sowie gleichmäßige und kontrollierte Prozessführung stellen eine Maßnahme zur *Vorbeugung diffuser Staubemissionen* dar. In neueren Anlagen können *primäre Maßnahmen* (gestufte Verbrennung, bessere Wärmeübertragung etc.) zur Minderung der  $\text{NO}_x$ -Entstehung umgesetzt werden. Als nachgeschaltete Maßnahme kann auch hier eine *SCR-Anlage* eingesetzt werden, was jedoch nicht sehr verbreitet ist. Das im Prozess entstehende Koksofengas hat einen hohen Schwefelgehalt und muss daher vor einer Nutzung als Brennstoff gereinigt werden (*Koksofengasreinigung*), um hohe  $\text{SO}_2$ -Emissionen bei der Verbrennung zu vermeiden.

In der Regel wird der Koks nach dem sog. Koksdrücken, also der Entnahme aus dem Ofen, durch ein Nasslöschverfahren abgeschreckt. Das *Kokstrockenkühlverfahren* erreicht deutlich bessere Emissionswerte und macht die Abwärme des Koks nutzbar, ist jedoch derzeit noch mit hohen Investitionen verbunden.

## Hochofen und Winderhitzer

Umweltauswirkungen aus dem Hochofenprozess entstehen hauptsächlich durch den hohen Energie- und Rohstoffeinsatz. Durch das *direkte Einblasen* von alternativen Kohlenwasserstoffquellen, insb. Kohle oder Schweröl aber auch Kunststoffe, im unteren Ofenbereich kann ein Teil des benötigten Koks ersetzt und so der Energiebedarf insgesamt gesenkt werden. Hierdurch werden auch Emissionen der Kokerei vermindert, da weniger Koks produziert werden muss. Das entstehende Gichtgas wird aufgefangen, gereinigt und an anderer Stelle als Brennstoff verwendet, weshalb die Emissionen aus dem Hochofenprozess z. T. verlagert werden. Hochöfen mit hohem Gichtgasdruck können zur weiteren Energierückgewinnung *Gichtgasentspannungsturbinen* einsetzen, die bis zu 0,4 GJ/t Roheisen (15 MW) an

Strom erzeugen können. Auch bei den Winderhitzern können Energieeinsparungen durch *optimierte Prozessführung* erreicht werden (bis zu 0,5 GJ/t Roheisen).

Beim Abstechen des Roheisens kommt es zur Reaktion mit dem umgebenden Luftsauerstoff und Bildung von Eisenoxiden, sog. braunem Rauch. Auch Bestandteile der Schlacke können verdampfen, was ebenfalls zu Staubemissionen führt. Diese Staubemissionen können entweder durch ein komplexes *Entstaubungssystem an Abstichlöchern und Gießrinnen* abgesaugt und abgeschieden werden oder sie werden durch Fernhalten des Sauerstoffs vom Roheisen durch eine Beaufschlagung mit Stickstoff in ihrer Entstehung unterdrückt. Diese neuere Methode der *Staubunterdrückung* ist wesentlich günstiger und effizienter. Weiterhin treten diffuse Staubemissionen bei der Vorbereitung und Förderung der Einsatz- und Ausbringungstoffe auf.

### **Sauerstoffblaskonverter**

Auch beim Konverter kommt es zu primären und diffusen sekundären Staubemissionen bei Ladevorgängen und während des Konverterbetriebes. Die primären Staubemissionen sind im Abgas, dem sog. Konvertergas, enthalten. Das Konvertergas wird in der Konvertergasleitung durch Luftzufuhr verbrannt und die freigewordene Abwärme in einem Abhitzeessel zurückgewonnen. Alternativ kann die Verbrennung durch Vermeiden der Sauerstoffzufuhr unterdrückt werden. Das Konvertergas wird in diesem Fall gesammelt und wie Hochofen- und Koksofengas als Brennstoff verwendet. Obwohl dazu zusätzliche Anlagenteile notwendig sind, setzt sich diese Alternative mehr und mehr durch, da die Energierückgewinnung durch *direkte Nutzung des Konvertergases* günstiger ist als über den Abhitzeessel.

### **Elektrolichtbogenofen**

Der Energiebedarf des Elektrolichtbogenofens wird maßgeblich durch elektrische Energie zugeführt. Es wird angenommen, dass die Umwandlung aus Primärenergie

nicht vor Ort durch eigene Kraftwerke erfolgt, daher sind keine verbrennungsbedingten Emissionen zu berücksichtigen. Wesentliche Emissionen sind Stäube, die vor allem Metalle, aber auch organische Substanzen enthalten, je nach Qualität und Verunreinigungsgrad der eingesetzten Schrotte. Die Emissionen werden durch eine primäre und eine sekundäre Absaugung einer *Staubabscheidung*, meist einem Schlauchfilter, zugeführt. Um Energie einzusparen, wird die Abwärme aus dem Schmelzprozess zur Schrottvorwärmung genutzt. Neuere Ausführungsformen sind der *Fingerschaft-Ofen* mit mehreren parallelen Schäften und der *Consteel-Prozess*, bei dem der Schrott kontinuierlich zugeführt wird. Neben Energieeinsparungen kommt es auch zu einer Erhöhung der Produktivität durch kürzere Einschmelzzeiten und einer Reduktion der Staubemissionen. Es können jedoch höhere VOC-Emissionen auftreten, da in den Vorwärme-Schäften ungünstige Verbrennungsbedingungen für anhaftende organische Substanzen (Farben, Lösemittel) herrschen.

### **Sekundärmetallurgie/Walzstraße**

Die Anlage zum Strangguss sowie die Walzwerke erzeugen zum einen verbrennungsbedingte Emissionen, zum anderen gibt es auch hier diffuse Staubquellen, zu deren Minderung in der Regel *Absaug- und Abscheidevorrichtungen* vorhanden sind.

#### **II.4.3.3. Ausgangskonfiguration der Werke**

Im Eisen und Stahl-Sektor des Industriemodells sind 29 Stahlwerke abgebildet. Diese entsprechen den Stahlwerken, die ihre Emissionen im EPER-Verzeichnis<sup>37</sup> veröffentlicht haben und als Haupttätigkeit NACE 27.0 oder 27.1 angegeben haben.<sup>38</sup> Es werden 16 Standorte für Elektro-Stahlwerke und 13 Standorte für in-

---

<sup>37</sup>Vgl. EEA (2001).

<sup>38</sup>NACE bezeichnet die statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (Nomenclature des Activités économiques dans les Communautés Européennes) und wird hier noch in der seit 2003 gültigen und ab 2008 ersetzten Revision 1.1 verwendet.

tegrierte Hüttenwerke abgebildet.<sup>39</sup> Für einige Standorte werden mehrere Werke modelliert, wobei ein Werk im Modell mit einer Prozesslinie in der Realität gleichgesetzt werden kann. Zur Vereinfachung wird dabei angenommen, dass jedes Werk die jeweilige Referenzprozessfolge vollständig umfasst.

Es werden keine werksinternen Kraftwerke zur Bereitstellung von elektrischer Energie oder Dampf modelliert. Die Bereitstellung elektrischer Energie wird dem Sektor Energie zugeordnet, was auch dem Konzept der Abgrenzung nach Produktionsbereichen, von dem das IOM ausgeht, entspricht.

Die Ausgangskonfiguration wurde so gewählt, dass der durchschnittliche Emissionsfaktor eines jeden Schadstoffes für die Referenzprozessfolge für das Basisjahr 2001 möglichst genau getroffen wird. Die beiden Referenzprozessfolgen werden dabei getrennt betrachtet.

Um die individuellen Emissionsfaktoren der Werke zu bestimmen, wird neben den Daten zur jährlichen Emissionsfracht [t/Jahr] aus dem EPER-Verzeichnis die Stahlproduktion pro Jahr als Aktivitätsrate verwendet. Diese kann für die meisten Werke aus dem Statistischen Jahrbuch der Stahlindustrie (WV Stahl (2001)) entnommen werden. Fehlende Daten wurden geschätzt.

Für verschiedene Kombinationen von Emissionsminderungsmaßnahmen werden nun die daraus resultierenden werksübergreifenden Emissionsfaktoren berechnet und mit den individuellen Werten der tatsächlichen Werke verglichen. Durch systematisches Ausprobieren werden die Kombinationen derart zu den Werken zugeteilt, dass sowohl die durchschnittlichen Emissionsfaktoren nur geringfügig von den realen Werten abweichen, als auch die Verteilung der individuellen Emissionsfaktoren die reale Verteilung widerspiegeln.

---

<sup>39</sup>Eine Zusammengehörigkeit mehrerer Standorte zu einem Konzern wurde ignoriert. Damit wurde auch das Problem der wechselnden Zugehörigkeit zu Konzernen umgangen.

#### II.4.4. Energiesektor

Im Gegensatz zu der Zement- sowie der Eisen- und Stahlindustrie gibt es im Energiesektor<sup>40</sup> keinen dominierenden Prozess zur Umwandlung von Brennstoffen oder Energieträgern in Strom. Konstantin (2009) nimmt eine Untergliederung in fossile Energieträger, Kernenergie sowie Erneuerbare Energien vor, wobei sich die hierfür eingesetzten Verfahren zur Energieumwandlung grundsätzlich unterscheiden. 2008 basierte die Nettostromerzeugung in Deutschland zu 42,0% auf Braun- bzw. Steinkohle, zu 23,4% auf Kernenergie, zu 17,4% auf Erneuerbaren Energien sowie zu 14,0% auf Erdgas (Umweltbundesamt (2010c)). Die in dieser Aufzählung nicht aufgeführten Prozentsätze entfallen beispielsweise auf Pumpspeicherwasser sowie Heizöl, Raffineriegas oder Abfall. Modelltechnisch relevant sind vor allem die mit fossilem Brennstoff befeuerten Verfahren (Braun-/Steinkohle, Erdgas/-öl), da diese erheblich zum Schadstoffaufkommen in Deutschland beitragen. So kann z.B. den Inventartabellen des Umweltbundesamtes entnommen werden, dass die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung ca. 40% der in Deutschland berichteten SO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht (Umweltbundesamt (2010a)). Kernenergie steht zwar auf Grund eines möglichen Austritts radioaktiver Strahlung in der öffentlichen Diskussion, die dort angewandten Verfahren wirken sich jedoch nicht wesentlich auf die untersuchten anlagenbezogenen Schadstoffe und Klimagase aus. Das gleiche gilt für Strom aus erneuerbaren Energien. Die hier entstehenden Emissionen können ebenfalls vernachlässigt werden<sup>41</sup>. Dennoch sollen auch letztere Verfahren kurz beschrieben werden, da zur Modellierung der Technologiediffusion bspw. neu hinzugebaute Kraftwerke, die regenerative Energieträger nutzen, oder in einem bestimmten Jahr abzuschaltende Kernkraftwerke modelliert werden müssen. Die Änderung des Strommixes beeinflusst dabei stark die entstehenden Emissionen.

---

<sup>40</sup>Die Bereitstellung von Wärme ist für das Modell nicht relevant, weshalb sich im Folgenden der Begriff der Energiebereitstellung lediglich auf Elektrizität bezieht.

<sup>41</sup>Ausgenommen sind hierbei Kraftwerke, die mit Biomasse befeuert werden und ebenfalls Schadstoffe emittieren.

### II.4.4.1. Verfahren zur Umwandlung von Energie in Strom

Im Energiesektor wird zwar neben elektrischer Energie auch Wärme gewonnen, jedoch wird dies im Kontext des Modells nicht weiter betrachtet. Vielmehr werden die einzelnen Kraftwerkstypen dargestellt und deren Umsetzung im Modell skizziert<sup>42</sup>. Dabei lassen sich Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastkraftwerke unterscheiden. Grundlastkraftwerke sind auf Grund langer Anfahrzeiten kontinuierlich mit nahezu derselben Leistung in Betrieb und haben somit eine sehr hohe jährliche Nutzungsdauer. Hierzu zählen z.B. Wasserkraft-, Braunkohle- und Kernkraftwerke. In Phasen kurzzeitiger besonders hoher Netzbelastung werden Spitzenlastkraftwerke mit sehr kurzen Anfahrzeiten verwendet, wie z. B. Gasturbinenkraftwerke. Zwischen dieser relativ unscharfen Abgrenzung nimmt z. B. das Steinkohlekraftwerk die Rolle eines Mittellastkraftwerks ein (Lehnhoff (2010)). Dies muss bei der Modellierung des Energiesektors berücksichtigt werden.

#### Fossilthermische Kraftwerke

Fossilthermische Kraftwerke können im Wesentlichen in Dampfkraftwerke, Gasturbinenkraftwerke, Gas- und Dampfturbinen(GuD)-Kraftwerke sowie Verbrennungsmotor-Kraftwerke eingeteilt werden.

Dampfkraftwerke werden in Deutschland vor allem mit Braun- und Steinkohle befeuert. Daneben können jedoch auch flüssige oder gasförmige Brennstoffe, Müll sowie Biomasse eingesetzt werden, wobei letztere zu den erneuerbaren Energieträgern zählt. Im Falle eines Dampf-Kohlekraftwerkes wird im Prozessablauf der Energieumwandlung die Kohle zunächst fein gemahlen und mit heißer Verbrennungsluft in den Feuerraum des Dampferzeugers eingeblasen. Dieser hat die Aufgabe, die Wärme des Rauchgases auf das Speisewasser zur Vorwärmung, Verdampfung und Überhitzung zu übertragen und stellt damit die größte und teuerste Komponente eines Dampfkraftwerks dar (Zahoransky u. a. (2010)). Der Druck und die thermische Energie des so entstandenen Wasserdampfes werden anschließend

---

<sup>42</sup>Die Darstellungen der Kraftwerkstypen sowie deren Untergliederung folgen im Wesentlichen Konstantin (2009)

in der Dampfturbine in mechanische Energie umgewandelt. Ein mit der Dampfturbine gekoppelter Generator wandelt diese weiter in elektrische Energie um, welche über einen Transformator in das Stromnetz eingespeist werden kann. Schließlich wird der entspannte Dampf in einem Kondensator mit Hilfe von Kühlwasser kondensiert so dass das Kondensat zum Speisewasserbehälter zurückgepumpt werden kann. Damit ist der Wasser-Dampf-Kreislauf geschlossen.

Gasturbinenkraftwerke nutzen im Gegensatz zu Dampfkraftwerken Luft oder Rauchgas als Arbeitsmedium. Als Brennstoffe werden vor allem Erdgas, Heizöl aber auch Biogase eingesetzt. Zu den Hauptkomponenten zählen die Brennkammer, der Verdichter, die Turbine und der Generator, wobei die letzteren drei auf einer gemeinsamen Welle montiert sind. Der Prozessablauf gestaltet sich dabei folgendermaßen. Die durch den Verdichter angesaugte und verdichtete Luft wird in der Brennkammer erhitzt und damit auf ein höheres Druckniveau gebracht. Analog zum Dampfkraftwerk wird daraufhin das Arbeitsmedium in der Turbine entspannt und so die thermische Energie zunächst in mechanische Energie und im Generator letztendlich in elektrische Energie umgewandelt. Die Gasturbine stellt dabei einen Großteil der mechanischen Arbeit dem Verdichter zur Verfügung. Im Falle des Gasturbinenkraftwerks wird das Arbeitsmedium nicht wiederverwendet sondern entweicht als Abgas durch den Schornstein.

GuD-Kraftwerke kombinieren die beiden Verfahren der Dampf- und Gasturbinenkraftwerke. Bei Dampfkraftwerken ist das obere Temperaturniveau beim derzeitigen Stand der Technik aus wirtschaftlichen und thermodynamischen Gründen auf ca. 550 °C bis 600 °C limitiert (Zahoransky u. a. (2010)). Gleichzeitig arbeiten moderne stationäre Gasturbinenanlagen mit Turbineneintrittstemperaturen von über 1000 °C, was wiederum Abgastemperaturen von über 500 °C zur Folge hat. Somit liegt es nahe, die beiden Prozesse der Art zu kombinieren, dass die Wärme des Abgasstromes der Gasturbine zum Beheizen im Dampfkraftwerksprozess verwendet werden kann und so Wirkungsgradverbesserungen erzielt werden können. Auf diese Weise sind Nettowirkungsgrade von bis zu 60% möglich.<sup>43</sup>

---

<sup>43</sup>Konstantin (2009) gibt beispielhaft einen elektrischen Wirkungsgrad von 42% für ein Dampfkraftwerk und 35% für ein Gasturbinenkraftwerk an.

Verbrennungsmotor-Kraftwerke spielen bei der Elektrizitätserzeugung nur eine untergeordnete Rolle. Sie werden vielmehr im Rahmen von Blockheizkraftwerken zur zusätzlichen Fernwärmeversorgung verwendet und werden daher im Modell nicht berücksichtigt.

Die durch die beschriebenen fossilthermischen Kraftwerke verursachten Emissionen sind nahezu ausschließlich dem Verbrennungsprozess zuzuordnen und damit stark vom eingesetzten Brennstoff abhängig. Die stattfindenden Prozesse sowie die Maßnahmen zur Verminderung der Emissionen können den Abschnitten II.4.1.1 bzw. II.4.1.2 entnommen werden. Weiterhin muss bezüglich der Feuerungsarten zwischen Staub-, Rost- und Wirbelschichtfeuerung unterschieden werden, was ebenfalls die Emissionsfaktoren beeinflusst.

## **Kernkraftwerke**

Prinzipiell entsprechen Kernkraftwerke in den letzten Prozessschritten der Energieumwandlung den bereits vorgestellten fossilthermischen Dampfkraftwerken. Der wesentliche Unterschied der beiden Verfahren liegt in der Bereitstellung der erforderlichen Wärme. Diese wird im Falle eines Kernkraftwerkes durch die Kernspaltung im Kernreaktor erzeugt.<sup>44</sup> Der Brennstoff besteht dabei aus Uranverbindungen. Die meisten Reaktoren sind Leichtwasser-Reaktoren, die in Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren unterteilt werden. Während beim Siedewasserreaktor der Dampf zum Antrieb der Turbine direkt aus dem Primärkreislauf gewonnen wird, wird beim Druckwasserreaktor die primäre Energie über einen Wärmetauscher an einen Sekundärwasserkreislauf übertragen, dessen Wasserdampf daraufhin die Turbine antreibt.

Die durch das verwendete radioaktive Material ausgehende Gefahr der Kernenergie<sup>45</sup> steht der Tatsache gegenüber, dass der Betrieb eines Kernkraftwerks mit vergleichsweise geringen Emissionen der untersuchten Schadstoffe und Klimagase verbunden ist. Diese Kontroverse findet sich auch in der aktuellen politischen

---

<sup>44</sup>Der genaue Ablauf der Kernspaltung kann bspw. Grupen (2008) oder Zahoransky u. a. (2010) entnommen werden.

<sup>45</sup>Zu den möglichen Gefahren der Kernenergie vgl. bspw. Iwaniec (2010).

Debatte wieder. In einem Gesetzesentwurf vom 28.09.2010 konstatiert der Deutsche Bundestag, dass „die Kernenergie noch für einen weiteren Zeitraum benötigt [wird]“<sup>46</sup>, um den Übergang zu erneuerbaren Energien zu gestalten. Dies geht mit Laufzeitverlängerungen von durchschnittlich zwölf Jahren einher, acht bei Kernkraftwerken mit Beginn des Leistungsbetriebs bis einschließlich 1980, 14 bei jüngeren. Dies wird auch bei der Modellierung des Atomausstiegs berücksichtigt.

Da bei der Wärmeerzeugung im Kernreaktor keine Verbrennung stattfindet, spielen die durch das Modell untersuchten anlagenbezogenen Emissionen bei der Kernenergie eine untergeordnete Rolle. Jedoch kann auf die Modellierung dieser Technologie nicht vollständig verzichtet werden, da die Abschaltung eines Kernkraftwerks auf Grund der Notwendigkeit des Ersetzens der fehlenden Kapazität durch alternative Energieumwandlungsanlagen weitreichende Folgen für den Strommix und damit für die aggregierten Emissionen hat.

### **Kraftwerke zur Nutzung erneuerbarer Energieträger**

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien basiert auf vielen verschiedenen Verfahren. Sonne, Wind, Wasser, Erdwärme oder Biomasse können für die Energieumwandlung unter Gewährleistung einer nachhaltigen Entwicklung in dem Sinne genutzt werden, dass diese Energiequellen immer wieder verwendet werden können. Sie eröffnen die Möglichkeit, Energie bei verhältnismäßig geringem Ausstoß von Treibhausgasen und Schadstoffen bereitzustellen und dadurch positiven Einfluss auf die aggregierten Emissionen zu nehmen, insofern sie fossilthermische Kraftwerke ersetzen (vgl. hierzu bspw. Panwar u. a. (2011)).

Kraftwerke zur Nutzung der Sonnenenergie können in Solarthermie-Kraftwerke und Photovoltaik(PV)-Anlagen eingeteilt werden. Solarthermie-Kraftwerke spielen in Deutschland nur bei der Wärmebereitstellung eine Rolle und werden deshalb nicht weiter betrachtet (vgl. bspw. BMU (2010)). PV-Anlagen zur Stromerzeugung sind in Deutschland deutlich weiter verbreitet, da auch kleine, auf Häuser-

---

<sup>46</sup>Gesetzesentwurf der Fraktionen der CDU/CSU und FDP - Entwurf eines Elften Gesetzes zur Änderung des Atomgesetzes vom 28.09.2010.

dächern installierte Anlagen zur Verstromung eingesetzt werden können. Die im Jahre 2009 installierte Leistung von Photovoltaik-Anlagen betrug  $9.785 \text{ MW}_p$ <sup>47</sup> (BMU (2010)) und entsprach im Jahre 2008 einem Anteil an der Nettostromerzeugung von ca. 0,7% (Umweltbundesamt (2010c)). Bei PV-Anlagen wird innerhalb der Solarzellen mittels Halbleitermaterialien das Sonnenlicht direkt in elektrische Energie umgewandelt.

Wasserkraftwerke machen sich die kinetische und potentielle Energie des Wassers zu Nutze. Dieses wird im Falle eines Laufwasserkraftwerkes zur Stromerzeugung direkt in die Turbine geleitet, während es bei Speicherkraftwerken zunächst aufgestaut wird. Wasserkraftwerke können zwar nahezu emissionsfrei betrieben werden, jedoch beeinträchtigt ein Neubau durch die notwendige Aufstauung des Wassers Flusslandschaften und natürliche Lebensräume, weshalb die Stromerzeugung aus Wasserkraft bei ca. 4.760 MW im Jahre 2009 stagniert (BMU (2010)). Bezogen auf die Nettostromerzeugung in Deutschland entspricht dies ca. 3% (Umweltbundesamt (2010c)).<sup>48</sup>

Analog zu den Wasserkraftwerken basiert das Prinzip der Windkraftanlagen auf der Umwandlung der kinetischen Energie des Windes. Diese wird durch den Rotor zunächst in eine Drehbewegung umgesetzt und anschließend in Elektrizität gewandelt. Entscheidend für die abgreifbare Leistung ist dabei u.a. die Höhe des Rotors sowie die Windgeschwindigkeit. Windkraftanlagen werden in verschiedenen Größenklassen mit verschiedenen Nennleistungen angeboten. So erstreckt sich bspw. das Produktportfolio der Firma REpower über Anlagen von ca. 2 MW Nennleistung bis hin zu knapp über 6 MW.<sup>49</sup> In Deutschland existieren bereits Windparks mit einer gesamten Nennleistung von über 100 MW (Umweltbundesamt (2009)).<sup>50</sup>

---

<sup>47</sup> $\text{MW}_p$  (Watt Peak) ist die Einheit der Nennleistung unter genormten Testbedingungen von  $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$  Einstrahlung (Konstantin (2009)).

<sup>48</sup>Für eine weiterführende Analyse der Rolle der Wasserkraft im Elektrizitätsmarkt siehe z. B. Möst (2006).

<sup>49</sup>Informationen zu dem Produktportfolio des Herstellers lassen sich z.B. unter <http://www.repower.de/produkte/windenergieanlagen/> finden.

<sup>50</sup>Zur Problematik der Energiebereitstellung durch Wind vgl. bspw. Rosen (2008).

Die noch relativ neue Technik der Geothermie zur Nutzung der Erdwärme als Energiequelle soll an dieser Stelle nicht vertiefend behandelt werden, da diese Technik primär für die Wärmebereitstellung eingesetzt wird.<sup>51</sup>

Eine weitere erneuerbare Energiequelle stellt die Stromerzeugung aus Biomasse dar. Auch wenn hier ein klassischer Verbrennungsprozess mit den entsprechenden Schadstoffemissionen (vgl. Abschnitt II.4.1.1) stattfindet weist die Stromerzeugung durch die Verbrennung von Biomasse Vorteile bei der Treibhausgasbilanzierung auf, da anlagenbezogen nur das emittiert wird, was auch vorher durch den entsprechenden Energieträger gebunden wurde (geschlossener CO<sub>2</sub>-Kreislauf). Evans u. a. (2010) identifizieren drei Hauptkategorien verwendeter Technologien für die Verbrennung von Biomasse zur Stromerzeugung: Die Pyrolyse, die Vergasung und die direkte Verbrennung. Biomasse wird energetisch zwar hauptsächlich zur Wärmebereitstellung genutzt, dennoch betrug 2009 die installierte Leistung zur Stromerzeugung durch Biomasse ca. 4.500 MW (BMU (2010)).<sup>52</sup>

#### **II.4.4.2. Kraftwerkspark in Deutschland**

Um die durch die Bereitstellung elektrischer Energie entstehenden Emissionen im Modell abbilden zu können, muss der Strommix und damit die Zusammensetzung des Kraftwerksparks in Deutschland bekannt sein. Hierzu wird die PERSEUS-Datenbank<sup>53</sup> verwendet, in der alle Kraftwerke in der BRD mit einer Leistung von über 70 MW aufgelistet sind. Diese sind nach Brennstoffen sowie nach Kraftwerkstypen untergliedert. Die Aufteilung der installierten Leistung gemäß der in Abschnitt II.4.4.1 vorgenommenen Kraftwerkstypisierung kann dabei der Tabelle II.4.4 entnommen werden.

Es fällt auf, dass der dominierende Prozess zur Stromerzeugung mit 65% der Dampfprozess unter Nutzung fossiler Brennstoffe ist. Dabei kommen

---

<sup>51</sup>2009 betrug die installierte Leistung zur Stromerzeugung im Bereich der Geothermie 6,6 MW (BMU (2010)), während das jährliche Wachstum bis 2020 auf ca 6% geschätzt wird (Nitsch u. a. (2004)).

<sup>52</sup>Zur Bilanzierung der Stromerzeugung aus Biomasse vgl. bspw. Wolff (2005).

<sup>53</sup>Datenbank des PERSEUS-Modellsystems (Program Package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply), vgl. z. B. Perlwitz (2007), Fichtner (1999) oder Rosen (2008).

Tab. II.4.4.: Aufteilung der installierten Leistung verschiedener Kraftwerkstypen in Deutschland entsprechend der PERSEUS-Datenbank (aufgenommen sind nur Kraftwerke mit einer installierten Leistung, die größer als 70 MW ist)

	MW	Anteil
Dampfkraftwerk fossil	91.000	65%
Gasturbine fossil	3.000	2%
GuD fossil	12.000	9%
Kernkraftwerk	27.000	19%
Wasserkraftwerk	4.000	3%
Windkraftwerk	3.000	2%
SUMME	140.000	100%

überwiegend Stein- und Braunkohle aber auch Erdgas sowie Erdöl zum Einsatz. Die damit einher gehenden Verbrennungsprozesse müssen adäquat im Modell abgebildet werden, um die entstehenden Emissionen abschätzen zu können (vgl. Abschnitt II.4.1.1). Weiterhin stellt die Energieversorgung durch Kernkraftwerke, die ebenfalls Wasserdampf als Arbeitsmedium nutzen, mit 19% einen weiteren großen Anteil der installierten Leistung dar. Die Energieumwandlung durch Gasturbinen, Wasser- und Windkraftwerke nimmt in dieser Darstellung nur einen geringen Stellenwert ein. Vor allem bei der Windkraft kommt jedoch zum Tragen, dass in der Datenbank nicht einzelne Anlagen ausgewiesen sind, da diese mit einer Kapazität von zwei bis fünf Megawatt nur in großen Verbänden die 70 MW-Schwelle erreichen. Somit sind nur ca. 14% der installierten Leistung der Windkraft in der Datenbank ausgewiesen.<sup>54</sup> Auch die Photovoltaik-Anlagen, die vornehmlich dezentral auf Hausdächern privater Personen installiert sind, unterliegen diesen Gegebenheiten und sind deshalb nicht abgebildet. Da der vorgestellte Ansatz zur Modellierung der Industrie die aktorsbasierte Simulation einzelner Werke beinhaltet (vgl. Kapitel II.2), können auch nur die in der Datenbank erfassten zur Simulation der Investitionsentscheidungen verwendet werden. Hierauf wird im Abschnitt II.4.4.3 genauer eingegangen.

<sup>54</sup>Nach BMU (2010) betrug die installierte Leistung von Windkraftanlagen im Jahre 2008 23.897 MW.

Tab. II.4.5.: Aufteilung der installierten Leistung verschiedener Energieträger in Deutschland entsprechend der angegebenen Quellen und Datenbanken

	<b>UBA 2011</b>	<b>PERSEUS</b>	<b>Modell</b>
Einheit	MW/MW	MW/MW	MW/MW
Kernenergie	21%	19%	20%
Steinkohle	26%	26%	28%
Braunkohle	20%	26%	25%
Erdgas/Öl	23%	22%	19%
Wasserkraft	7%	2%	4%
Windkraft	1%	3%	3%
Sonstige	3%	2%	-
SUMME	100%	100%	100%
abgedeckte Leistung [MW]	104.000	142.000	110.000

Tabelle II.4.5 zeigt die Unterschiede bezüglich der prozentualen Energieträgeraufteilung der im Modell verwendeten Datenbank zu der PERSEUS-Datenbank sowie zu der vom Umweltbundesamt (UBA) im Jahre 2011 festgehaltenen Kraftwerksliste<sup>55</sup> in Deutschland (Umweltbundesamt (2011)). Die Unterschiede der PERSEUS-Datenbank zu der im Modell verwendeten ergeben sich neben kleineren vorgenommenen Vereinfachungen im Wesentlichen aus der Tatsache, dass bei ersterer auch bereits stillgelegte Kraftwerke aufgeführt sind.

Insgesamt lässt sich aus der Tabelle erkennen, dass die beiden untersuchten Datenbanken (UBA und PERSEUS) eine ähnliche Aufteilung der in Deutschland zur Stromerzeugung eingesetzten Energieträger wiedergeben. Auf Grund der Dezentralität der Anlagen wird vor allem die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien nur unzureichend abgebildet. Um eine Aussage über die vernachlässigte Kapazität von Strom aus Erneuerbaren Energien machen zu können, kann der vom Umweltbundesamt im Jahre 2008 festgestellte Strommix Umweltbundesamt (2010c), basierend auf der tatsächlich eingespeisten Energie, herangezogen werden. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit muss die installierte Leistung der PERSEUS- bzw. der Modell-Datenbank mit den durchschnittlichen Volllast-

<sup>55</sup>Diese Liste enthält nur Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Bruttoleistung von über 100 MW.

Tab. II.4.6.: Durchschnittliche Volllaststunden der Kraftwerkstypen, nach Konstantin (2009)

	Volllaststunden [h/a]
Dampfkraftwerk Braunkohle	8.250
Dampfkraftwerk Steinkohle	7.500
Gasturbine fossil	1.000
GuD fossil	7.500
Kernkraftwerk	7.500
Wasserkraftwerk	5.000
Windkraftwerk	3.500

stunden (siehe Tabelle II.4.6) der einzelnen Kraftwerkstypen pro Jahr multipliziert werden (vgl. Grund- und Spitzenlastkraftwerke im Kapitel II.4.4.1 und Konstantin (2009)). Vor allem bei der Windkraft haben die Umgebungsbedingungen einen großen Einfluss auf die tatsächliche Energieeinspeisung, weswegen die angegebenen Werte nur als Richtwerte zu sehen sind. Die aufgezeigten Volllaststunden werden ebenfalls modellseitig zur Umrechnung der durch das IOM bestimmten Nachfrage nach Energie, angegeben in TJ, in die benötigte Kraftwerkskapazität, angegeben in MW, verwendet.

Aus Tabelle II.4.7 wird nun ersichtlich, dass die erneuerbaren Energien im festgestellten Strommix des UBA ca. 17% darstellen, während durch die im Modell verwendete Datenbank lediglich 7% abgedeckt sind.<sup>56</sup> Somit müssen die Abweichungen der zur aktorsbasierten Simulation verwendeten Datenbank vor allem in Bezug auf die Erneuerbaren Energien im Modell entsprechend berücksichtigt werden, um den Strommix adäquat abzubilden (siehe Kapitel II.4.4.3).

Um modellseitig Vereinfachungen vornehmen zu können, wird der Kraftwerkspark in Deutschland hinsichtlich der Zubaumöglichkeiten untersucht. So kann beispielsweise der Leitstudie von Nitsch (2008) entnommen werden, dass die Schätzungen des Zubaus Erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2030 sich im Wesentlichen auf Offshore-Windkraftanlagen berufen, während hingegen dem Zubau

<sup>56</sup>Der Absolutwert der insgesamt eingespeisten Energie wird in der Quelle des Umweltbundesamtes nicht angegeben, weshalb der genaue Bezugspunkt nicht klar ist.

Tab. II.4.7.: Aufteilung der (theoretisch) eingespeisten Energie nach verschiedenen Energieträgern in Deutschland entsprechend der angegebenen Quellen und Datenbanken

	<b>UBA 2010</b>	<b>PERSEUS</b>	<b>Modell</b>
Einheit	MWh/MWh	MWh/MWh	MWh/MWh
Kernenergie	23%	19%	20%
Steinkohle	19%	25%	28%
Braunkohle	23%	28%	25%
Erdgas/Öl	14%	22%	19%
Wasserkraft	3%	3%	4%
Windkraft	7%	2%	3%
Biomasse	7%	-	-
Photovoltaik	1%	-	-
Sonstige	3%	-	-
SUMME	100%	100%	100%
abgedeckte Energie [TJ/a]	-	3.346.000	2.725.000

im Bereich der Photovoltaik-Anlagen sowie der Biomasse- und Wasserkraftwerke eher stagnierende Tendenzen attestiert werden. Ragwitz u. a. (2005) kommen zu einer ähnlichen Aussage. Eine Veröffentlichung des Umweltbundesamtes bestätigt die beschränkten Zubaumöglichkeiten der Windenergie an Land, begründet durch relativ strenge Abstandsanforderungen zur Wohnbebauung, die das zur Verfügung stehende Flächenpotenzial an windgünstigen Standorten erheblich schmälern sowie durch Höhenbegrenzungen, die Einfluss auf die Effizienz der Anlagen haben.<sup>57</sup> Die Veröffentlichung weist jedoch gleichzeitig auf die umfassenden Möglichkeiten des Repowering, also die Erneuerung älterer Windkraftanlagen, hin, mit dem eine Verdreifachung der bereits installierten Leistung möglich ist insoweit die gesetzlichen Beschränkungen dies zulassen. Bezüglich der Offshore-Anlagen hat das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bereits jetzt Genehmigungen für den Bau und Betrieb von Windkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 4.227 MW erteilt (Klinski u. a. (2007)).

<sup>57</sup>Die Erhöhung der Nabenhöhe des Rotors um einen Meter führt zu ca. einem Prozent Mehrertrag (Klinski u. a. (2007)).

Die gegenüber der Windkraft als eher gering eingeschätzten Wachstumsraten von Wasserkraft-, Biomassekraftwerken und Photovoltaik-Anlagen zur Stromerzeugung sind vor allem den folgenden Gründen geschuldet. Bei ersteren ist die Beeinträchtigung der Flusslandschaft bei einem Kraftwerksneubau hervorzuheben. Biomassekraftwerke hingegen dienen hauptsächlich der Wärmeerzeugung (vgl. bspw. Daten aus BMU (2010)). Die Hemmnisse der Verbreitung von Photovoltaik-Anlagen sind auf deren hohe Investitionen zurückzuführen (Konstantin (2009)).

Ein wesentlicher Treiber des Ausbaus Erneuerbarer Energien ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz<sup>58</sup>, in dem die Vergütungen seitens des Staates für die einzelnen Kraftwerkstypen geregelt sind. Die Unterscheidung in Anfangs- und Grundvergütung wird dabei ebenfalls im Modell berücksichtigt.

### II.4.4.3. Umsetzung im Modell

Ziel der Modellierung des Energiesektors ist die geeignete Abbildung der entstehenden Emissionen, die im Wesentlichen vom eingesetzten Strommix sowie vom Stromverbrauch der anderen betrachteten Sektoren abhängen.

Die anlagenbezogenen Emissionen im Energiesektor sind fast ausschließlich feuerungsbedingt und werden dementsprechend modelliert. Im Gegensatz zu den anderen bereits betrachteten Sektoren ist es hier ausreichend, nur einen Prozessschritt, nämlich den der Feuerung, im Modell abzubilden. Die mit der Verbrennung einhergehenden Emissionen und deren Minderungsmöglichkeiten wurden in den Abschnitten II.4.1.1 und II.4.1.2 bereits ausführlich erläutert. Über den im Kraftwerk verwendeten Brennstoffmix wird die Vorleistungsmatrix des IOM beeinflusst und eine Nachfrage in den entsprechenden Produktionsbereichen nach bspw. Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Erdöl oder Uran generiert. Die im Kraftwerkssektor verfügbaren Emissionsminderungsmaßnahmen sind in Tabelle II.4.8 aufgeführt. Die angegebenen Investitionsdaten teilen sich dabei in einen fixen kapazitätsunabhängigen Teil  $ci_{fix}^m$  und einen variablen Teil  $ci_{var}^m$ , abhängig von der

<sup>58</sup>Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das zuletzt durch das Gesetz vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1170) geändert worden ist.

installierten Leistung. Die gesamten Investitionen pro EMM werden mit der Formel II.2.17 berechnet, wobei sich der variable Investitionsanteil auf die Kapazität der entsprechenden Anlage in kW bezieht.

Die Werte entstammen im Wesentlichen EGTEI (2004), Investitionsdaten für die CCS-Technologie<sup>59</sup> lassen sich beispielsweise in Global CCS Institute (2009) und IEA (2008) finden. Im Modell wird der variable Investitionsteil der CCS-Technologie mit 2.500 EUR/kW angenommen. Diese spielt in der aktuellen CO<sub>2</sub>-Diskussion eine wesentliche Rolle, da durch die Speicherung und langzeitige Lagerung des Treibhausgases ein Großteil der Emissionen in die Luft vermieden werden kann, jedoch zu sehr hohen Kosten. Modellseitig wird in der Simulation untersucht, ob die hohen Investitionen und die damit einher gehenden Kosten wirtschaftliche Entscheider von der Implementierung dieser Maßnahme abhalten oder die Emissionseinsparpotentiale den Einsatz in Kraftwerken rechtfertigen. Es wird davon ausgegangen, dass die Technologie nicht vor 2020 verfügbar ist und somit erstmalig zu diesem Zeitpunkt implementiert werden kann.

Im Falle der Stromerzeugung über Erneuerbare Energieträger kann ein einfacher Modellierungsansatz gewählt werden. Da angenommen wird, dass diese keine anlagenbezogenen Emissionen bedingen, genügt es prinzipiell festzustellen, wie viel Kapazität durch Verfahren zur Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, um den Einfluss auf die Gesamtemissionen des Strommixes abschätzen zu können. Hierzu wird die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland zusammengefasst in einem fiktiven Werk mit der entsprechenden Gesamtkapazität abgebildet und ein vordefiniertes Wachstum pro Jahr eingestellt. Da allerdings im vorangegangenen Kapitel bereits die Windkraft als dominierende Technologie für die in Deutschland gegebenen Rahmenbedingungen identifiziert wurde und große Windparks in der verwendeten Datenbank als Akteure gelistet sind, wird diese, getrennt von den zu einem fiktiven Werk zusammengefassten Erneuerbaren Energien, explizit modelliert.<sup>60</sup> Um eine konsistente Datenbasis zu ge-

---

<sup>59</sup>CCS: Carbon capture and storage.

<sup>60</sup>Wasserkraftwerke können bezüglich ihrer großen Kapazität zwar auch als Akteure modelliert werden, jedoch haben diese auf Grund ihrer langen Lebensdauer und den äußerst beschränkten Zubbaumöglichkeiten nahezu keinen Einfluss bei der Modellierung der Technologiediffusion.

Tab. II.4.8.: Verwendete Investitionsdaten der EMM im Energiesektor, unterteilt nach Brennstoffen

Brennstoff	Schadstoff	Maßnahmentyp	Minderung	Investitionen	
				$I_{fix}$	$I_{var}$
				[EUR]	[EUR/kW]
Steinkohle	NO <sub>x</sub>	primäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen	30%	780.000	2
		sekundäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen	75%	5.000.000	6
	SO <sub>2</sub>	Rauchgasentschwefelung	85%	12.101.000	44
		Staub	ESP 1 Feld	96,2%	280.060
	ESP 2 Feld		99,3%	350.020	5
	ESP 3 Feld		99,8%	388.960	6
	Gewebefilter		99,9%	233.310	9
	Zyklon		77%	111.980	2
	Nasswäscher		99,3%	350.200	6
	Braunkohle	NO <sub>x</sub>	primäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen	30%	1.000.000
sekundäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen			75%	5.700.000	8
SO <sub>2</sub>		Rauchgasentschwefelung	85%	12.101.000	44
		Staub	ESP 1 Feld	96%	280.060
ESP 2 Feld			99,3%	350.020	5
ESP 3 Feld			99,9%	388.960	6
Gewebefilter			99,9%	233.310	9
Zyklon			77%	111.980	2
Nasswäscher			99,2%	350.200	6
Erdgas		NO <sub>x</sub>	primäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen	40%	560.000
	sekundäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen		75%	4.300.000	5
Erdöl	NO <sub>x</sub>	primäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen	20%	600.000	2
		sekundäre NO <sub>x</sub> -Maßnahmen	75%	4.300.000	5
	SO <sub>2</sub>	Rauchgasentschwefelung	85%	12.101.000	44
		Staub	ESP 1 Feld	94%	280.060
	ESP 2 Feld		96,8%	350.020	5
	ESP 3 Feld		99,2%	388.960	6
	Gewebefilter		99,2%	233.310	9
	Zyklon		56%	111.980	2
Good housekeeping	30%		0	2	
-	CO <sub>2</sub>	CCS	95%	0	2.500

währleisten, wird die installierte Leistung an Erneuerbaren Energien von 2000 bis 2009 (vgl. BMU (2010)) als Zeitreihe in dem fiktiven Werk abgebildet und die Kapazität, die durch die aktorsbasierte Simulation bereits abgedeckt ist, herausgerechnet. Bereits geplante Offshore-Windkraftanlagen erweitern, soweit Informationen verfügbar sind, gemäß ihrem geplanten Inbetriebnahmedatum die Kapazität des fiktiven Werkes. Ab dem Jahr 2010 wird für dieses ein verhältnismäßig geringes jährliches Wachstum von 1% angenommen, da die eigentliche Technologiediffusion in der aktorsbasierten Simulation, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, modelliert wird.

Wenn Kraftwerke auf Grund des Erreichens Ihrer maximalen Lebensdauer oder im Falle des Atomausstiegs auf Grund politischer Regelungen abgeschaltet werden, muss die fehlende Kapazität durch neue Kraftwerke bereitgestellt werden. Bei der Modellierung dieses Aspekts wird davon ausgegangen, dass maßgeblich dieselbe Technologie, also dieselben Referenzprozesse, wie die des zuvor abgeschalteten Kraftwerks verwendet wird. Dieser Sachverhalt wird um zwei weitere wichtige Ergänzungen erweitert. Zum einen dürfen auf Grund der aktuellen Gesetzgebung keine Kernkraftwerke erneuert werden, zum anderen müssen die wirtschaftlichen Entscheidungen hinsichtlich dem Ausbau der erneuerbaren Energien abgebildet werden. Die Entscheidungen zur Investition in erneuerbare Energien sind langfristiger, strategischer Natur und obliegen weniger einem einzelnen Werk als dem übergeordneten Konzern, dem sie angehören. Demzufolge wird im Modellaufbau eine Konzern-Struktur zwischen die Ebene der Werke und der Sektoren eingeführt (vgl. Kapitel II.2). Ein Konzern umfasst dabei mehrere Werke, wobei ein Sektor wiederum aus mehreren Konzernen besteht. Während das Werk Investitionsentscheidungen bezüglich Emissionsminderungsmaßnahmen vornimmt, bildet der Konzern die Entscheidungsinstanz bei der Technologiewahl. Einem Konzern obliegt somit die Entscheidung, inwieweit erneuerbare Energien in Form der zugehörigen Referenzprozesse ein abgeschaltetes Kraftwerk ersetzen. Zur Modellierung der Technologiediffusion der erneuerbaren Energien stehen im Rahmen der Investitionsentscheidung beim Kraftwerksneubau (vgl. Abschnitt II.2.2.4) drei Alternativen zur

Auswahl. Die erste Alternative ist, mit Ausnahme der Kernenergie, lediglich durch die zuvor eingesetzte Technologie mit der gleichen Kapazität gekennzeichnet und entspricht somit einer Erneuerung der betroffenen Anlagen. Die zweite Alternative beinhaltet den Ersatz von 20% der Ausgangskapazität durch Erneuerbare Energien in Form von Windkraftanlagen. Die dritte Alternative stellt eine Erweiterung der zweiten mit einem Anteil Erneuerbarer Energien von 40% dar. Die zu treffende Entscheidung muss zukünftige Zahlungsströme, unter die auch Vergütungen für das Einspeisen von Strom aus Erneuerbaren Energien<sup>61</sup> fallen, berücksichtigen. Damit ein Konzern als Akteur die Auswahl der Pakete auf einer langfristigen Basis gründen kann, wird ein dynamisches Verfahren zur Investitionsentscheidung, das Kapitalwertkriterium, herangezogen (vgl. Abschnitt II.2.2.4). Es wird also das Paket gewählt, welches mit dem höchsten Kapitalwert verbunden ist. Dieses stellt unter Berücksichtigung der zukünftigen Einzahlungen, bestehend aus dem Verkauf des Produktes Elektrizität bzw. dem Erhalt von Vergütungen, sowie der in Abschnitt II.2.2.1 beschriebenen Kosten die ökonomisch beste Alternative dar.

Erreichen die Anlagen eines als Akteur modellierten Windparks das Ende ihrer Lebensdauer<sup>62</sup>, so muss für diese die Investitionsentscheidung angepasst werden. Da ein Ersatz Erneuerbarer Energien durch andere Kraftwerkstechnologien nicht zur Option stehen soll, wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass ein Repowering stattfindet und die Kapazität des Windparks dadurch verdreifacht wird (vgl. Klinski u. a. (2007)). So kann die Technologiediffusion der Erneuerbaren Energien im Energiesektor hinreichend genau abgebildet werden.

Um die Marktsimulation (vgl. Abschnitt II.2.3) und damit die Zuteilung des einzuspeisenden Stroms auf die Kapazitäten der Werke realistisch zu gestalten, muss der Energiesektor weiter unterteilt werden. Da Strom aus Erneuerbaren Energien vorrangig in das Elektrizitätsnetz eingespeist wird, werden die entsprechenden Werke vor der eigentlichen Marktsimulation voll ausgelastet. Weiterhin werden die

---

<sup>61</sup>Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das zuletzt durch das Gesetz vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1170) geändert worden ist.

<sup>62</sup>Für das fiktive Werk, welches die Kapazitäten der nicht als Akteure modellierten Werke enthält, wird eine unbeschränkte Lebensdauer angenommen.

verbleibenden Kraftwerke in Grund- und Spitzenlastkraftwerke eingeteilt.<sup>63</sup> Die Nachfrage nach Energie wird dabei so aufgeteilt, dass 82% der Gesamtnachfrage auf Grundlastkraftwerke entfällt und 18% auf Spitzenlastkraftwerke. Die Zuteilung der bereitzustellenden Energie innerhalb dieser zwei Gruppen erfolgt analog zu der Marktsimulation der anderen Sektoren.

---

<sup>63</sup>Es wird vereinfachend angenommen, dass Braunkohle-, Steinkohle- und Kernkraftwerke als Grundlast- und die restlichen als Spitzenlastkraftwerke klassifiziert werden können.

## **II.5. Definition der Szenarios**

Ein Szenario setzt sich aus der Definition von *Rahmenbedingungen*, die hauptsächlich wirtschaftliche Parameter umfassen und als gegeben, d. h. für alle Variationen der Instrumente gleich angenommen werden und dem zu untersuchenden *Instrumentenbündel* zusammen.

Bevor auf die einzelnen untersuchten Szenarios eingegangen wird, werden zuvor die betrachteten Instrumente in ihrer Wirkungsweise untersucht. Diese beeinflussen unterschiedliche Parameter des Modells und schaffen so Anreize bezüglich der Investitionsentscheidungen in Emissionsminderungsmaßnahmen. Im Fokus stehen das Verändern der Emissionsgrenzwerte, das Einführen eines Zertifikatehandels für bestimmte Schadstoffe, das Verändern der Ökosteuer sowie Produktionsstandards. Anschließend wird ausgehend von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und den zur Verfügung stehenden Instrumenten ein Basisszenario definiert sowie die untersuchten Ausprägungen der beschriebenen Instrumente aufgezeigt.

### **II.5.1. Instrumente und deren Wirkung**

#### **II.5.1.1. Emissionsgrenzwerte**

In Anlehnung an die TA Luft, an der sich die Grenzwerte für das Basisszenario orientieren, besteht im Modell die Möglichkeit, allgemeine Grenzwerte und spezielle Grenzwerte für bestimmte Anlagen zu definieren. Weiterhin sind spezielle Grenzwerte in Abhängigkeit der eingesetzten Brennstoffe definiert. Diese gehen für Großfeuerungsanlagen auf die Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen (13. BImSchV) zurück. Sofern Ersatzbrennstoffe eingesetzt werden,

fließen auch Vorgaben aus der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV) ein. Die Grenzwerte sind als Konzentrationsgrenzwerte in  $\text{g/m}^3$  angegeben. Die TA Luft führt weiterhin Grenzwerte für Massenströme in  $\text{g/h}$  auf, die alternativ zu den Konzentrationsgrenzwerten eingehalten werden können. Die Grenzwerte sind jedoch so niedrig, dass sie für Werke in der Größenordnung, wie sie im Modell abgebildet sind, nicht von Relevanz sind. Daher wird auf die Abbildung dieser Grenzwerte verzichtet.

Die Einhaltung der Grenzwerte wird für jede Anlage, also nicht für das Werk als Ganzes, überprüft. Ist für eine Anlage ein spezieller Grenzwert definiert, so ist dieser einzuhalten, andernfalls der allgemeine Grenzwert.

$$GW_p^{a,t} = \begin{cases} GW_{p,t}^{\text{speziell}} & \text{wenn } \exists GW^{\text{speziell}} \text{ für } a \\ GW_{p,t}^{\text{allgemein}} & \text{sonst} \end{cases} \quad [\text{II.5.1}]$$

Die Überschreitung eines Grenzwertes ist in der Realität mit Strafen verbunden, die von Fall zu Fall unterschiedlich sind und von den lokalen Gegebenheiten abhängen. Es besteht die Möglichkeit, eine solche Strafe in Form einer Strafzahlung zu modellieren und als weitere Position den umweltbedingten Kosten zuzurechnen, was eine Erweiterung der Gleichung II.2.25 bedeuten würde.

$$\begin{aligned} K_{5,p}^{s,w,t} &= ES_p^t \cdot E_p^{s,w,t} \\ &+ EZ_p^t \cdot E_p^{s,w,t} \\ &+ E\text{Strafe}_p^t \cdot \sum_a \max\left(0, \frac{E_p^{s,w,a,t}}{Agv^{s,w,a,t}} - GW_p^{a,t}\right) \quad \forall p \end{aligned}$$

Der hier gewählte Ansatz sieht jedoch keine Strafzahlung bei Überschreitung der Grenzwerte vor, sondern bildet den Entzug der Betriebsgenehmigung durch künstliche Minderung der Marktchancen, welche durch den Rangwert  $RW$  beschrieben werden, ab (vgl. Kapitel II.2.2.1). Da der Rangwert ohne Strafterm nur Werte im Intervall  $[0,1]$ , der zusätzliche Strafterm jedoch auch Werte, die deutlich

größer sind als 1, annehmen kann (vgl. Gleichung II.2.35), beeinflusst eine Grenzwertverschärfung das Investitionsverhalten der modellierten Akteure sehr stark.

### **II.5.1.2. Zertifikatehandel und Schadstoffsteuern**

Im Gegensatz zur Modellierung der Grenzwerte wirken sich die zu erwerbenden Zertifikate sowie die zu zahlenden Schadstoffsteuern auf die Kosten eines Werkes aus und sind proportional zu den verursachten Emissionen (vgl. Gleichung II.2.25). Prinzipiell wird der Preis eines Zertifikates über den Marktmechanismus bestimmt. Da dieser jedoch innerhalb der akteursbasierten Simulation nicht ohne Weiteres bestimmt werden kann, wird in verschiedenen Szenarios jeweils ein fixer Preis festgelegt, der somit analog zu einer Schadstoffsteuer wirkt.

Über die durch die zusätzlichen Umweltausgaben erhöhten Stückkosten wird der Rangwert eines Werkes verschlechtert (vgl. Kapitel II.2.3), weshalb die Werke mit einem hohen Ausstoß des betreffenden Schadstoffs einen größeren Anreiz haben ihren Rangwert zu verbessern. Demzufolge werden tendenziell Emissionsminderungsmaßnahmen mit höheren Investitionsausgaben und gleichzeitig höheren Minderungsleistungen präferiert (vgl. Formel II.2.38), was sich wiederum auf die Technologiediffusion auswirkt.

Die Umweltausgaben der einzelnen Werke werden über den jeweiligen Sektor aggregiert und zu der sektorspezifischen Produktionsmenge in Beziehung gesetzt. Hieraus ergibt sich eine Kostensteigerung bezogen auf die hergestellte Menge, die die Koeffizienten der Input-Output-Tabelle beeinflusst und zu einer Preissteigerung der entsprechenden Produkte führt (vgl. Abschnitt II.3.2.3).

Auf diese Weise werden beide Effekte des Einführens eines Zertifikatehandels bzw. einer Schadstoffsteuer abgebildet. Zum einen wird ein Anreiz zur Implementierung fortschrittlicher Emissionsminderungsmaßnahmen induziert und auf diese Weise Emissionen gesenkt, zum anderen wird durch eine eventuelle Verteuerung der Produkte Einfluss auf die wirtschaftliche Preisbildung und somit die nationalen Produktionsmengen genommen. Diese beiden Effekte werden im Rahmen der Untersuchung der Szenarios gegenübergestellt und evaluiert.

### II.5.1.3. Ökosteuer

Die Ökosteuer umfasst die Energie-<sup>1</sup> und die Stromsteuer<sup>2</sup> und ist in Form von Gütersteuern auf Energieträger implementiert. Es werden verschiedene Steuersätze für Industriesektoren und private Nutzer unterschieden, die aus den entsprechenden Gesetzestexten hervorgehen. So zahlen beispielsweise energieintensive Unternehmen deutlich niedrigere Steuersätze auf Energieträger als Unternehmen anderer Branchen. Somit ist es notwendig, die Gütersteuersätze produktionsbereichsspezifisch zu unterscheiden (vgl. hierzu auch Abschnitt II.2.2.1).

Eine Änderung der Ökosteuer führt, ähnlich wie die Einführung von Schadstoffsteuern oder eines Zertifikatehandels, zu einer Änderung der Stückkosten und damit des Rangwertes. Anstelle der umweltbezogenen Kosten werden hier allerdings direkt die Gütersteuern adressiert. Auch hier führt also eine Erhöhung der Steuer tendenziell zu vermehrten Investitionen in Emissionsminderungsmaßnahmen.

### II.5.1.4. Produktionsstandards

Produktionsstandards gehen auf die IVU-Richtlinie und die BVT-Merkblätter zurück (vgl. Abschnitt I.2.2.2). Es wird gefordert, dass die Umweltauswirkungen neuer Anlagen dem Stand der Technik entsprechen. Dies wird im Modell auf zwei Arten gewährleistet. Einerseits wird bei einem Anlagenneubau die neueste, also zum Zeitpunkt des Neubaus dem Stand der Technik entsprechende Anlage gewählt, andererseits wird auch gewährleistet, dass diese mit entsprechenden Emissionsminderungsmaßnahmen ausgerüstet ist. Da diese Emissionsminderungsmaßnahmen im Gegensatz zur Startkonfiguration (vgl. bspw. Abschnitt II.4.2.3) nicht ex ante vorgegeben werden können und sollen, bekommen die Akteure bei einem Anlagenneubau die Möglichkeit in eine bestimmte Anzahl an Emissionsminderungsmaßnahmen zu investieren und so ihren Rangwert zu verbessern. Da bei einer

---

<sup>1</sup>Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 1. März 2011 (BGBl. I S. 282) geändert worden ist.

<sup>2</sup>Stromsteuergesetz vom 24. März 1999 (BGBl. I S. 378), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 1. März 2011 (BGBl. I S. 282) geändert worden ist.

Anlage ohne Minderungsmaßnahmen die Überschreitungen der jeweiligen schadstoffbezogenen Grenzwerte bzw. die Stückkosten durch zu ersteigende Zertifikate bzw. zu zahlende Steuern sehr hoch sind und damit der Rangwert des betroffenen Werkes sehr schlecht ist, werden die Akteure dazu veranlasst, für jeden Schadstoff mindestens eine Maßnahme zu implementieren.

## II.5.2. Rahmenbedingungen

Um die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu schaffen, in denen sich die akteursbasierte Simulation bewegt, gehen verschiedene Größen exogen in das Modell ein. Die im Rahmen der untersuchten Szenarios für die Analyse der Instrumente verwendeten wirtschaftlichen Daten werden in diesem Abschnitt beschrieben.

### Energie- und Rohstoffpreise

Eine wesentliche Einflussgröße auf die Entwicklung der wirtschaftlichen Tätigkeiten stellen die *Energie- und Rohstoffpreise* auf dem Weltmarkt dar. Diese nehmen über den Import von Waren und Rohstoffen Einfluss auf das Preisniveau im Inland und bestimmen maßgeblich die Kosten der Produktion. Zur Abbildung der Energie- und Rohstoffpreise wird der Index der Einfuhrpreise, der vom Statistischen Bundesamt herausgegeben wird, herangezogen. Dieser Index ist für alle 65 Güter des Input-Output-Modells (IOM) zu hinterlegen. Die Preisverläufe der Szenarios beruhen auf verschiedenen Prognosen nationaler und internationaler Einrichtungen zur Entwicklung der Preise. Die Preisschätzungen werden in einen Index umgerechnet, fehlende Werte werden linear interpoliert bzw. extrapoliert, falls Schätzungen bis 2030 nicht vorliegen.

Für die Entwicklung der Brennstoffpreise wird das Referenzszenario der EU Energy Trends<sup>3</sup> zugrunde gelegt, das bereits Auswirkungen der Weltwirtschaftskrise einbezieht. Die Brennstoffpreise steigen demnach über die Projektionsperiode bis 2030 an, wobei die Rohölpreise ausgehend von einem Preis

---

<sup>3</sup>Capros u. a. (2010).

von 50 EUR/bbl<sup>4</sup> im Jahr 2011 über 73 EUR/bbl im Jahr 2020 auf 91 EUR/bbl im Jahr 2030 steigen.<sup>5</sup> Die Gaspreise folgen einem ähnlichen Preisverlauf mit 31 EUR/boe<sup>6</sup> im Jahr 2011, 51 EUR/boe für 2020 und 66 EUR/boe 2030. Für Kohlepreise wird zunächst ein moderater Anstieg von 17 EUR/boe im Jahr 2011 auf 26 EUR/boe im Jahr 2020 angenommen, worauf eine Stabilisierung bis 2030 bei einem Wert von 29 EUR/boe erfolgt. Die Projektionen liegen geringfügig unter den Angaben im World Energy Outlook 2009 der International Energy Agency (IEA).<sup>7</sup> Die Berechnung des Strompreis-Einfuhrindex basiert ebenfalls auf Prognosen der EU Energy Trends. Hier wurde der Preisanstieg für Elektrizität nach Steuern für Industriekunden verwendet, der ausgehend von 59 EUR/MWh im Jahr 2000 stetig anwächst auf 104 EUR/MWh für 2025 und zuletzt für das Ende der Betrachtungsperiode wieder auf 98 EUR/MWh absinkt.<sup>8</sup>

Für die Preisentwicklung der verbleibenden Rohstoffe, unter die Agrarprodukte inklusive Fischerei und Erze sowie Steine und Erden fallen, werden die Prognosen der Weltbank verwendet.<sup>9</sup>

Für Handelswaren wurden mit Hilfe einer Regressionsanalyse Abhängigkeiten von den Roh- und Brennstoffindizes ermittelt, anhand derer die Indizes der Handelswaren fortgeschrieben werden.

## Arbeitsproduktivität

Die *Arbeitsproduktivität* geht als wesentlicher Treiber für das Wirtschaftswachstum in die Modellierung ein. Es wird von konstanten Wachstumsraten ausgegangen, die für jeden Produktionsbereich individuell abgeschätzt werden. Die Schätzung orientiert sich dabei an Prognosen vom Statistischen Bundesamt und wurde so kalibriert, dass eine Steigerung der Summe der Produktionswerte von 19% von

---

<sup>4</sup>bbl: Barrel.

<sup>5</sup>Alle Preise sind als reale Preise zur Basis 2008 angegeben.

<sup>6</sup>boe: Barrels of oil equivalent.

<sup>7</sup>Siehe IEA (2009).

<sup>8</sup>In realen Preisen des Jahres 2005.

<sup>9</sup>Siehe World Bank (2010b,a).

2001 bis 2030 bzw. eine jährliche Wachstumsrate von etwa 1% über den gleichen Zeitraum erreicht wird.

### Weitere exogene Vorgaben

Der *staatliche Konsum* sowie die *Exportnachfrage* werden exogen vorgegeben. Es wird eine lineare Fortschreibung der Werte, wie sie aus der IO-Tabelle für die Jahre 2000 bis 2006 hervorgehen, angenommen.

Der *Anteil der importierten Güter* am gesamten Aufkommen wird für alle Güter konstant gehalten.

Der *Zinssatz*, der ausschließlich in die Berechnung der Kapitalwerte einfließt, wird für alle Szenarios konstant bei 2% gehalten.

### Kundenverhalten

Neben den auf das makroökonomische Teilmodell bezogenen Rahmenbedingungen, gibt es weitere, die die Entscheidungen der Akteure des Industriesimulationsmodells direkt beeinflussen.

Das *Kundenverhalten* hat einen großen Einfluss auf die Zuteilung der Produktionsmenge (vgl. Abschnitt II.2.2.1). Da dieses kaum prognostiziert werden kann, müssen hier unterschiedliche Ausprägungen der Parameter untersucht werden. Im Basisszenario wird ein vornehmlich ökonomisch orientiertes Kundenverhalten vorausgesetzt. Die Unternehmen legen folglich keinen großen Wert auf eine Minderung ihres Umwelteinflusses, sondern beziehen bei ihren Investitionsentscheidungen hauptsächlich die resultierenden Stückkosten ein. Dies äußert sich durch eine Belegung der Gewichtungsfaktoren zur Bildung des Rangwertes von  $g_{oekonomisch} = 0,9$  und  $g_{oekologisch} = 0,1$ . In drei weiteren Szenarien werden ebenfalls die Kombinationen  $g_{oekonomisch} = 1$  bzw.  $g_{oekologisch} = 0$ ,  $g_{oekonomisch} = 0,5$  bzw.  $g_{oekologisch} = 0,5$  sowie  $g_{oekonomisch} = 0$  bzw.  $g_{oekologisch} = 1$  untersucht, um den Einfluss des Kundenverhaltens auf die Emissionsminderungspolitik der Unternehmen zu testen.

### II.5.3. Instrumentenbündel

Neben den für das Input-Output-Modell vorzugebenden Rahmenbedingungen, die im Wesentlichen den wirtschaftlichen Rahmen der aktorsbasierten Simulation aufspannen, müssen die Instrumentenbündel definiert werden. Diese beeinflussen direkt durch gesetzliche Regelungen (z. B. Grenzwerte) oder indirekt durch eine Änderung der Kostenstruktur der Produzenten (z. B. Zertifikatehandel) das Investitionsverhalten der ökonomisch oder ökologisch agierenden Akteure. Um geeignete Instrumentenbündel im Kontext des Ziels der deutschlandweiten Minderung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen zu identifizieren, werden die einzelnen Instrumente in ihrer Wirkung im Vergleich zu einem Basisszenario untersucht. Hierzu werden auch extreme Ausprägungen der Instrumentenmerkmale herangezogen, um den maximalen Wirkungsspielraum abzuschätzen. Tabelle II.5.1 zeigt die untersuchten Instrumente zusammen mit den gewählten Merkmalsausprägungen. Die einzelnen gelisteten Ausprägungen können beliebig miteinander kombiniert werden. Um jedoch deren Wirkung abschätzen zu können, soll zunächst jeweils nur eine Merkmalsausprägung eines bestimmten Instrumentes variiert werden. Dies gilt auch für das veränderbare Kundenverhalten aus dem vorangegangenen Kapitel. Weiterhin wird aus Gründen der Vergleichbarkeit jede Änderung im Jahre 2012 wirksam.

Das Basisszenario besteht aus den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die für alle Szenarien gleich gehalten werden, der Gewichtung des Kundenverhaltens mit  $g_{oekonomisch} = 0,9$  und  $g_{oekologisch} = 0,1$  sowie den aktuellen umweltpolitischen Rahmenbedingungen bezüglich Grenzwerten und Ökosteuer. Ein Zertifikatehandel findet im Basisszenario nicht statt.

Insgesamt werden für jeden Schadstoff drei verschiedene Ausprägungen der Preise für Emissionszertifikate<sup>10</sup> untersucht. Somit ergeben sich neun Szenarios, deren Ziel die Bewertung dieses politischen Instruments ist. Es wird angenommen, dass neben CO<sub>2</sub> nur ein Zertifikatehandel für NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> realistisch ist.

---

<sup>10</sup>Der Zertifikatehandel kann im Modell mit einer Emissionssteuer gleichgesetzt werden (vgl. Abschnitt II.5.1), weshalb nur dieser stellvertretend für beide Instrumente analysiert wird.

Tab. II.5.1.: Untersuchte Ausprägungen der Instrumentenmerkmale im Rahmen der analysierten Szenarios im Vergleich zum Basisszenario

Instrument	Zertifikatehandel			Grenzwertverschärfung des BImSchG			Ökosteuer	
	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Staub	-	
Wirkungsweise	fester Marktpreis			Verschärfung auf geg. Prozentsatz			Erhöhung	Angleichung
Einheit	EUR/t <sub>Schadstoffemittiert</sub>			-	-	-	-	-
Basisszenario	<i>kein Handel</i>			aktuelle Gesetzgebung (BImSchG, Ökosteuer)				
Ausprägung 1	10	1.000	1.000	25%	25%	25%	200%	gleiche Besteuerung der Energieträger
Ausprägung 2	50	10.000	5.000	50%	50%	50%	500%	-
Ausprägung 3	100	20.000	10.000	75%	75%	75%	-	-

Bezüglich der Grenzwerte werden je Schadstoff drei Ausprägungen analysiert. Die Grenzwerte werden dabei um die in Tabelle II.5.1 aufgeführten Prozentsätze verschärft. Somit wird beispielsweise bei einer 25%-igen Verschärfung der Grenzwert auf 75% des Ursprungswertes gesetzt. Grenzwerte werden für die Schadstoffe NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> sowie Staub untersucht. Die Grenzwerte der Untergruppen PM<sub>10</sub> bzw. PM<sub>2,5</sub> der Staubemissionen werden dabei analog zu diesen verschärft. Es ergeben sich wiederum neun Szenarios, die das Instrument der Grenzwertverschärfung zum Untersuchungsgegenstand haben.

Die Ökosteuer kann modellseitig auf zwei verschiedene Arten verändert werden. Zum einen kann sie auf einen gewissen Prozentsatz erhöht werden, wobei für alle besteuerten Energieträger und alle betroffenen Sektoren die gleiche prozentuale Erhöhung gilt, zum anderen können die der energieintensiven Industrie angelasteten Steuern auf das Niveau der restlichen Sektoren geführt werden. Für die Analyse des Instrumentes Ökosteuer ergeben sich insgesamt drei Szenarios.

Die Wahl der Instrumente und deren Ausprägungen bilden zusammen mit den unterschiedlichen Einstellungen bezüglich des Kundenverhaltens die Stellschrauben zur Analyse der Emissionsverläufe. Insgesamt werden 24 Szenarios mit dem Basisszenario verglichen. Weiterhin sollen auch ausgewählte Instrumentenbündel

untersucht werden. So ist z. B. die Frage zu beantworten, ob ein den CO<sub>2</sub>-Handel ergänzender NO<sub>x</sub>- oder SO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel zusätzliche Anreize zur Emissionsminderung bedingt oder nicht. Dies wird im folgenden Kapitel vorgenommen.

## II.6. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der exemplarischen Anwendung präsentiert. Zunächst werden die Ergebnisse des Basisszenarios dargestellt. Darauf aufbauend wird im Anschluss auf die Änderungen eingegangen, die sich durch die untersuchten Ausprägungen der Instrumentenmerkmale (vgl. Tabelle II.5.1) ergeben.

### II.6.1. Basisszenario

#### II.6.1.1. Wirtschaftliche Entwicklung im Basisszenario

Das Input-Output-Modell bestimmt, wie im vorangegangenen Kapitel II.5 beschrieben, durch die exogenen Vorgaben zu Preisentwicklungen und Arbeitsproduktivität wesentlich die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die aktorsbasierte Simulation in den Sektormodellen.

Für die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland werden die beiden Größen Bruttowertschöpfung als Näherungswert für das BIP und ein Verbraucherpreisindex dargestellt. Abbildung II.6.1 zeigt die Entwicklung der beiden Größen im Basisszenario.

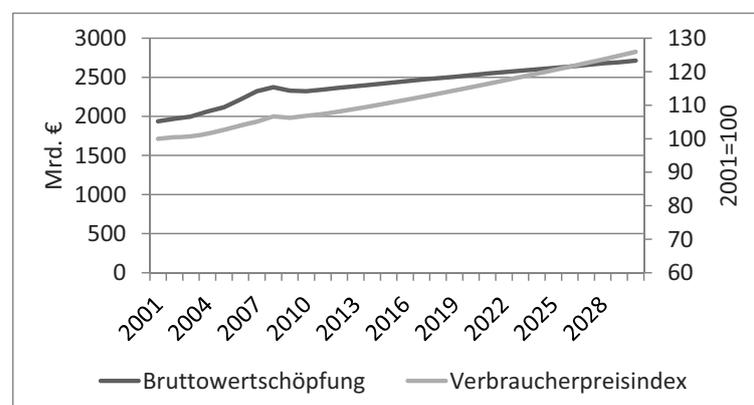


Abb. II.6.1.: Entwicklung makroökonomischer Kenngrößen im Basisszenario

Die Bruttowertschöpfung steigt im Basisszenario zwischen 2001 und 2030 insgesamt um 40,2%, dies entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von 1,17% und stellt damit einen eher moderaten Anstieg dar. Die absoluten Werte für 2001 bis 2006 liegen geringfügig (maximale Abweichung: 5,4% (2006)) über den vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Werten für diesen Zeitraum. Der modellierte Verbraucherpreisindex korreliert stark mit den Ergebnissen für die Bruttowertschöpfung. Er zeigt einen Gesamtanstieg von knapp 26% und eine jährliche Zunahme von 0,80%.

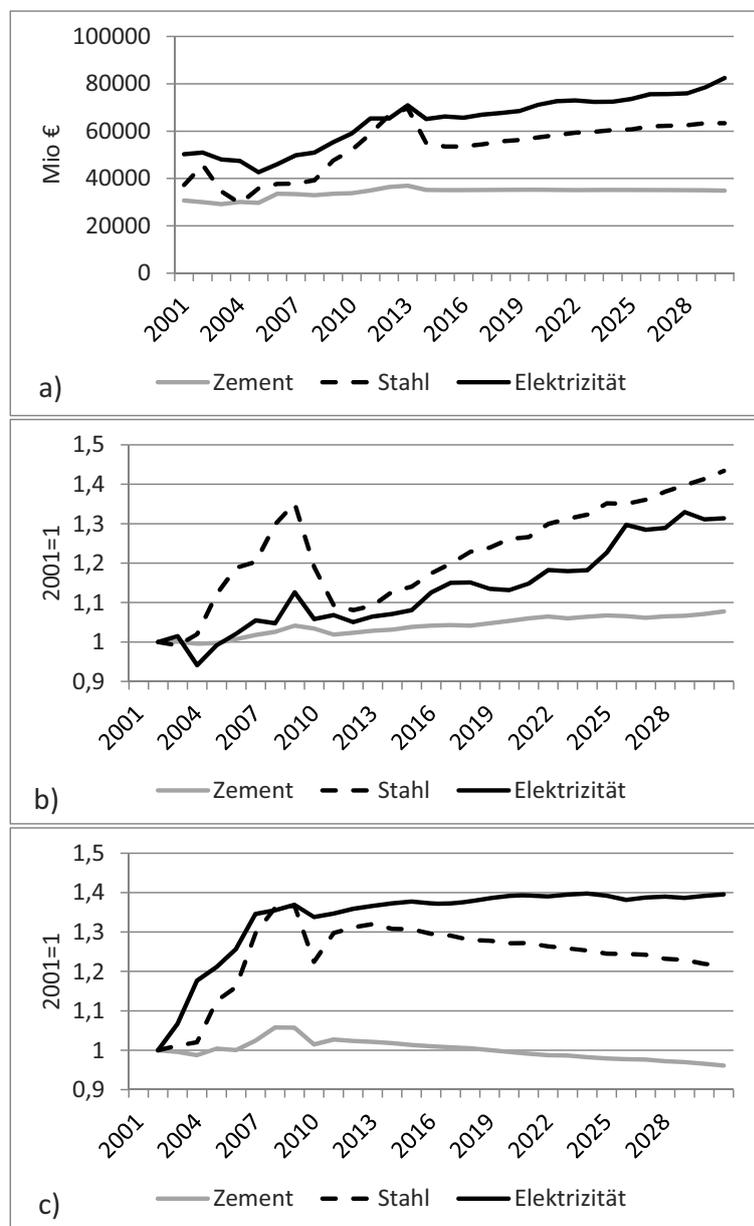


Abb. II.6.2.: Entwicklung der sektorspezifischen Vorgaben im Basisszenario: a) Produktionswerte in Mio. EUR, b) Preisindizes (2001=1), c) Produktionsindizes (2001=1)

Zentrale Eingangsgröße für die Sektormodelle sind die Produktionswerte der einzelnen Sektoren. Diese entwickeln sich analog zur Gesamtsumme der Produktionswerte leicht ansteigend. Die einzelnen Verläufe sind in Abbildung II.6.2a zu sehen. In Verbindung mit den jeweiligen Preisindizes (Abbildung II.6.2b) ergibt sich die Produktion der Güter Zement, Stahl und Elektrizität in den entsprechenden physischen Einheiten. Die Produktionsentwicklung ist in Abbildung II.6.2c als Index (2001=1) dargestellt. Demnach ist nach 2011 im Basisszenario mit einem leichten Rückgang der Stahl- und Zementproduktion zu rechnen. Die Stromproduktion ist nahezu konstant. Auswirkungen der Weltwirtschaftskrise spiegeln sich nur bedingt in den Daten wider.

Die Produktion im Jahr 2001 liegt in den drei Sektoren bei 32,6 Mio. t Zement, 48,3 Mio. t Stahl und 1,5 Mio. TJ elektrischer Energie.

### **II.6.1.2. Basisszenario Zementsektor**

Die Emissionen im Zementsektor sind bereits im Basisszenario leicht rückläufig, wie in Abbildung II.6.3a zu sehen ist. Der Rückgang der Emissionen beruht dabei wesentlich auf Änderungen der eingesetzten Produktions- und Minderungstechnologien, was sich in dem Verlauf der Emissionsfaktoren zeigt (siehe Abbildung II.6.3b).

Der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen steht mit dem Einsatz von sekundären Brennstoffen sowie dem Klinkerfaktor in Verbindung. Der Anteil der sekundären Brennstoffe am gesamten Energieeinsatz im Basisszenario ist in Abbildung II.6.4b dargestellt. Dieser steigt zunächst recht zügig auf 57% an, verbleibt jedoch dann bei diesem Wert. Dass die Marke von 60% hier nicht überschritten wird, kann dadurch erklärt werden, dass bei höheren Anteilen die schärferen Grenzwerte der 17. BImSchV gelten und diese für SO<sub>2</sub>-Emissionen ohne weitere Minderungsmaßnahmen in vielen Werken nicht eingehalten werden können.

Der Klinkerfaktor stellt den Massenanteil des Zementklinkers am Zement dar und kann theoretisch auf bis zu 0,6 herabgesenkt werden. Im Basisszenario be-

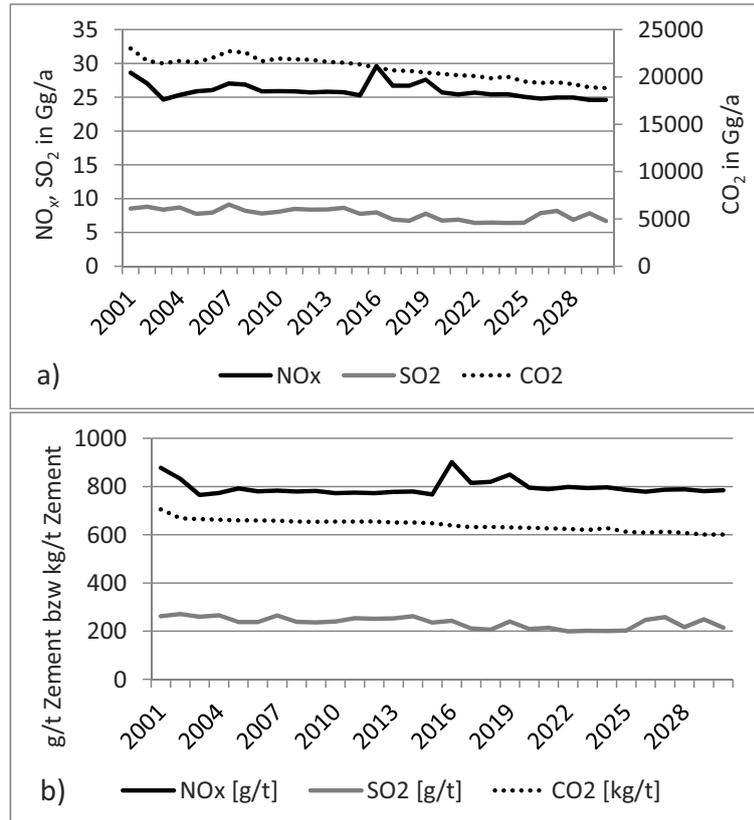


Abb. II.6.3.: Verlauf der a) Emissionen und b) Emissionsfaktoren im Zementsektor im Basisszenario

stehen nur geringe Anreize eine solche Maßnahme durchzuführen, wie Abbildung II.6.4a zeigt.

Die Investitionsausgaben für Emissionsminderungsmaßnahmen betragen durchschnittlich etwa 30 Mio. EUR im Jahr. Der Preisanstieg für Zement liegt mit 7,7% bis 2030 deutlich unter dem Anstieg des Verbraucherpreisindizes.

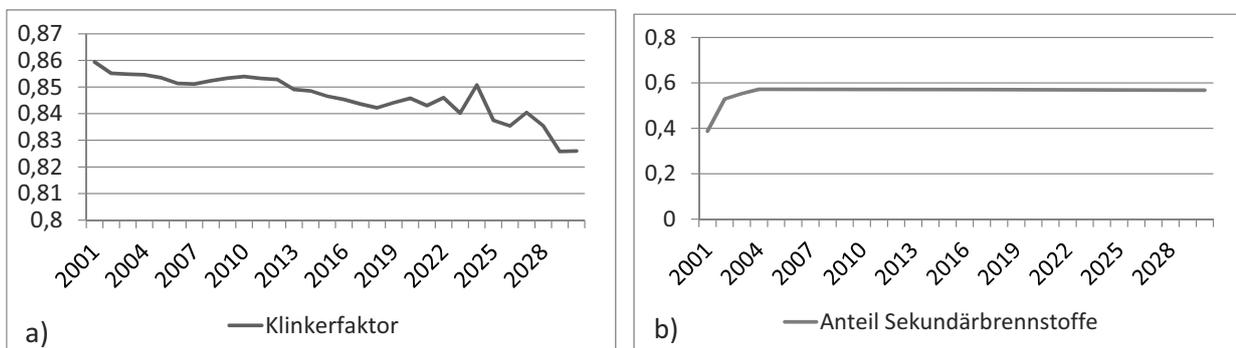


Abb. II.6.4.: Verlauf des a) Klinkerfaktors und des b) Einsatzes der Sekundärbrennstoffe im Zementsektor im Basisszenario

### II.6.1.3. Basisszenario Eisen- und Stahlsektor

Auch im Stahlsektor sind die Emissionen im Basisszenario rückläufig. Abbildung II.6.5a zeigt eine Minderung um fast 50% für die NO<sub>x</sub> und die SO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030. Während die Produktion nur leicht zurückgeht (siehe Abbildung II.6.2c), trägt der Einsatz neuer Technologien wesentlich zum Rückgang der Emissionen bei, was sich in den sinkenden Emissionsfaktoren in Abbildung II.6.5b zeigt.

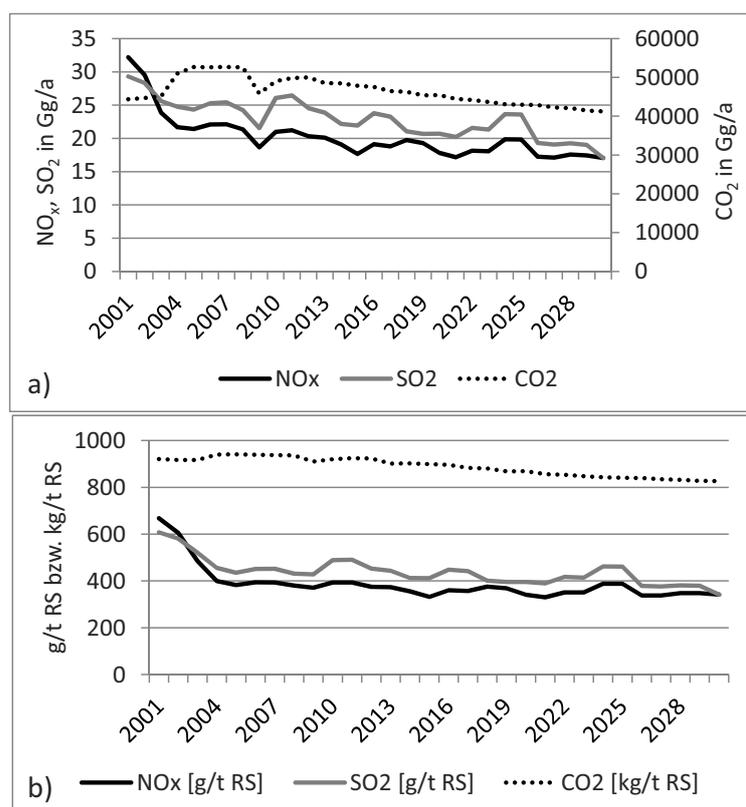


Abb. II.6.5.: Verlauf der a) Emissionen und b) Emissionsfaktoren im Stahlsektor im Basisszenario (RS=Rohstahl)

Es lässt sich eine leichte Verschiebung der Produktionsanteile hin zur Elektrolichtbogenofen-Route feststellen (Abbildung II.6.6). Dies führt auch, neben weiteren Maßnahmen zur Energieeinsparung, zu einer Verringerung des spezifischen Energiebedarfs pro Tonne Rohstahl (Abbildung II.6.7) und damit einhergehend zu geringeren verbrennungsbedingten Emissionen.

Im Schnitt werden 1,56 Mrd. EUR pro Jahr in Emissionsminderungsmaßnahmen investiert. Der damit einhergehende Anstieg der Stückkosten und damit der

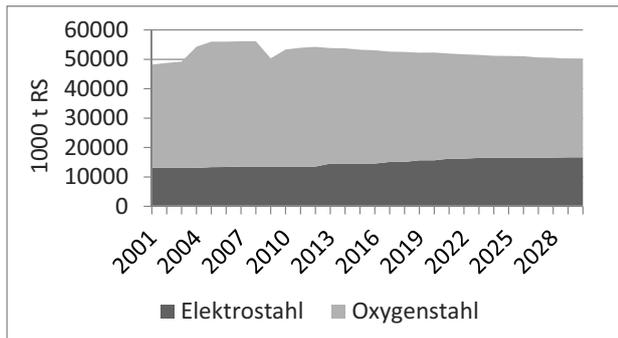


Abb. II.6.6.: Entwicklung der Produktionsanteile im Basisszenario (RS=Rohstahl)

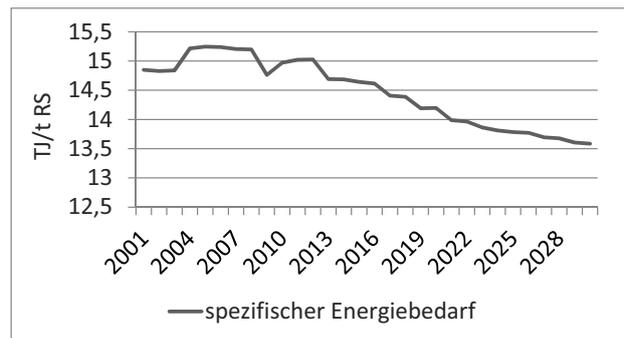


Abb. II.6.7.: Entwicklung des Energieeinsatzes je t Rohstahl (RS) im Basisszenario

Preise liegt bei jährlich 1,25%, so dass der Stahlpreis insgesamt bis 2030 um 43% und damit überdurchschnittlich im Vergleich zum allgemeinen Verbraucherpreisindex (26%) ansteigt.

#### II.6.1.4. Basisszenario Energiesektor

Ein primäres Ziel des modellierten Energiesektors ist eine realistische Abschätzung des zukünftigen Strommixes, da dieser die Emissionen stark beeinflusst. Demzufolge wird zunächst der Strommix des Basisszenarios validiert, bevor weitere Analysen vorgenommen werden. Der Leitstudie 2008 des BMU kann bspw. entnommen werden, dass im Leitszenario der Anteil der Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2030 bei ca. 50% liegt (vgl. BMU (2008)). Der Strommix des Basisszenarios hingegen weist, wie in Abbildung II.6.8 dargestellt, einen Anteil von ca. 44% aus. Jedoch wurden hier keinerlei zusätzliche Anreize wie z. B. der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten berücksichtigt. Gleichzeitig ist erkennbar, dass der Atomausstieg schrittweise vollzogen wird, wobei im betrachteten Szenario ab dem Jahre 2024 keine Stromerzeugung durch Kernreaktoren mehr erfolgt. Dies deckt sich mit der von der Bundesregierung unterstützten maximalen Laufzeitverlängerung von 14 Jahren (vgl. auch Abschnitt II.4.4.1).

Weiterhin gibt Abbildung II.6.9 die Emissionsverläufe sowie die Emissionsfaktoren des Basisszenarios bis zum Jahre 2030 wieder. Es fällt auf, dass die absoluten NO<sub>x</sub>- sowie die SO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich abnehmen. Über die betrachtete

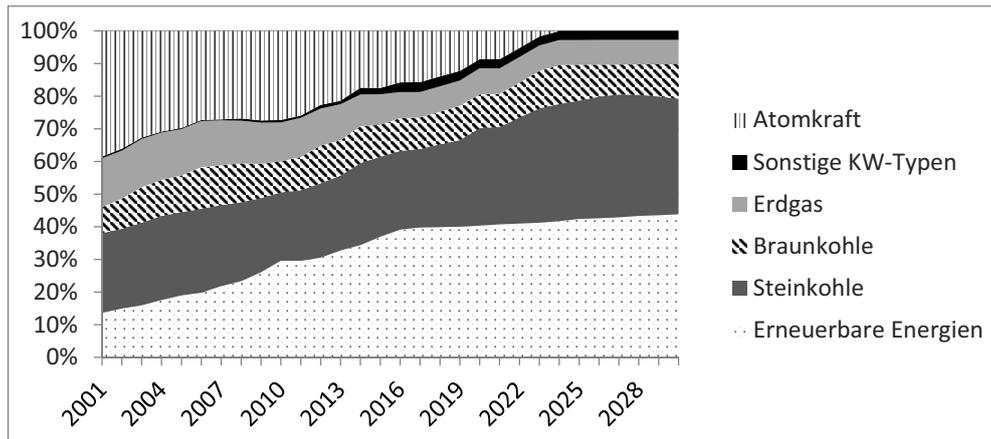


Abb. II.6.8.: Simulierter Strommix im Basisszenario, unter sonstige Kraftwerkstypen fallen die Industriekraftwerke sowie die mit schwerem und leichtem Heizöl betriebenen Kraftwerke

Zeitspanne hinweg fallen diese, trotz steigender Produktion (vgl. II.6.2c), um 34% bzw. 46%. An den Emissionsfaktoren lassen sich dabei zwei Trends ablesen. Zum einen sind die geringeren  $\text{NO}_x$ - und  $\text{SO}_2$ -Emissionen durch den geänderten Strommix bedingt, der im Jahre 2030 einen deutlich größeren Anteil an Erneuerbaren Energien aufweist (vgl. Abbildung II.6.8), zum anderen sind diese durch die Investitionsentscheidungen der Werke und der damit verbundenen Implementierung entsprechender Emissionsminderungsmaßnahmen begründet.

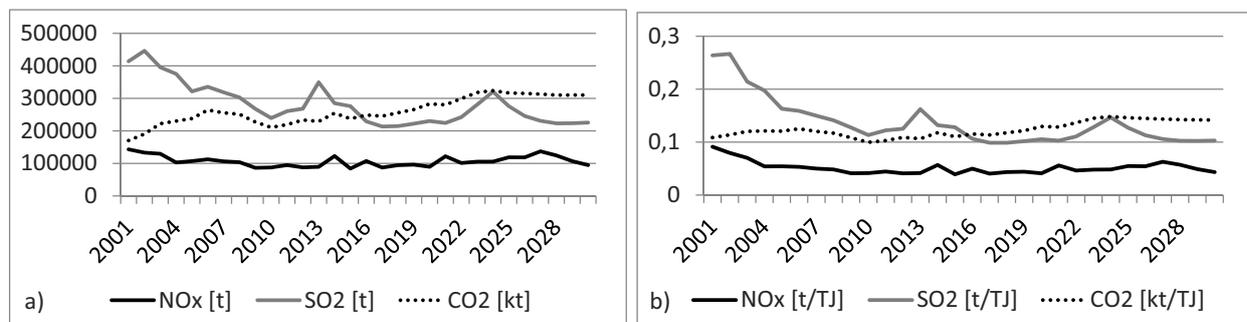


Abb. II.6.9.: Verlauf der a) Emissionen und b) Emissionsfaktoren im Energiesektor im Basisszenario

So zeigen die Abbildungen II.6.10 und II.6.11 beispielhaft die Anzahl der implementierten EMM sowie den Anteil der Produktionsmenge, der unter Nutzung der entsprechenden EMM im Basisszenario hergestellt wird. Es fällt auf, dass sowohl der Einsatz von sekundären  $\text{NO}_x$ -Maßnahmen als auch von der Rauchgasentschwefelung kontinuierlich zunimmt.

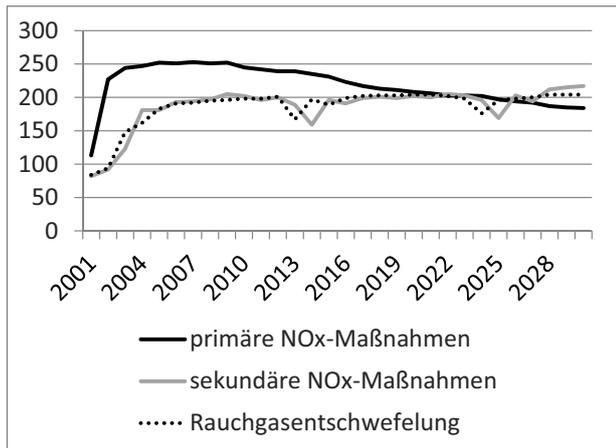


Abb. II.6.10.: Anzahl der implementierten EMM im Energiesektor im Basisszenario

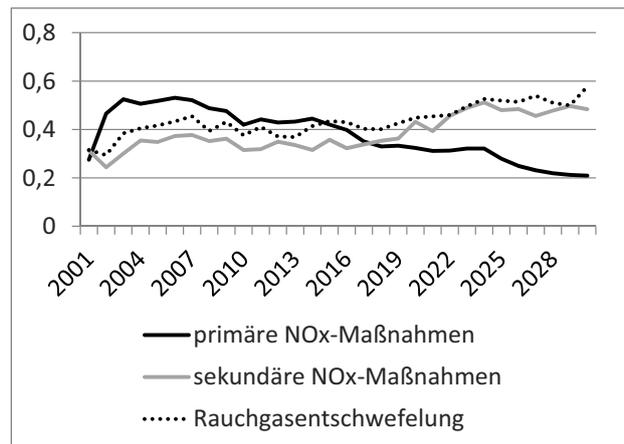


Abb. II.6.11.: Anteil der Produktionsmenge der Werke mit den implementierten EMM

Bei Betrachtung der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Abbildung II.6.9 sieht man, dass diese um ca. 82% zunehmen. Ein Großteil dieses Trends ist jedoch der Zunahme der Produktion geschuldet, da die zugehörigen Emissionsfaktoren lediglich um 30% steigen. Dieser Anstieg kann auf den Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergie zurückgeführt werden, da der durch Kernkraftwerke im Basisszenario erzeugte Strom im Wesentlichen durch Kohlekraftwerke ersetzt wird. Folglich bestehen im Basisszenario bei der gewählten Modellierung nicht genug Anreize, um den steigenden Energiebedarf und die fehlenden Atomkraftwerke durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu kompensieren. Von der CCS-Technologie wird im Basisszenario auf Grund der hohen Investitionen und den damit verbundenen Kosten kein Gebrauch gemacht.

## II.6.2. Wirkungsweise der Instrumente im Zementsektor

In den folgenden Kapiteln wird nun, abhängig vom Basisszenario, die Wirkungsweise der Instrumente in den einzelnen Sektoren untersucht. Dabei werden die analysierten Werte als Abweichung von den Werten des Basisszenarios angegeben.

### II.6.2.1. Ökologisches Verhalten

Neben dem Basisszenario kann das Szenario, in dem rein ökologisches Verhalten der Entscheider in den Unternehmen unterstellt wird, zur Einordnung der Ergebnisse herangezogen werden. In diesem Szenario „Ökologisches Verhalten“ treffen die Unternehmen ihre Investitionsentscheidungen ausschließlich nach ökologischen Kriterien und versuchen folglich ihre spezifischen Emissionen so weit wie möglich zu reduzieren. Die Ergebnisse dieses Szenarios können folglich als Maximal-Minderung unter Einhaltung wirtschaftlicher Beschränkungen bei gegebener Produktion interpretiert werden. Die demnach erreichbare Minderung im Zementsektor ist in Abbildung II.6.12 dargestellt und beträgt bis 2030 für  $\text{NO}_x$  83,7%, für  $\text{SO}_2$  66,2% und für  $\text{CO}_2$  27,5%.

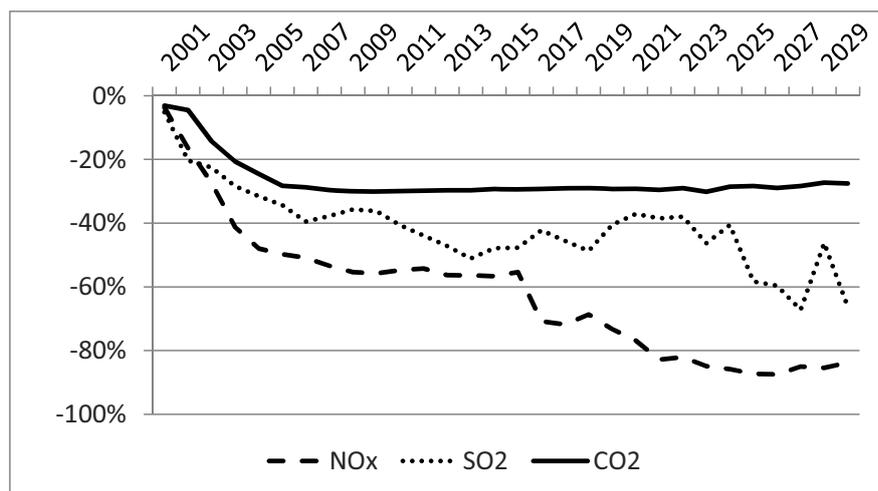


Abb. II.6.12.: Maximale Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor im Vergleich zum Basisszenario

### II.6.2.2. Emissionshandel

Die Einführung eines Zertifikatehandels stellt je nach Zertifikatspreis einen deutlichen Kostenfaktor für die Zementindustrie dar. Während im Zementsektor bereits bei Zertifikatspreisen von 10 EUR/t  $\text{CO}_2$  eine Abweichung von knapp über 8% vom Preis des Basisszenarios auf Grund höherer Produktionskosten festzustellen ist, stellen die  $\text{CO}_2$ -Zertifikate im Stahlsektor bei diesem Preis noch keine relevan-

te Kostengröße dar. Im Energiesektor führen Zertifikate zu diesem Preis bereits zu einem Kosten- und einem damit verbundenen Preisanstieg von bis zu 18% (vgl. Abbildung II.6.13).

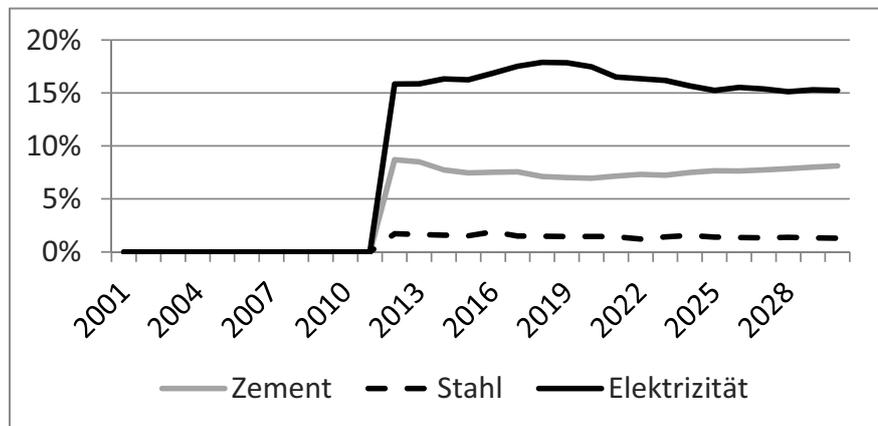


Abb. II.6.13.: Einfluss der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate auf die Stückkosten der Sektoren bei einem Preis von 10 EUR/CO<sub>2</sub> im Vergleich zum Basisszenario

Das Modell legt die Annahme zugrunde, dass Kostensteigerungen, wie etwa durch die Einführung von Emissionszertifikaten, unmittelbar an die Kunden weitergegeben werden können und sich somit direkt auf den Verkaufspreis der jeweiligen Güter auswirken. Aufgrund der gestiegenen Preise ist folglich auch ein Rückgang der Produktion zu verzeichnen, der sich auch in der Emissionsfracht niederschlägt. Um die Anreizwirkung der Zertifikate zu untersuchen, müssen daher die Emissionsfaktoren betrachtet werden.

Es zeigt sich, dass ein Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten im Zementsektor auch zur Minderung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen beiträgt (Abbildung II.6.14). Dies ist dadurch bedingt, dass der Klinkerbrennprozess als Hauptquelle für CO<sub>2</sub>-Emissionen auch für den überwiegenden Teil der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen verantwortlich ist.

Für ein Zertifikatehandelssystem mit NO<sub>x</sub>- oder SO<sub>2</sub>-Emissionen ergeben sich ähnliche Ergebnisse. Auch hier ergibt sich ein Synergie-Effekt auf die jeweils anderen Schadstoffe (Abbildungen II.6.15 und II.6.16). Zum Vergleich wurden Zertifikate zu einem Preis von 10 EUR/kg NO<sub>x</sub> bzw. 10 EUR/kg SO<sub>2</sub> eingeführt, die zu Kostensteigerungen in ähnlicher Größenordnung führen wie die betrachteten CO<sub>2</sub>-Zertifikate.

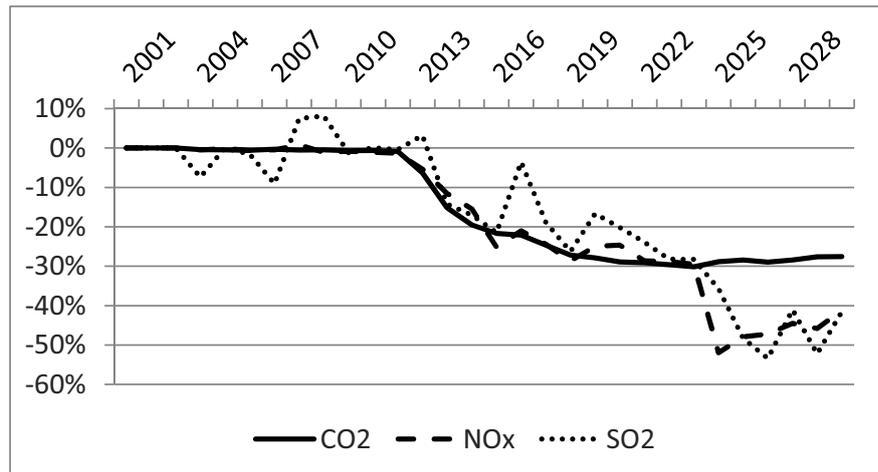


Abb. II.6.14.: Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor durch Einführung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten zu einem Preis von 10 EUR/t CO<sub>2</sub> im Vergleich zum Basisszenario

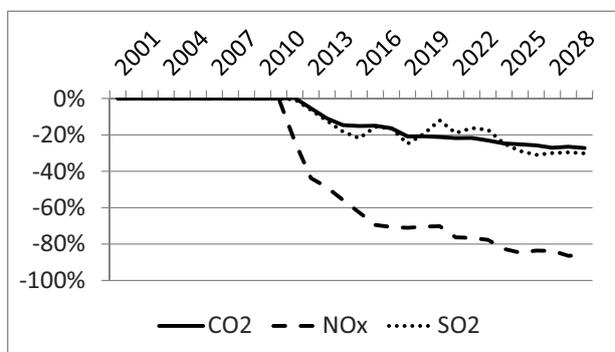


Abb. II.6.15.: Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor durch Einführung von NO<sub>x</sub>-Zertifikaten zu einem Preis von 10 EUR/kg NO<sub>x</sub> im Vergleich zum Basisszenario

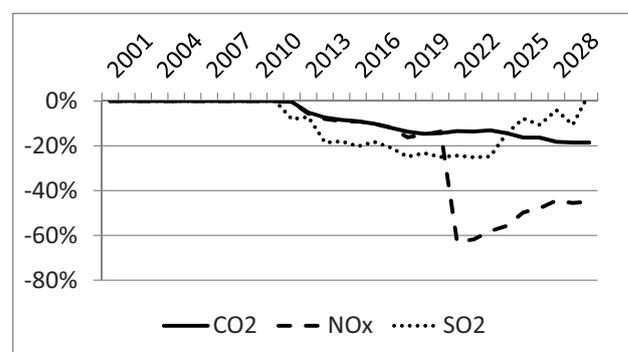


Abb. II.6.16.: Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor durch Einführung von SO<sub>2</sub>-Zertifikaten zu einem Preis von 10 EUR/kg SO<sub>2</sub> im Vergleich zum Basisszenario

Ein Vergleich der erreichten Emissionsfaktoren mit den Ergebnissen aus dem „Ökologischen Verhalten“-Szenario zeigt, dass die technisch maximal mögliche Minderung im Zementsektor durch das Instrument des Emissionszertifikatehandels für CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>, nicht jedoch für SO<sub>2</sub>, bei den gegebenen Marktpreisen erreicht werden kann. Die maximale CO<sub>2</sub>-Minderung kann bereits durch Zertifikate zu einem Preis von 10 EUR/t CO<sub>2</sub> oder alternativ durch NO<sub>x</sub>-Zertifikate zu einem Preis von 10 EUR/kg NO<sub>x</sub> erreicht werden. Höhere Preise für die Zertifikate führen zu einer beschleunigten Umsetzung der Maßnahmen, können jedoch insgesamt kein niedrigeres Niveau bei gegebener Verfügbarkeit der Technologien erreichen. NO<sub>x</sub>-Zertifikate zu einem Preis von 10 EUR/kg NO<sub>x</sub> setzen weiterhin

ausreichend Anreize zur Erreichung der maximalen  $\text{NO}_x$ -Minderung, jedoch ist diese auch durch hochpreisige  $\text{CO}_2$ -Zertifikate zu erreichen.

Zusätzlich zu der Minderung der spezifischen Emissionen, dargestellt durch die Emissionsfaktoren, bewirken die Zertifikate jedoch einen Einbruch der Produktions- und somit der Umsatzzahlen im Sektor. Dieser Rückgang wird in dem hier vorgestellten Ansatz überschätzt, da eine direkte Weitergabe der zusätzlichen Kosten an die Kunden angenommen wird. Jedoch lassen die Gewinnmargen im Zementsektor keine allzu großen Spielräume zur Kompensierung der Zusatzkosten zu.

Um der aktuellen politischen Diskussion Rechnung zu tragen, wird an dieser Stelle die zusätzliche Wirkung einer möglichen Einführung eines  $\text{NO}_x$ - bzw.  $\text{SO}_2$ -Zertifikatehandels über den bereits implementierten  $\text{CO}_2$ -Zertifikatehandel hinaus bezüglich der Emissionsfaktoren analysiert. Somit ist ein Instrumentenbündel, nämlich das der Einführung eines  $\text{NO}_x$ - bzw.  $\text{SO}_2$ -Zertifikatehandels bei gleichzeitiger Implementierung eines  $\text{CO}_2$ -Zertifikatehandels, mit der alleinigen Einführung eines  $\text{CO}_2$ -Zertifikatehandels unter Beibehaltung der  $\text{NO}_x$ - und  $\text{SO}_2$ -Grenzwerte zu vergleichen.

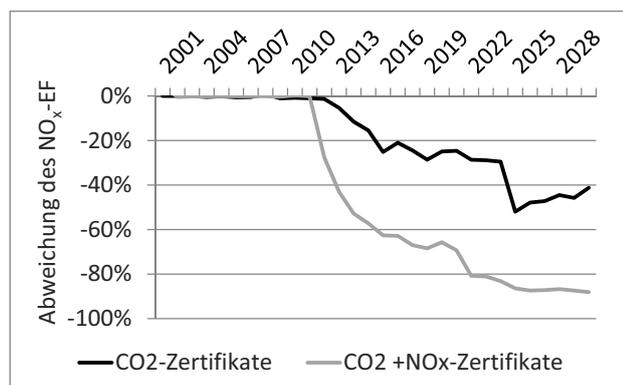


Abb. II.6.17.: Minderung des  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktors (EF) im Zementsektor bei unterschiedlichen Instrumenten im Vergleich zum Basisszenario (Preis  $\text{CO}_2$ -Zertifikate: 10 EUR/t, Preis  $\text{NO}_x$ -Zertifikate: 10 EUR/kg)

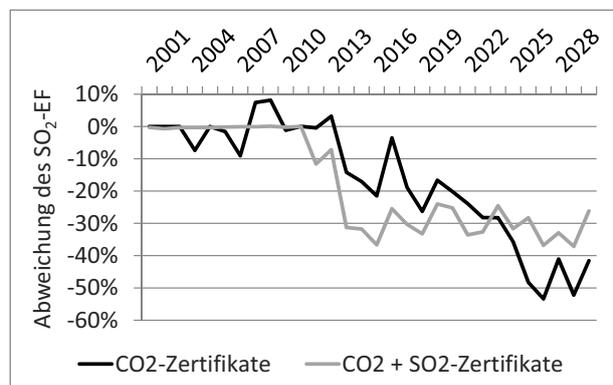


Abb. II.6.18.: Minderung des  $\text{SO}_2$ -Emissionsfaktors (EF) im Zementsektor bei unterschiedlichen Instrumenten im Vergleich zum Basisszenario (Preis  $\text{CO}_2$ -Zertifikate: 10 EUR/t, Preis  $\text{SO}_2$ -Zertifikate: 10 EUR/kg)

Aus Abb. II.6.17 wird im Falle der  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren deutlich, dass die zusätzliche Implementierung eines  $\text{NO}_x$ -Zertifikatehandels einen weiteren deutli-

chen Rückgang um zusätzlich ca. 40% der  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren bewirken kann, da die Anreize zur Implementierung entsprechender EMM durch einen alleinigen  $\text{CO}_2$ -Zertifikatehandel bei den angenommenen Preisen für die maximal mögliche Minderung nicht ausreichend sind.

Bei der zusätzlichen Implementierung eines  $\text{SO}_2$ -Zertifikatehandels sieht dies jedoch anders aus (vgl. Abbildung II.6.18). Es sind deutlich geringere zusätzliche Anreize bezüglich des Investitionsverhaltens festzustellen. Teilweise liegen die  $\text{SO}_2$ -Emissionen hier sogar etwas höher als bei einem alleinigen  $\text{CO}_2$ -Zertifikatehandel. Dies liegt daran, dass die bereits vorhandenen  $\text{SO}_2$ -Grenzwerte durch einen entsprechenden Zertifikatehandel aufgehoben werden und dieser nicht immer größere Anreize zur Implementierung von  $\text{SO}_2$ -mindernden EMM liefert.

### II.6.2.3. Grenzwerte

Die untersuchten Szenarios zur Grenzwertverschärfung erreichen die Minderungen des „Ökologischen Verhalten“-Szenarios nicht. Die durchgeführten Investitionen liegen nur wenig über denen des Basisszenarios.

Es zeigt sich insbesondere, dass die Grenzwertverschärfung auf einen Schadstoff nur geringe Minderungen anderer Schadstoffe mit sich bringt und daher die Synergieeffekte, wie sie bei den Zertifikaten auftreten, nicht zum Tragen kommen. Dies ist möglicherweise dadurch zu erklären, dass zur Einhaltung von Grenzwerten oft sekundäre Minderungsmaßnahmen eingesetzt werden, welche im Wesentlichen nur einen Schadstoff mindern. Verstärkt wird diese Tendenz zu sekundären Maßnahmen dadurch, dass die Grenzwerte sich auf die Schadstoff-Konzentration im Abgas beziehen, während Zertifikate und Steuern auf die Emissionsfracht abzielen. Maßnahmen, wie etwa die Verringerung des Klinkerfaktors, welche durch die niedrigere Aktivitätsrate des Brennofens eine Minderung aller Schadstoffe herbeiführt, tragen nicht zu einer Minderung der Schadstoffkonzentration im Abgas bei. Folglich stellt sie hinsichtlich einer Grenzwerteinhaltung keinen Nutzen dar.

### II.6.3. Wirkungsweise der Instrumente im Eisen- und Stahlsektor

#### II.6.3.1. Emissionshandel

Um die Emissionsfracht sowie die Emissionsfaktoren beurteilen zu können, werden zunächst die zur Stahlerzeugung verwendeten Technologien analysiert. Da zwei Referenzprozesse, die Oxygenstahl- und die Elektrostahlherstellung, definiert sind und sich diese durch ein unterschiedliches Emissionsverhalten sowie unterschiedliche verfügbare Emissionsminderungsmaßnahmen auszeichnen, ist die Relevanz der Anteile der einzelnen Referenzprozesse an der Produktion für die Entstehung der Emissionen zu prüfen. Hierbei sind nur für den CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel mit hohen angenommenen Marktpreisen Änderungen in der Größenordnung >5% im Vergleich zum Basisszenario festzustellen. Die Elektrostahlproduktion nimmt bspw. bei einem CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis von 100 EUR/t CO<sub>2</sub> 35,4% der Stahlproduktion im Jahr 2030 ein und liegt damit 6,0% über dem Wert aus dem Basisszenario. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Produktion auf Grund des durch die zu erwerbenden Zertifikate gestiegenen Stahlpreises insgesamt zurückgeht und sich so die Produktionsanteile der Technologien leicht zu Gunsten der Elektrostahlwerke verschieben. Weiterhin ist anzumerken, dass auch die Elektrostahlwerke, die technologiebedingt große Vorteile bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen, indirekt vom Emissionshandel betroffen sind, da sie teureren Strom der ebenfalls dem Emissionshandel unterworfenen Kraftwerke beziehen müssen. Dies zeigt die Notwendigkeit der implementierten Rückkopplungen zwischen den Sektoren. Die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren gehen bei einem CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis von 100 EUR/t auf ca. 80% zurück im Vergleich zum Basisszenario. Dies ist vor allem der Implementierung entsprechender Emissionsminderungs- und Einsparmaßnahmen geschuldet.

Während im Zementsektor ein deutlicher Synergie-Effekt beim Emissionshandel auszumachen war, reagieren die Emissionsfaktoren im Stahlsektor relativ träge. So hat der CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel nahezu keinen Einfluss auf die NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Einfluss eines Emissionshandelssystems bei relativ hohen Prei-

sen auf die  $\text{NO}_x$ - und  $\text{SO}_2$ -Emissionsfaktoren kann den Abbildungen II.6.19 sowie II.6.20 entnommen werden.

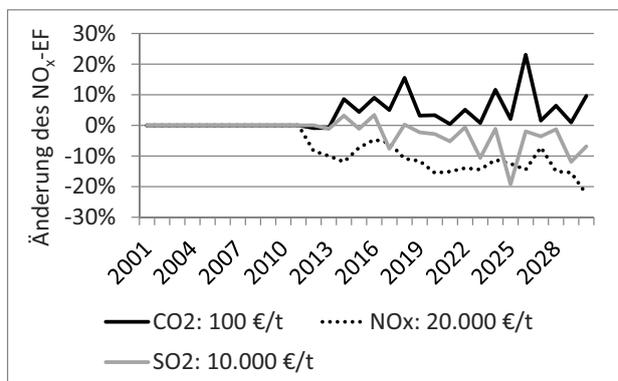


Abb. II.6.19.:  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario

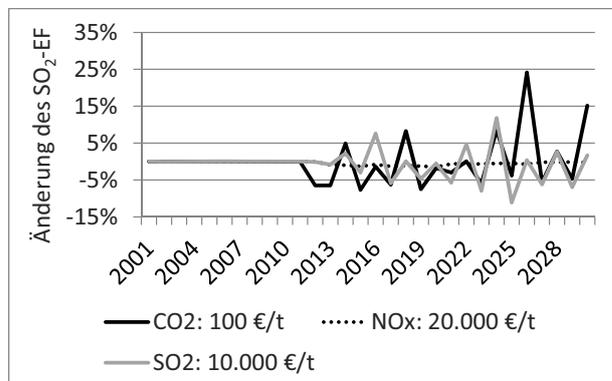


Abb. II.6.20.:  $\text{SO}_2$ -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario

Bezüglich der  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren ist ein kleiner Synergie-Effekt bei der Implementierung eines  $\text{SO}_2$ -Zertifikatehandels zu erkennen, da dieser ebenfalls die  $\text{NO}_x$ -Emissionen reduziert (vgl. Abbildung II.6.19). Gleichzeitig ist jedoch eine Zunahme der  $\text{NO}_x$ -Emissionen für hohe  $\text{CO}_2$ -Zertifikatspreise bemerkbar. Dies zeigt, dass vornehmlich Werke mit geringen  $\text{CO}_2$ -Emissionen auf dem Markt bestehen können und die Emissionen der anderen Schadstoffe vernachlässigt werden. Auch bei Betrachtung der  $\text{SO}_2$ -Emissionsfaktoren kann kein Synergie-Effekt bei der Implementierung eines Zertifikatehandels festgestellt werden. Vielmehr schwanken diese um die Werte des Basisszenarios ohne einen erkennbaren Trend. Hier kommt auch wiederum zum Tragen, dass die  $\text{SO}_2$ -Grenzwerte, die im Basisszenario gelten, durch die Implementierung eines  $\text{SO}_2$ -Zertifikatehandels obsolet werden, unter Umständen aber hinsichtlich der  $\text{SO}_2$ -Emissionen größere Anreize zur Minderung geliefert hätten.

Insgesamt lässt sich bezüglich des Emissionshandels im Stahlsektor zeigen, dass bereits im Basisszenario, ohne Zertifikatehandel, große Anreize existieren, um in EMM zu investieren (Abschnitt II.6.1.3). Darin liegen die vergleichsweise geringen Anreize zusätzlicher Handelssysteme zur Implementierung weiterer Maßnahmen begründet. Aus diesem Grund zeigen auch Instrumentenbündel, die mehrere Schadstoffe im Emissionshandel berücksichtigen, keine großen Auswirkungen.

Wie bereits angedeutet, zeigen im Stahlsektor die Emissionszertifikate erst ab einem höheren Preis eine Auswirkung auf den Stahlpreis (vgl. Abbildung II.6.13). Auch hier geht als Folge der Preissteigerung die Nachfrage zurück. Der damit verbundene Produktionsrückgang wirkt sich jedoch nur vergleichsweise gering auf die Emissionen aus.

### II.6.3.2. Grenzwerte

Im Stahlsektor bestehen im Rahmen der modellierten Minderungsmaßnahmen im Basisszenario bereits große Anreize zur Implementierung von  $\text{NO}_x$ -,  $\text{SO}_2$ - oder energieeinsparenden EMM, weshalb für die Grenzwerte die jeweils strengste Verschärfung als Untersuchungsgegenstand gewählt wird. Es soll somit analysiert werden, inwieweit durch eine strengere Gesetzgebung noch mehr Anreize gesetzt werden können, die zu einer weiteren Senkung der Emissionen führen. Interessanterweise ist auch im Rahmen der Grenzwertverschärfung ein Verschiebungseffekt zwischen den Schadstoffen zu erkennen. So steigen etwa die  $\text{NO}_x$ -Emissionen deutlich an, wenn der Grenzwert für  $\text{SO}_2$  abgesenkt wird (vgl. Abbildung II.6.21).

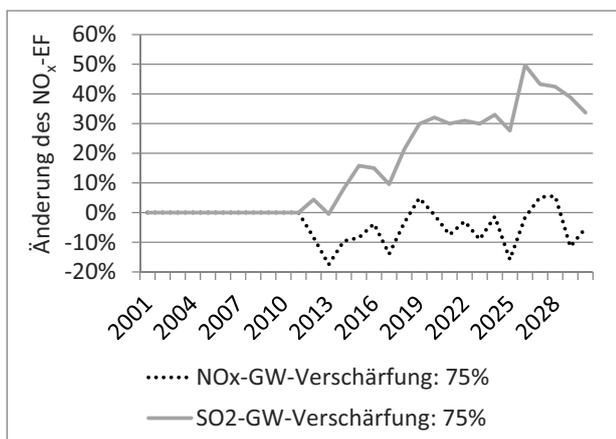


Abb. II.6.21.:  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Grenzwertverschärfungen im Vergleich zum Basisszenario

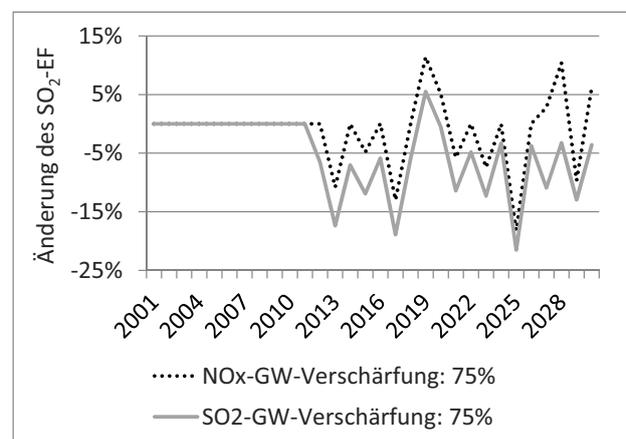


Abb. II.6.22.:  $\text{SO}_2$ -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Grenzwertverschärfungen im Vergleich zum Basisszenario

Um diesen Sachverhalt zu erklären, werden die durch die Werke getätigten Investitionen genauer analysiert. Hierbei fällt auf, dass Maßnahmen, die lediglich

SO<sub>2</sub> mindern (Primäre SO<sub>2</sub>-Minderung, Schwefel-Wäscher, Koksofengas-Reinigung, vgl. Tabelle II.4.3) in den analysierten Szenarios in ähnlichem Umfang implementiert sind. Hier werden also nahezu keine zusätzlichen Anreize durch Grenzwertverschärfungen induziert. Bei den EMM, die mehrere Schadstoffe mindern, zeigt sich jedoch bei Verschärfung der SO<sub>2</sub>-Grenzwerte eine Verschiebung der Investitionen. So wird die in vielen Werken implementierte RAC-Anlage, die sowohl SO<sub>2</sub> als auch NO<sub>x</sub> mindert, durch eine günstigere ersetzt, die NO<sub>x</sub> in geringerem Umfang mindert, was einen Anstieg der entsprechenden Emissionen nach sich zieht. Weiterhin nehmen die NO<sub>x</sub>-Emissionen bei der NO<sub>x</sub>-Grenzwertverschärfung ab, was durch den zunehmenden Einsatz sekundärer NO<sub>x</sub>-Maßnahmen in der Kokerei begründet ist.

Bei den SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren zeigt sich ein anderes Bild bezüglich der Wechselwirkungen der einzelnen Schadstoffe. Für SO<sub>2</sub>-Grenzwertverschärfungen nimmt der Einsatz von Schwefel-Wäschern leicht und der der unterschiedlichen RAC-Anlagen insgesamt zu, weswegen die SO<sub>2</sub>-Emissionen tendenziell abnehmen. Weiterhin ist bei einer Verschärfung des NO<sub>x</sub>-Grenzwertes ein eher positiver Effekt auf die SO<sub>2</sub>-Emissionen auszumachen, da neben den sekundären NO<sub>x</sub>-Maßnahmen auch auf mehrere Schadstoffe wirkende Energieeinsparmaßnahmen umgesetzt werden.

Bei der Betrachtung des Emissionshandels und der Grenzwerte im Stahlsektor zeigt sich insgesamt also, dass ein Instrument zur Minderung eines speziellen Schadstoffes negative Auswirkungen auf einen anderen Schadstoff haben kann, weswegen ein Instrument nicht isoliert von den anderen Schadstoffen betrachtet werden kann.

Der Anteil an Elektrostahlwerken ist in den einzelnen Szenarios der Grenzwertverschärfungen genauso hoch wie im Basisszenario. Hier lässt sich keine zusätzliche Anreizwirkung ausmachen.

### **II.6.3.3. Ökosteuer**

Wie auch in den vorangegangenen Analysen, in denen der Stahlsektor nur verhältnismäßig kleine Reaktionen auf die untersuchten politischen Instrumente, selbst mit ihren strengsten Ausprägungen, gezeigt hat, ist die Anreizwirkung einer Verschärfung der Ökosteuer ebenfalls gering. Selbst bei einer Erhöhung um 500% zeigt keiner der Emissionsfaktoren Auswirkungen über der 1%-Marke. Auch der Preis einer Tonne Stahl steigt um weniger als 1%, da die Gütersteuern gegenüber den Vorleistungen und Abschreibungen nur einen sehr kleinen Kostenfaktor darstellen. Beim Elektrostahlanteil sind ebenfalls kaum Änderungen gegenüber dem Basisszenario zu verzeichnen. Der Elektrostahlanteil nimmt bei einer Erhöhung der Ökosteuer auf 500% gegenüber dem Basisszenario um 1,5% zu. Die Angleichung der Steuern der energieintensiven Industrie auf das Niveau der anderen Sektoren zeigt keinerlei Wirkung. Somit ist bei der gegebenen Modellierung das Verschärfen einer Ökosteuer kein adäquates Mittel, um die Emissionen im Stahlsektor zu senken.

## **II.6.4. Wirkungsweise der Instrumente im Energiesektor**

### **II.6.4.1. Emissionshandel**

Da ein Großteil der Elektrizität durch Verbrennungsprozesse bereitgestellt wird und die Anzahl der modellierten Werke des Energiesektors vergleichsweise hoch ist, ist der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten ein wichtiger Diskussionspunkt bei der Energiebereitstellung. Wie bereits in Abschnitt II.6.2 beschrieben, beeinflusst der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis erheblich die Kosten der Stromerzeugung. Abbildung II.6.23 zeigt, dass bereits ein verhältnismäßig niedriger Preis von 10 EUR/t CO<sub>2</sub> für einen Rückgang des entsprechenden Emissionsfaktors sorgt. Höhere Preise von 50 oder 100 EUR/t CO<sub>2</sub>, die den Zertifikatspreis des derzeitigen Handels deutlich überschätzen, führen zu weiteren erheblichen Senkungen des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors. Dabei fällt auf, dass die jeweiligen zugehörigen Kurven im Schaubild durch zwei

signifikante Absenkungen charakterisiert sind, wobei erstere im Jahr 2012, dem Jahr des Inkrafttretens der untersuchten Instrumente, und letztere im Jahr 2020, dem Jahr des Verfügbarwerdens der CCS-Technologie, auftritt.

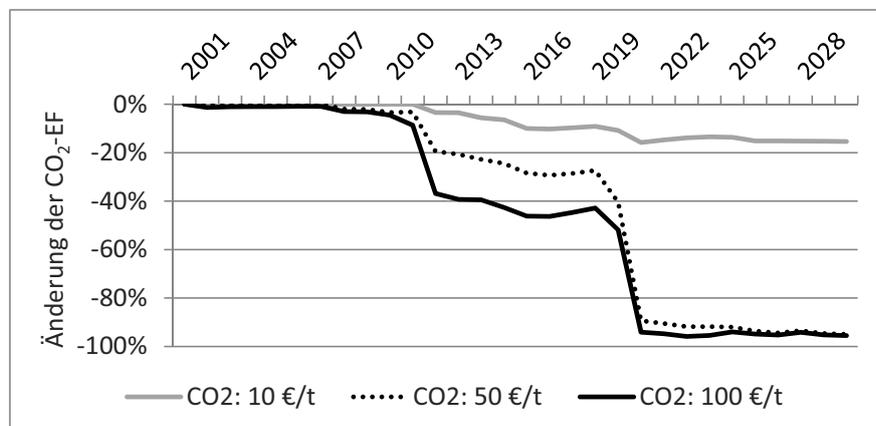


Abb. II.6.23.: Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren bei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basis-szenario

Die zweistufige Minderung der sich auf die bereitgestellte Energie beziehenden Emissionen ist im Wesentlichen den folgenden Effekten geschuldet. Zum einen wird in der Marktsimulation des Modells den Kraftwerken, die verhältnismäßig wenig CO<sub>2</sub> emittieren, eine größere Produktionsmenge zugeteilt, da deren Kosten pro TJ bereitgestellter Energie tendenziell geringer sind. Gleichzeitig nimmt aber auch der Ausbau der Erneuerbaren Energien für höhere Zertifikatspreise deutlich zu (vgl. Abbildung II.6.25). Weiterhin sorgt der Rückgang der Nachfrage im Energiesektor auf Grund des gestiegenen Preises für einen überproportional großen Anteil Erneuerbarer Energien am Strommix, da der erzeugte Strom vorrangig in das Netz eingespeist wird. Diese drei Effekte erklären den ersten Rückgang des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Implementierung der CCS-Technologie, die ab dem Jahre 2020 bereits bei einem Zertifikatspreis von 10 EUR/t CO<sub>2</sub> in einigen Werken vertreten ist. Bei deutlich höheren Zertifikatspreisen steigt die Verbreitung von CCS deutlich an, was zeigt, dass die durch den Einsatz der Technologie entstehenden Kosten durch die deutlich niedrigeren Kosten für CO<sub>2</sub>-Zertifikate kompensiert werden können. Dies hat zur Folge, dass der Preis pro TJ Strom ab

2020 wieder sinkt. Aus Abbildung II.6.24 lässt sich erkennen, dass für hohe CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise die Stromerzeugung der fossilthermischen Kraftwerke zunächst auf Grund der gesunkenen Nachfrage zurückgeht, jedoch ab 2020 durch die Implementierung der CCS-Technologie wieder steigt. Auf diese Weise kann der zweite auffällige Rückgang der Emissionen aus Abb. II.6.23 interpretiert werden.

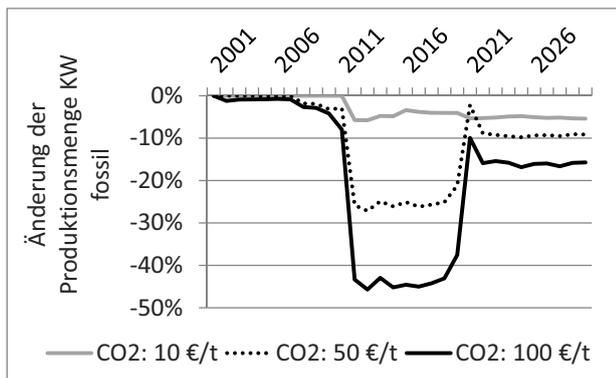


Abb. II.6.24.: Durch fossilthermische Kraftwerke (KW fossil) erzeugter Strom bei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario

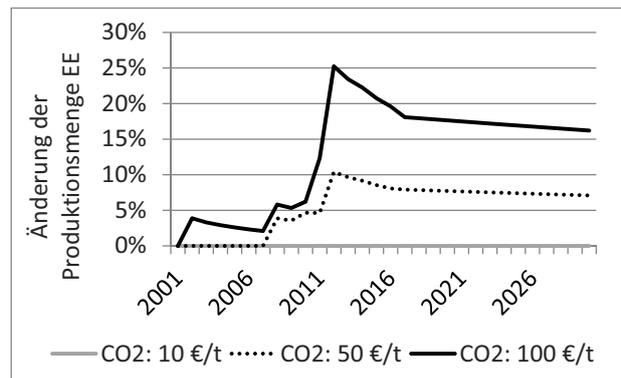


Abb. II.6.25.: Bereitgestellter Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) bei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario

Der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten hat also einen großen Einfluss auf den Strommix und die Wahl der Technologie zur Emissionsminderung. Analog zum Zementsektor lässt sich auch hier ein nicht unerheblicher Einfluss der CO<sub>2</sub>-Zertifikate auf die NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen feststellen. Dies ist u. a. auf den zusätzlichen Anreiz zum Ausbau Erneuerbarer Energien zurückzuführen. Allerdings steigen die NO<sub>x</sub>-Emissionen mit der Implementierung der CCS-Technologie wieder an, da die Stromerzeugung sich wieder hin zu den fossilthermischen Kraftwerken verschiebt.

Eine umgekehrte Wirkung von NO<sub>x</sub>- oder SO<sub>2</sub>-Zertifikaten auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie auf die Zusammensetzung des Strommixes kann nicht beobachtet werden. Im Falle der NO<sub>x</sub>-Emissionen steigen bei der Einführung eines NO<sub>x</sub>-Zertifikatehandels die getätigten Investitionen in primäre sowie sekundäre NO<sub>x</sub>-Maßnahmen, was eine Senkung des Emissionsfaktors auf bis zu 69% mit sich zieht (vgl. Abbildungen II.6.26 und II.6.27 sowie Abbildungen II.6.10 und II.6.11 des Basisszenarios). Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der

Einführung des SO<sub>2</sub>-Handels. Hier gehen die SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren auf bis zu 50% zurück.

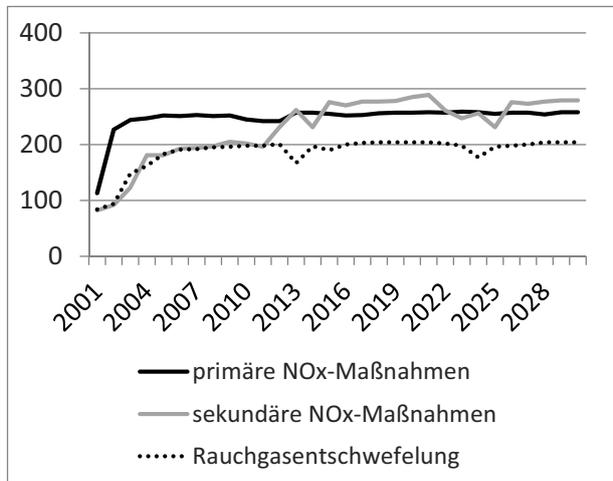


Abb. II.6.26.: Anzahl der implementierten EMM im Energiesektor bei einem NO<sub>x</sub>-Zertifikatspreis von 20.000 EUR/t

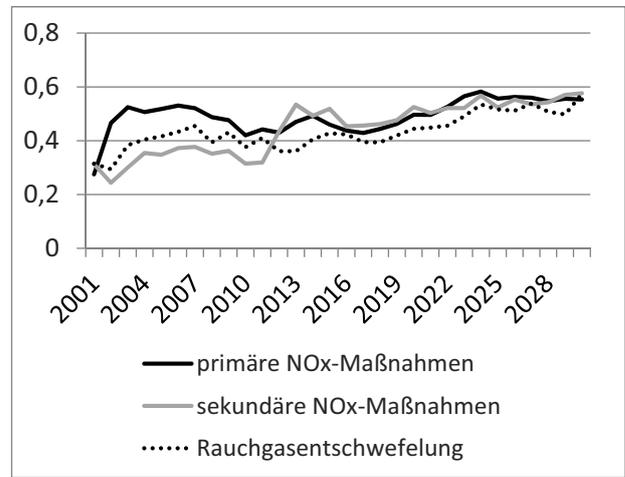


Abb. II.6.27.: Anteil der Produktionsmenge mit den implementierten EMM bei einem NO<sub>x</sub>-Zertifikatspreis von 20.000 EUR/t

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Handel mit Zertifikaten die Emissionen der betroffenen Schadstoffe deutlich mindert. Im Falle von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten sind auch bereits große Auswirkungen auf die NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren zu sehen. Diese liegen in der Größenordnung von ca. 15% Minderung im Jahre 2030. Umgekehrt scheint das jedoch nicht der Fall zu sein.

## II.6.4.2. Grenzwerte

Bei der Analyse der Grenzwerte im Energiesektor zeigt sich im Rahmen der NO<sub>x</sub>-Grenzwertverschärfung eine interessante Entwicklung. Abbildung II.6.28 zeigt die dabei entstehenden Verläufe der NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren.

Es ist leicht zu erkennen, dass durch eine Verringerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen die SO<sub>2</sub>-Emissionen steigen. Aus Abbildung II.6.29 geht hervor, dass im Vergleich zum Basisszenario (vgl. Abb. II.6.10) zusätzliche NO<sub>x</sub>-EMM implementiert werden, das Investitionsverhalten bezüglich der Rauchgasentschwefelung sich jedoch nicht ändert. Aufschluss gibt erst Abbildung II.6.30, aus der ersichtlich wird, dass sich die Zuteilung der Produktionsmenge in der Marktsimulation geändert hat

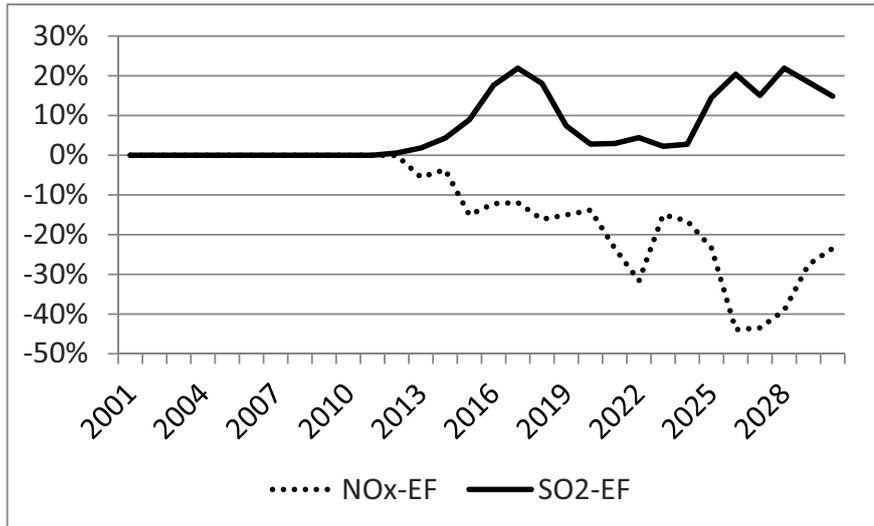


Abb. II.6.28.: Verlauf der NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren bei einer NO<sub>x</sub>-Grenzwertverschärfung von 25% im Vergleich zum Basisszenario

(vgl. Abb. II.6.11 im Basisszenario) und nun vorrangig Werke mit entsprechenden implementierten NO<sub>x</sub>-EMM produzieren, die aber nicht zwangsläufig über eine Rauchgasentschwefelungsanlage verfügen.

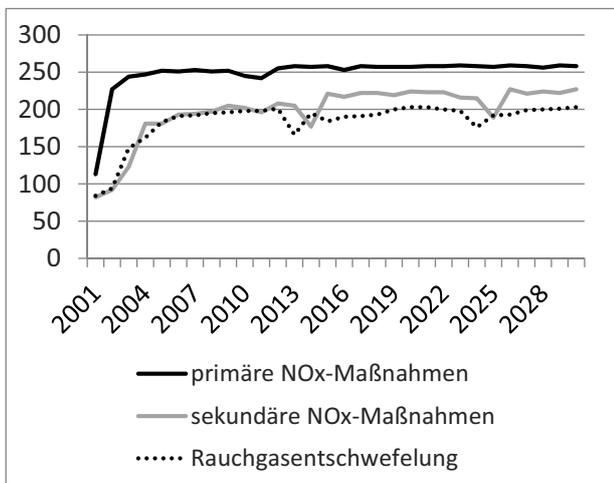


Abb. II.6.29.: Anzahl der implementierten EMM im Energiesektor bei einer NO<sub>x</sub>-Grenzwertverschärfung um 25%

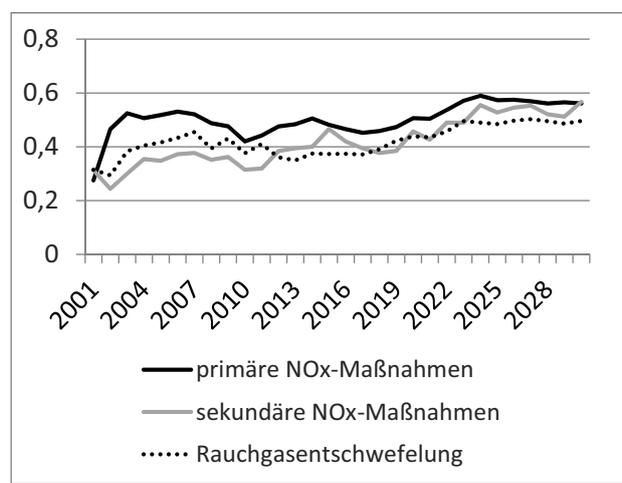


Abb. II.6.30.: Anteil der Produktionsmenge mit den implementierten EMM bei einer NO<sub>x</sub>-Grenzwertverschärfung um 25%

Somit lassen sich auch im Energiesektor bezüglich der Grenzwertverschärfungen eines Schadstoffes negative Effekte auf andere Schadstoffe aufzeigen. Der folgende Abschnitt fasst die aufgezeigten Ergebnisse nochmals zusammen.

## II.6.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die durchgeführten Simulationsläufe zeigen, dass die untersuchten Instrumente auf sehr unterschiedliche Art wirken und es auch sektorspezifisch bei der Anwendung gleicher Instrumente zu deutlichen Unterschieden kommen kann. So lässt sich z. B. für den Zement- sowie den Energiesektor feststellen, dass die analysierten Instrumente große Anreize zur Implementierung zusätzlicher EMM schaffen können. Gleichzeitig muss jedoch dem Stahlsektor attestiert werden, dass dieser vergleichsweise robust auf zusätzliche Anreize reagiert, da bereits das Basisszenario von umfassenden Investitionen geprägt ist.

Bezüglich der analysierten Instrumente lassen sich verschiedene Tendenzen ablesen. So können bei der Einführung eines Emissionshandelssystems für einen bestimmten Schadstoff Synergieeffekte auftreten, so dass die Implementierung eines weiteren Zertifikatehandels für einen anderen Schadstoff obsolet wird. Im Zementsektor z. B. werden die  $\text{SO}_2$ -Emissionen bereits umfassend durch den  $\text{CO}_2$ -Zertifikatehandel gemindert, während durch die zusätzliche Einführung eines  $\text{NO}_x$ -Emissionshandels weitere deutliche Minderungen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen erzielt werden können. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Zertifikate auf die Emissionsfracht abzielen und deshalb eher ganzheitliche Maßnahmen, die mehrere Schadstoffe mindern, wie z. B. Energieeinsparungen, gewählt werden.

Bei Betrachtung der Grenzwerte zeigt sich ein anderes Bild. Diese können andere Schadstoffe sogar negativ beeinflussen. So hat die Verschärfung des  $\text{NO}_x$ -Grenzwertes im Energiesektor einen Anstieg der  $\text{SO}_2$ -Emissionsfaktoren zur Folge. Die liegt daran, dass Grenzwerte vornehmlich auf Schadstoffkonzentrationen Bezug nehmen. Somit sind die Akteure bestrebt vor allem nachgeschaltete Maßnahmen zu implementieren, die zwar in der Regel eine höhere schadstoffspezifische Minderungseffizienz, jedoch keinen positiven Effekt auf andere Schadstoffe haben und andere EMM, die mehrere Schadstoffe mindern können, verdrängen.

Die Ökosteuer zeigt eine deutlich geringere Anreizwirkung in allen betrachteten Sektoren gegenüber den anderen Instrumenten. Dies liegt darin begründet, dass die

Gütersteuern einen wesentlich kleineren Kostenfaktor darstellen als beispielsweise ein Zertifikatehandel.

Auch wenn bei den durchgeführten Analysen der Zertifikatehandel durchweg als geeignetes Instrument erscheint, Emissionen ganzheitlich zu mindern, muss dennoch zusätzlich die wirtschaftliche Seite betrachtet werden. Im Falle des Energiesektors kann bereits ein CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis von 10 EUR/t zu einer Preissteigerung von ca. 18% führen, gesetzt den Fall, dass alle Kostensteigerungen an den Kunden übertragen werden. Somit kann keine allgemeingültige Aussage dazu gemacht werden, welches Instrument den anderen überlegen ist, nicht zuletzt da die Sektoren sehr unterschiedliche Reaktionen auf die gleichen Instrumente zeigen.

Die Simulationsläufe zeigen neben der Wirkungsweise der Instrumente ebenfalls die Notwendigkeit eines integrierten Ansatzes auf. So gibt die Rückkopplung des Stahl- und Energiesektors den Einfluss des Strompreises auf die verwendete Technologie (Elektrostahl bzw. Oxygenstahl) im Stahlsektor wieder. Bei einer getrennten Betrachtung der Sektoren bleibt dieser Einfluss außen vor.

## II.7. Zusammenfassung und Ausblick zu Teil II

Die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland zusammen mit der daraus resultierenden Problematik der Umweltbelastung und des Klimawandels stellen komplexe Rahmenbedingungen für politische Entscheidungsträger dar, deren Aufgabe die nachhaltige Gestaltung von Anreizen zur Einhaltung der Minderungsziele für Emissionen, z. B. festgehalten in der NEC-Richtlinie, ist. Nachhaltig bedeutet im Falle der Industrie, dass einerseits die Emissionen dauerhaft gesenkt werden sollen und andererseits dies nicht durch wirtschaftliche Einbußen, etwa durch Produktionsrückgänge, erkaufte werden soll. Die Gestaltung politischer Instrumente oder Instrumentenbündel ist also nur möglich, wenn sowohl die technische Seite der Emissionsentstehung in den einzelnen Anlagen wie auch die wirtschaftliche Seite, die maßgeblich die Entscheidungen der Anlagenbesitzer beeinflusst, abgebildet werden. In dem vorliegenden Teilmodell zur Industrie gelingt dies durch die Kopplung eines die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen aufspannenden Input-Output-Modells mit einer akteursbasierten Simulation, die die in der Produktion verwendeten Technologien berücksichtigt und so eine Abschätzung der entstehenden Emissionen ermöglicht.

Die Implementierung oder Änderung eines Instruments wie des Zertifikatehandels oder der Grenzwerte hat weitreichende Implikationen auf Wirtschaft und Umwelt. Modellseitig werden die wirtschaftlichen Akteure bspw. durch eine Besteuerung der Emissionen dazu veranlasst in Emissionsminderungsmaßnahmen zu investieren und so Emissionen zu senken. Gleichzeitig haben diese Entscheidungen, gesamtwirtschaftlich aggregiert, Folgen auf die nationale wirtschaftliche Entwicklung, die maßgeblich durch den sich ändernden Preis der Produkte gesteuert wird. Diese Kopplung von IOM und akteursbasierter Simulation wird zur Un-

tersuchung der Entwicklung verschiedener Industriesektoren, die sich hinsichtlich ihrer Referenzprozesse, eingesetzten Minderungstechnologien und finanziellen Struktur maßgeblich unterscheiden, verwendet. Dabei reagieren die Zement-, die Eisen- und Stahlindustrie sowie die Energieversorgung nicht unabhängig voneinander sondern in Abhängigkeit der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die wiederum durch die anderen Sektoren beeinflusst werden. So hat bspw. der Strompreis einen großen Einfluss auf die zur Stahlherstellung verwendete Technologie.

Anhand von Szenarios wird der Einfluss ausgewählter Instrumente untersucht und deren Wirkung hinsichtlich der Entwicklung der Emissionen aber auch der Preise bis zum Jahr 2030 durch Simulationsläufe abgeschätzt. Hierzu werden auch exogene Rahmenbedingungen wie die durch den Weltmarkt beeinflussten Brennstoffpreise mit den sich endogen ändernden Inlandspreisen verknüpft. Um die Wirkung einzelner Instrumente oder von Instrumentenbündeln abzuschätzen, werden diese innerhalb der Szenarios unter ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen variiert. Es zeigt sich, dass die untersuchten Instrumente sehr unterschiedliche Anreize schaffen und die Reaktionen der verschiedenen Industriesektoren auf die selben Instrumente ebenfalls deutlich voneinander abweichen. Während ein Zertifikatehandel häufig Synergieeffekte bezüglich anderer Schadstoffe mit sich bringt, wirkt eine Grenzwertverschärfung primär bei dem betroffenen Schadstoff. Auf der anderen Seite führt das Einführen eines Emissionshandelssystems zu höheren Produktionskosten, die an die Kunden über die Endproduktpreise weitergegeben werden können. Die Variation der Ökosteuer bringt keine größeren Anreize bezüglich des Investitionsverhalten mit sich.

Eine allgemeingültige Aussage hinsichtlich der Effizienz der Instrumente kann nicht gemacht werden. Vielmehr sind diese für den speziellen Anwendungsfall zu prüfen. So kann z. B. ein den CO<sub>2</sub>-Emissionshandel ergänzender NO<sub>x</sub>-Zertifikatehandel im Zementsektor eine zusätzliche deutliche Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen forcieren, während ein ergänzender SO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel kaum einen zusätzlichen Effekt bezüglich der SO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist. Dies zeigt die Notwendigkeit, die komplexen technischen Prozesse und wirtschaftlichen Rückkopplungen explizit zu modellieren.

---

Insgesamt ist es im Industriemodell gelungen, die Entstehung der Emissionen durch industrielle Prozesse technisch zu fundieren und in einen wirtschaftlichen Kontext zu bringen. Die Wirkung eines bestimmten Instrumentes oder eines Instrumentenbündels kann sowohl umweltbezogen als auch wirtschaftlich abgeschätzt werden. Somit ist das beschriebene Teilmodell dazu in der Lage, Entscheidungsunterstützung im Rahmen der nachhaltigen Gestaltung einer nationalen Emissionsminderungspolitik zu leisten und die Wirkzusammenhänge zwischen den Entscheidungen wirtschaftlicher Akteure und der Emissionsminderung aufzuzeigen.

Da die Berechnung der Emissionen auf Anlagenbasis stattfindet und somit deutschlandweit verteilte Punktquellen ausgewiesen werden können, liegt eine mögliche Erweiterung des Teilmodells Industrie in der Ankopplung einer Ausbreitungsmodellierung der berechneten Emissionen. Auf diese Weise würde die räumliche Verteilung der Produktionsanlagen bei der Auswahl geeigneter Instrumente deutlich an Gewicht gewinnen und Auswirkungen auf die Umwelt könnten besser beziffert werden.

Eine weitere mögliche Erweiterung ist die Abbildung der NMVOC-Emissionen. Diese stellen insofern eine zusätzliche Herausforderung dar, als dass sie vor allem bei der Lösemittelverwendung auftreten und somit auf Grund der Dezentralität der Lösemittel verwendenden Werkstätten oder Fabriken sehr stark räumlich verteilt anfallen. Die Einbeziehung der NMVOC-Emissionen würde die zusätzliche Modellierung fertigungstechnischer Produktionsverfahren, im Gegensatz zu den bereits implementierten Sektoren aus der Prozessindustrie, bedingen.



## II.8. Literatur zu Teil II

- [Aben u. a. 2008] ABEN, Jan ; HETTELINGH, Jean-Paul ; SCHÖPP, Wolfgang:  
*RAINS-NL: An Integrated Assessment Model to support Dutch air quality policy making.* www.niam.scarp.se. 2008
- [Achterbosch und Bräutigam 2000] ACHTERNBOSCH, M. ; BRÄUTIGAM, K.-  
R.: *Herstellung von Zementklinker. Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen.* Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2000
- [Amann u. a. 2004] AMANN, Markus ; COFALA, Janusz ; HEYES, Chris ; KLIMONT, Zbigniew ; MECHLER, Reinhard ; POSCH, Max ; SCHÖPP, Wolfgang:  
RAINS Review 2004 - The RAINS model. Documentation of the model approach prepared for the RAINS Peer review 2004. Laxenburg, Österreich : International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Februar 2004. – IIASA - Interim Report
- [Baumbach 1993] BAUMBACH, Günter: *Luftreinhaltung.* 3. Auflage. Berlin : Springer-Verlag, 1993
- [BDZ 2002] BDZ (Hrsg.): *Zahlen und Daten. 2001-2002.* Berlin : Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. (BDZ), 2002
- [BDZ 2010] BDZ (Hrsg.): *Zahlen und Daten. 2009-2010.* Berlin : Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. (BDZ), 2010
- [BMU 2008] BMU: *Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Ener-*

*gien - Leitstudie 2008*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Oktober 2008

- [BMU 2010] BMU: Erneuerbare Energien in Zahlen / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). 2010. – Internet-Update ausgewählter Daten
- [Bolwerk u. a. 2006] BOLWERK, Richard ; EBERTSCH, Gerald ; HEINRICH, Dr. M. ; PLICKERT, Sebastian ; OERTER, Dr. M.: *German Contribution to the Review of the Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. Umweltbundesamt, 2006
- [Capros u. a. 2010] CAPROS, P. ; MANTZOS, L. ; TASIOS, N. ; VITA, A. D. ; KOUVARITAKIS, N.: *EU energy trends to 2030 - UPDATE 2009*. European Commission, 2010
- [Chiang und Wainwright 2006] CHIANG, Alpha C. ; WAINWRIGHT, Kevin: *Fundamental methods of mathematical economics*. 4. ed., intern. ed., [Nachdr.]. Boston, Mass. [u.a.] : McGraw-Hill [u.a.], 2006
- [D'Elia u. a. 2009] D'ELIA, I. ; BENCARDINO, M. ; CIANCARELLA, L. ; CONTALDI, M. ; VIALETTO, 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), S. 6182–6189
- [Deutsche Emissionshandelsstelle 2005] DEUTSCHE EMISSIONS-HANDELSSTELLE: *Emissionsfaktoren und Kohlenstoffgehalte*. Dezember 2005. – URL [http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/Archiv/Emissionsberichterstattung\\_2005-2007/EB2006\\_Stoffliste\\_Emissionsberichterstattung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/Archiv/Emissionsberichterstattung_2005-2007/EB2006_Stoffliste_Emissionsberichterstattung.pdf?__blob=publicationFile). – aktualisiert November 2006

- [EEA 2001] EEA: European Pollutant Emission Register - Datensatz 2001 / European Environment Agency (EEA). URL [www.daten.eper.de](http://www.daten.eper.de), 2001. – Datenbank
- [EEA 2009] EEA: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2009 / European Environment Agency (EEA). 2009. – Technical report No 9/2009
- [EGTEI 2003] EGTEI: *Final Background Document on Cement Sector*. Expert Group on Techno-Economic Issues, 2003
- [EGTEI 2004] EGTEI: *Combustion Sector (part 1: plants greater than 500 MWth)*. Expert Group on Techno-Economic Issues, 2004
- [EIPPCB 2001] EIPPCB: Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel / European IPPC Bureau. o.O., 2001. – BVT-Merkblatt
- [EIPPCB 2006] EIPPCB: Best Available Techniques Reference Document on Emissions from Storage / European IPPC Bureau. o.O., 2006. – BVT-Merkblatt
- [EIPPCB 2010a] EIPPCB: Best Available Techniques Reference Document on the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries / European IPPC Bureau. o.O., 2010. – BVT-Merkblatt
- [EIPPCB 2010b] EIPPCB: Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel / European IPPC Bureau. o.O., 2010. – 2. Entwurf zur Überarbeitung des BVT-Merkblatts
- [Evans u. a. 2010] EVANS, Annette ; STREZOV, Vladimir ; EVANS, Tim J.: Sustainability considerations for electricity generation from biomass. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010), S. 1419 – 1427
- [Fandel 1996] FANDEL, G.: *Produktion I - Produktions- und Kostentheorie*. 5. Auflage. Springer, 1996

- [Fandel u. a. 2009] FANDEL, G. ; FISTEK, A. ; STÜTZ, S.: *Produktionsmanagement*. Springer, 2009
- [Fichtner 1999] FICHTNER, Wolf: *Strategische Optionen der Energieversorger zur CO<sub>2</sub>-Minderung - Ein Energie- und Stoffflußmodell zur Entscheidungsunterstützung*. Berlin : Erich Schmidt Verlag, 1999
- [Ghenda 2009] GHENDA, Jean T.: *8. CO<sub>2</sub>-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland*. Düsseldorf : Stahlinstitut VDEh, August 2009
- [Global CCS Institute 2009] GLOBAL CCS INSTITUTE: *Strategic Analysis of the Global Status of Carbon Capture and Storage, Report 2: Economic Assessment of Carbon Capture and Storage Technologies*. Global CCS Institute, 2009
- [Gruppen 2008] GRUPEN, Claus: *Grundkurs Strahlenschutz - Praxiswissen für den Umgang mit radioaktiven Stoffen*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008
- [Hillmann 2003] HILLMANN, Carsten: *Primäre Maßnahmen zur Minderung der Emission polychlorierter Dibenzodioxine und Dibenzofurane an einer Sinteranlage für eisenhaltige Reststoffe*, TU Clausthal - Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Dissertation, 2003
- [Holub und Schnabl 1994a] HOLUB, Hans W. ; SCHNABL, Hermann: *Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse*. München : Oldenbourg, 1994
- [Holub und Schnabl 1994b] HOLUB, Hans W. (Hrsg.) ; SCHNABL, Hermann (Hrsg.): *Input-Output-Rechnung: Input-Output-Tabellen*. Oldenbourg, 1994
- [IEA 2008] IEA: *CO<sub>2</sub> Capture and Storage - a key abatement option*. International Energy Agency, 2008
- [IEA 2009] IEA: *World Energy Outlook 2009*. Paris : International Energy Agency (IEA), 2009

- [Ilsen ] ILSSEN, R.: *Entwicklung eines Emissionsprojektionsmodells durch Kopplung eines aktorsbasierten Ansatzes mit einem Input-Output-Modell*, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Dissertation. – in Vorbereitung
- [IPCC 2006] IPCC ; EGGLESTON, H. S. (Hrsg.) ; BUENDIA, L. (Hrsg.) ; MIWA, K. (Hrsg.) ; NGARA, T. (Hrsg.) ; TANABE, K. (Hrsg.): *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES, Japan, 2006. – Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme
- [Iwaniec 2010] IWANIEC, Mario: Die Betrachtung der Risiken der Kernenergie in ausgewählten deutschen Printmedien. In: *Berliner Schriften zur Medienwissenschaft Band 13* (2010)
- [Klaassen u. a. 2004] KLAASSEN, G. ; AMANN, M. ; BERGLUND, C. ; COFALLA, J. ; HÖGLUND-ISAKSSON, L. ; HEYES, C. ; MECHLER, R. ; TOHKA, A. ; SCHÖPP, W. ; WINIWARDER, W.: *The Extension of the RAINS model to Greenhouse Gases / International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)*. Laxenburg, Österreich, 2004. – IIASA Interim Report IR-04-015
- [Klinski u. a. 2007] KLINSKI, Stefan ; BUCHHOLZ, Hanns ; KRÜGER, Detlef ; SCHULTE, Martin ; RISCH, Jessica ; RISCH, Michael ; REHFELDT, Knud ; GEILE, Anna-Katrin ; WALLASCH, Jan ; NEHLS, Georg: *Entwicklung einer Umweltstrategie für die Windenergienutzung an Land und auf See*. Umweltbundesamt, 2007
- [Konstantin 2009] KONSTANTIN, Panos: *Praxisbuch Energiewirtschaft*. 2. bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009
- [Kraft u. a. 2002] KRAFT, A. ; MARKEWITZ, P. ; NOLLEN, A. ; VÖGELE, S.: IKARUS-MARKAL. In: FORUM FÜR ENERGIEMODELLE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SYSTEMANALYSEN IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Energie-*

*modelle zum Kernausstieg in Deutschland.* Berlin : Physika Verlag, 2002 (Reihe Umwelt und Ökonomie No. 34)

[Lehnhoff 2010] LEHNHOFF, Sebastian: *Dezentrales vernetztes Energiemanagement - Ein Ansatz auf Basis eines verteilten adaptiven Realzeit-Multiagentensystems*, Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2010

[Leontief 1951] LEONTIEF, Wassily: *The Structure of American Economy, 1919-1939.* New York : Oxford University Press, 1951

[LUBW 2005] LUBW: *Emissionsfaktoren-Handbuch Emissionserklärung 2004 Baden-Württemberg / Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.* Februar 2005. – Bericht Nr. 4-02/2005

[Markewitz und Stein 2003] MARKEWITZ, P. (Hrsg.) ; STEIN, G. (Hrsg.): *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland.* Jülich : Forschungszentrum Jülich, 2003

[Mayer 2007] MAYER, Helmut: *Calculation and analysis of a hybrid energy input-output table for Germany within the Environmental-Economic Accounting (EEA).* In: *EEA Online Publication (2007)*

[Miller und Blair 2009] MILLER, Ronald E. ; BLAIR, Peter D.: *Input-Output-Analysis.* Cambridge University Press, 2009

[Möst 2006] MÖST, Dominik: *Zur Wettbewerbsfähigkeit der Wasserkraft in liberalisierten Elektrizitätsmärkten: eine modellgestützte Analyse dargestellt am Beispiel des schweizerischen Energieversorgungssystems*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2006

[Nitsch 2008] NITSCH, Joachim: *Further development of the „Strategy to increase the use of renewable energies“ within the context of the current climate protection goals of Germany and Europe.* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2008

- [Nitsch u. a. 2004] NITSCH, Joachim ; KREWITT, Wolfram ; NAST, Michael ; VIEBAHN, Peter ; GÄRTNER, Sven ; PEHNT, Martin ; REINHARDT, Guido ; SCHMIDT, Regina ; UIHLEIN, Andreas ; SCHEURLEN, Karl ; BARTHEL, Claus ; FISCHEDICK, Manfred ; MERTEN, Frank: *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2004
- [Nunge 2001] NUNGE, Sandrine: *Der Referenzanlangenansatz zur Ableitung von Luftreinhaltestrategien*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2001
- [Oxley u. a. 2003] OXLEY, T. ; APSIMON, H. ; DORE, A. ; SUTTON, M. ; HALL, J. ; HEYWOOD, E. ; GONZALES DEL CAMPO, T. ; 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), S. 236–249
- [Panwar u. a. 2011] PANWAR, N.L. ; KAUSHIK, S.C. ; KOTHARI, S.: Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), S. 1513–1524
- [Pelisser u. a. 2011] PELISSER, Fernando ; ZAVARISE, Nilomar ; LONGO, Tiago A. ; BERNARDIN, Adriano M.: Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. In: *Journal of Cleaner Production* 19 (2011), S. 757–763
- [Perlwitz 2007] PERLWITZ, Holger: *Der Erdgasmarkt für den Kraftwerkssektor unter CO<sub>2</sub>-Minderungsverpflichtungen. Eine modellgestützte Analyse des europäischen Energiemarktes*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2007
- [Pollak und Wales 1969] POLLAK, Robert A. ; WALES, Terence J.: Estimation of the Linear Expenditure System. In: *Econometrica* 37 (1969)

- [Ragwitz u. a. 2005] RAGWITZ, Mario ; SCHLEICH, Joachim ; HUBER, Claus ; RESCH, Gustav ; FABER, Thomas ; VOOGT, Monique ; COENRAADS, Rogier ; CLEIJNE, Hans ; BODO, Peter: *FORRES 2020: Analysis of the renewable energy sources' evolution up to 2020*. Fraunhofer ISI, EEG, ECOFYS, KEMA, REC, 2005
- [Reis u. a. 2005] 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), S. 1524–1531
- [Rentz u. a. 1999a] RENTZ, O. ; NUNGE, S. ; LAFORSCH, M. ; HOLTSMANN, T.: *Report of the Task Force on the Assessment of Abatement Options/Techniques for Nitrogen Oxides from Stationary Sources*. Karlsruhe : United Nations/Economic Commission for Europe (UN/ECE): Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, 1999
- [Rentz u. a. 1999b] RENTZ, O. ; SCHULTSMANN, F. ; SPENGLER, T. ; SIEVERDINGBECK, A. ; ENGELS, B.: *Prozessintegrierte Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie*. Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, 1999
- [Rosen 2008] ROSEN, Johannes: *The future role of renewable energy sources in European electricity supply: A model-based analysis for the EU-15*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2008
- [Seidler 2005] SEIDLER, Torsten: *Minderung rohmaterialbedingter SO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie*, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Dissertation, 2005
- [Statistisches Bundesamt 2003] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Produzierendes Gewerbe: Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie*

des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Jahr 2001 / Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2003. – Fachserie 4, Reihe 4.3

[Statistisches Bundesamt verschiedene Jahrgänge] STATISTISCHES BUNDESAMT: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen: Input-Output-Rechnung / Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge. – Fachserie 18 Reihe 2

[TNO 2010] TNO, FUB (Hrsg.) ; Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung (TNO), Freie Universität Berlin (FUB) (Veranst.): *Tagungsband zum Fachgespräch „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST*. Juni 2010. – Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 206 43 200/01

[Ullrich 1996] ULLRICH, H.: *Wirtschaftliche Planung und Abwicklung verfahrenstechnischer Anlagen*. 2. Auflage. Essen : Vulkan-Verlag, 1996

[Umweltbundesamt 2003] UMWELTBUNDESAMT: *Erste Anlage zur katalytischen Entstickung in einem Zementwerk*. Pressemitteilung des Umweltbundesamtes vom 21.7. 2003

[Umweltbundesamt 2009] UMWELTBUNDESAMT: *Datenbank „Kraftwerke in Deutschland“ - Liste der sich in Betrieb befindlichen Kraftwerke bzw. Kraftwerksblöcke ab einer elektrischen Bruttoleistung von 100 Megawatt*. 2009

[Umweltbundesamt 2010a] UMWELTBUNDESAMT: German Informative Inventory Report / Umweltbundesamt. URL <http://iir-de.wikidot.com/>, 2010. – Berichterstattung 2010 unter dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (UN ECE-CLRTAP)

[Umweltbundesamt 2010b] UMWELTBUNDESAMT: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2008 / Umweltbundesamt. 2010. – Berichterstattung 2010 unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UN FCCC)

- [Umweltbundesamt 2010c] UMWELTBUNDESAMT: *Strommix in Deutschland - Nettostromerzeugung im Jahr 2008 in Deutschland*. 2010
- [Umweltbundesamt 2011] UMWELTBUNDESAMT: *Datenbank „Kraftwerke in Deutschland“ - Liste der sich in Betrieb befindlichen Kraftwerke bzw. Kraftwerksblöcke ab einer elektrischen Bruttoleistung von 100 Megawatt*. 2011
- [VDEh/WV Stahl 2010] VDEH/WV STAHL: *stahl-online.de*. 30. September 2010. – URL [http://www.stahl-online.de/forschung\\_und\\_technik/energie\\_und\\_umwelttechnik/energiwirtschaft.asp](http://www.stahl-online.de/forschung_und_technik/energie_und_umwelttechnik/energiwirtschaft.asp)
- [VDZ 2002] VDZ: *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001*. Düsseldorf : Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), 2002
- [VDZ 2008] VDZ: *Zement-Taschenbuch*. Düsseldorf : Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), 2008
- [VDZ 2010] VDZ: *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2009*. Düsseldorf : Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), 2010
- [Wolff 2005] WOLFF, Folke: *Biomasse in Baden-Württemberg - ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz als Energieträger*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2005
- [World Bank 2010a] WORLD BANK: *Commodity forecast (constant US 2000\$ index)*. 2010. – URL <http://go.worldbank.org/1CMJ95JEZ0>
- [World Bank 2010b] WORLD BANK: *Global Economic Prospects - Fiscal Headwind and Recovery*. The World Bank, 2010
- [WV Stahl 2001] WV STAHL: *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie*. Wirtschaftsvereinigung Stahl, Verein deutscher Eisenhüttenleute, 2001

[Zahoransky u. a. 2010] ZAHORANSKY, Richard ; ALLELEIN, Hans-Josef ; BOLLIN, Elmar ; OEHLER, Helmut ; SCHELLING, Udo: *Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010

[Zanini u. a. 2005] ZANINI, G. ; PIGNATELLI, T. ; MONFORTI, F. ; VIALETTO, G. ; VITALI, L. ; BRUSASCA, G. ; CALORI, G. ; FINARDI, S. ; RADICE, P. ; SILIBELLO, C.: MINNI Project: an integrated assessment modelling system for policy making. In: *Proc. of MODSIM 2005 Int. Congress on Modelling and Simulation*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Dezember 2005



## II.9. Variablenverzeichnis zu Teil II

### Variablen des Input-Output-Modells

$A$	Matrix der Vorleistungen in Werteinheiten
$B$	Matrix der wirtschaftlichen Koeffizienten (Kostenstrukturmatrix) bezogen auf inländische Produktion
$C$	Matrix der technischen Koeffizienten (Technologiematrix) bezogen auf inländische Produktion
$\hat{B}$	Matrix der wirtschaftlichen Koeffizienten für Primärfaktoren bezogen auf inländische Produktion
$\hat{C}$	Matrix der technischen Koeffizienten für Primärfaktoren bezogen auf inländische Produktion
$GS$	Gütersteuern
$GSS$	Gütersteuersätze
$I$	Einheitsmatrix
$L$	Anzahl an Primäraufwandsbereichen
$M$	Anzahl an Endnachfragebereichen
$N$	Anzahl an Produktionsbereichen
$P$	Matrix der Preise
$a$	Vorleistungsstrom in Werteinheiten
$ab$	Abschreibungen (als Endnachfragestrom)
$ae$	Arbeitsentgelte
$b$	wirtschaftliche Koeffizienten bezogen auf inländische Produktion
$bai$	Bruttoanlageinvestitionen
$bav$	Bruttoanlagevermögen
$c$	technische Koeffizienten bezogen auf inländische Produktion

<i>d</i>	Dämpfungsparameter
<i>kp</i>	privater Konsum
<i>ks</i>	staatlicher Konsum
<i>ex</i>	Exporte
<i>gs</i>	Gütersteuern
<i>nd</i>	durchschnittliche Nutzungsdauer
<i>i</i>	Einheitsvektor
<i>im</i>	Importe
<i>inv</i>	Investitionsnachfrage
<i>ip</i>	Preisindex
<i>ix</i>	Produktionsindex
<i>nb</i>	Nettobetriebsüberschuss
<i>pa</i>	Produktionsabgaben minus Subventionen
<i>qausr</i>	Anteil der Investitionen in Ausrüstung an Gesamtinvestitionen
<i>qimp</i>	Wertmäßiger Anteil der Importe am Gesamten Aufkommen
<i>qinl</i>	Mengenmäßiger Anteil der Inlandsproduktion am Gesamten Aufkommen
<i>sae</i>	Spezifische Arbeitsentgelte
<i>w</i>	Primäraufwandstrom bzw. Wertschöpfung
<i>x</i>	Produktion eines Produktionsbereichs in Werteinheiten (Produktionswert)
<i>y</i>	Endnachfrage
<i>z</i>	Produktion eines Produktionsbereichs in physischen Einheiten
<i>BETA</i>	Matrix der wirtschaftlichen Koeffizienten (Kostenstrukturmatrix) bezogen auf Gesamtes Aufkommen
$\Gamma$	Matrix der technischen Koeffizienten (Technologiematrix) bezogen auf Gesamtes Aufkommen
$\widehat{BETA}$	Matrix der wirtschaftlichen Koeffizienten für Primärfaktoren bezogen auf Gesamtes Aufkommen

---

$\hat{\Gamma}$	Matrix der technischen Koeffizienten für Primärfaktoren bezogen auf Gesamtes Aufkommen
$\beta$	wirtschaftliche Koeffizienten bezogen auf Gesamtes Aufkommen
$\gamma$	technische Koeffizienten bezogen auf Gesamtes Aufkommen
$\pi$	Preise aus Preismodell
$\sigma^{bai}$	Verflechtungsmatrix zur Umrechnung von Investitionsbereichen nach Produktionsbereichen
$\sigma^{VZ}$	Verflechtungsmatrix zur Umrechnung von Verwendungszwecken des privaten Konsums nach Produktionsbereichen
$\sigma^{WZ}$	Verflechtungsmatrix zur Umrechnung von Wirtschaftszweigen nach Produktionsbereichen
$\chi$	Gesamtes Aufkommen bzw. gesamte Verwendung
$\omega$	Wertschöpfung je Einheit Output

### Indizes

$i, j$	Indizes für Produktionsbereiche bzw. Güter
$k$	Index der Konsum-Bereiche
$l$	Index der Primäraufwandsbereiche
$m$	Index der Endnachfragebereiche
$t$	Index der Perioden
$PB$	Index zur Kennzeichnung einer Einteilung nach Produktionsbereichen
$VZ$	Index zur Kennzeichnung einer Einteilung nach Verwendungszwecken
$WZ$	Index zur Kennzeichnung einer Einteilung nach Wirtschaftszweigen

### Variablen des Industriemodells

$Abs$	Abschreibungen
$Agv$	Abgasvolumen
$AR$	Aktivitätsrate

<i>D</i>	Direktbedarfsmatrix
<i>E</i>	Emissionen
<i>EF</i>	Emissionsfaktor
<i>ES</i>	Steuersatz auf Emissionen
<i>EZ</i>	Preis für Emissionszertifikate
<i>G</i>	Gesamtbedarf
<i>GS</i>	Gütersteuern
<i>GSS</i>	Gütersteuersatz
<i>GSK</i>	Gütersteuer-Koeffizient
<i>GW</i>	Grenzwert
<i>I</i>	Investitionsausgaben
<i>IK</i>	Inputkoeffizienten
<i>K</i>	Kosten
<i>Kap</i>	Kapazität
<i>LD</i>	Lebensdauer
<i>Lohn</i>	Arbeitsentgelt
<i>N</i>	Anzahl
<i>P</i>	Preismatrix
<i>RW</i>	Rangwert
<i>S</i>	Prozentuale Überschreitung der Grenzwerte
<i>SE</i>	Spezifische Emissionen
<i>ST</i>	Strafterm
<i>StK</i>	Stückkosten
<i>T<sup>anwendbar</sup></i>	Matrix zur Anwendbarkeit von EMM auf Anlagentypen
<i>T<sup>kombinierbar</sup></i>	Matrix zur Kombinierbarkeit von EMM
<i>V</i>	Vorteilhaftigkeit einer EMM
<i>X</i>	Gesamtnachfrage
<i>ci</i>	Investitionsabhängige Kosten
<i>g</i>	Gewichtungsfaktor
<i>n</i>	Größendegressionsexponent

---

$\eta$	Minderungseffizienz
$\kappa$	Verfügbares Kapital

### **Indizes**

$a$	Index der Anlagen
$bs$	Index der Brennstoffe
$c$	Index der Kostenkategorien
$d$	Index der Anlagen-Teilprozesse
$i, j$	Indizes für Inputfaktoren bzw. Produkte
$m$	Index der Emissionsminderungsmaßnahmen
$n$	Index für Iterationsschritte
$p$	Index der Schadstoffe
$s$	Index der Sektoren
$t$	Index der Perioden
$w$	Index der Werke



## II.10. Anhang zu Teil II

Tab. II.10.1.: Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche

Produktions- bereiche StaBA	Produktions- bereiche IOM	Güter im Industrie- modell	Bezeichnung
1	1	1	Landwirtschaft, gewerbliche Jagd
2	2	2	Forstwirtschaft
3	3	3	Fischerei und Fischzucht
4	4	4	Steinkohlenbergbau und -brikettherstellung
	5	5	Braunkohlenbergbau und -brikettherstellung, Torfherstellung
5	6	6	Gewinnung von Erdöl, Erbrg verb Dienstleistg
	7	7	Gewinnung von Erdgas, Erbrg verb Dienstleistg
6	8	8	Bergbau Uran- und Thoriumerze, Erzbergbau
7			
8	9	9	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau
9	10	10	Herstellung von Nahrungs-, Futtermitteln und Getränken
10			
11	11	11	Tabakverarbeitung
12	12	12	Textilgewerbe
13	13	13	Bekleidungs-gewerbe
14	14	14	Ledergewerbe
15	15	15	Säge-, Hobel- und Holzimprägnierwerke
16	16	16	Herstellung von Holzstoff, Zellstoff, Papier; Karton und Pappe
17	17	17	Papier-, Karton- und Pappeverarbeitung
18	18	18	Verlags- und Druckgewerbe
19			
20	19	19	Kokerei
	20	20	Mineralölverarbeitung
	21	21	Herstellung und Verarbeitung von Spalt- und Brutstoffen
21	22	22	Pharmazeutische Industrie
22	23	23	Chemische Industrie (ohne Pharmazeutische Industrie)

Tab. II.10.1.: Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche

<b>Produktions- bereiche StaBA</b>	<b>Produktions- bereiche IOM</b>	<b>Güter im Industrie- modell</b>	<b>Bezeichnung</b>
23	24	24	Herstellung von Gummiwaren
24	25	25	Herstellung von Kunststoffwaren
25	26	26	Herstellung und Verarbeitung von Glas
26	27	27	Keramik (ohne Ziegelei und Baukeramik), Fliesen
27	28	28	Erzeugung von Roheisen, Stahl, Ferroleg (EGKS)
	29	29	Herstellung von Rohren
28	30	30	Erzeugung und erste Bearbeitung von NE-Metallen
29	31	31	Gießereiindustrie
30	32	32	Metallerzeugnisse
31	33	33	Herstellung von Maschinen
32	34	34	Herstellung von Büromaschinen, DV-Geräten, U-Einrichtungen
33	35	35	Herstellung von Geräten der Elektrizitätserzeugung, -verteilung u.ä.
34	36	36	Rundfunk-, Fernseh- und Nachrichtentechnik
35	37	37	Medizin-, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik, Optik
36	38	38	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
37	39	39	sonstige Fahrzeuge
38	40	40	Herstellung von Möbeln
39	41	41	Recycling
40	42	42	Elektrizitätsversorgung
41	43	43	Gasversorgung
40	44	44	Fernwärmeversorgung
42	45	45	Wasserversorgung
43	46	46	Vorbereitende Baustellenarbeiten
44	47	47	Bauinstallation
45	48	48	Handel mit Kraftwagen, Tankstellen
46	49	49	Handelsvermittlung und Großhandel (ohne Kfz)
47	50	50	Einzelhandelsleistungen; Reparatur an Gebrauchsgütern
48	51	51	Gastgewerbe
49	52	52	Eisenbahnen
50	53	53	Sonstiger Landverkehr (Busse, U-, S-Bahn, Taxis, Güterbeförderung)
51	54	54	Schifffahrt
52	55	55	Luftfahrt
53	56	56	DL bezüglich Hilfs- und Nebentätigkeiten für den Verkehr

Tab. II.10.1.: Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche

<b>Produktions- bereiche StaBA</b>	<b>Produktions- bereiche IOM</b>	<b>Güter im Industrie- modell</b>	<b>Bezeichnung</b>
54	57	57	Nachrichtenübermittlungs-DL
55	58	58	Kredit- und Versicherungsgewerbe
56			
57			
58	59	59	Grundstücks- und Wohnungswesen, Vermie- tung beweglicher Sachen (ohne Personal), DL der Datenverarbeitung und von Datenban- ken, Forschungs- und Entwicklungsleistungen, Unternehmensbezogene DL
59			
60			
61			
62			
63	60	60	Öffentliche Verwaltung, Auswärtige Angele- genheiten und Verteidigung, Sozialversicherung
64			
65	61	61	Erziehung und Unterricht
66	62	62	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen
67	63	63	Abwasser-, Abfallbeseitigung und sonstige Entsorgung
70	64	64	Erbringung von sonstigen Dienstleistungen
68	65	65	Kultur-, Sport- und Unterhaltungs-DL, DL von Interessenvertretungen, Kirchen u.Ä., DL priva- ter Haushalte
69			
71			
		66	Arbeit
	23	67	Ammoniak
	9	68	Kalk, Kalkstein
	20	69	Ottokraftstoffe, Rohbenzin
	20	70	Flugturbinenkraftstoff
	20	71	Dieselmotorkraftstoff
	20	72	Heizöl leicht
	20	73	Heizöl schwer
	20	74	Petrolkoks
	20	75	Flüssiggas
	2	76	Holz, Stroh u.a feste Stoffe
	9	77	Biodiesel u.a. flüssige Stoffe
	63	78	Siedlungsabfälle einschl. Deponiegas
	27	79	Zement
		80	Prozesswärme
		81	Klinker
		82	Glas (ohne Altglas)
		83	Sinter
		84	Roheisen

Tab. II.10.1.: Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche

<b>Produktions- bereiche StaBA</b>	<b>Produktions- bereiche IOM</b>	<b>Güter im Industrie- modell</b>	<b>Bezeichnung</b>
		85	flüssiger Stahl
	41	86	Altreifen
	41	87	Altöl
		88	Tiermehl
		89	Lösungsmittel (Abfall)
		90	Gips aus REA
	41	91	Rückstände aus Eisen- und Stahlindustrie
	41	92	Hüttensand
	41	93	Aschen
	41	94	Gießereialsand
	41	95	Rückstände aus NE-Metallindustrie
	41	96	Gewerbeabfall (Papier)
	41	97	Gewerbeabfall (Kunststoff)
	41	98	Gewerbeabfall (Verpackungen)
	41	99	Gewerbeabfall (sonstiger)
	20	100	Heizöl, schwer, mit hohem Schwefelgehalt
		101	Biomasse
		102	Kokereigase
		103	Torf
		104	Hochofengas
		105	Koksgrus
		106	Konvertergas (BOF G)
		107	Heißwind
		108	Direkt reduziertes Eisen
	41	109	eisenhaltiger Schrott
		110	Raffineriegas
		111	Abwärme (Waste heat)
	41	112	Altglas
		113	Koks (importiert)

## **Teil III.**

# **Wohngebäude**

**(J. Stengel, M. Unholzer, M. Hiete, T. Lützkendorf, F. Schultmann)**



## **III.1. Einführung und Modellübersicht**

### **III.1.1. Hintergrund und existierende Modelle**

Wegen ihrer Bedeutung hinsichtlich des Endenergiebedarfs, des Ressourcenverbrauchs, der Luftschadstoffemissionen, Treibhausgasemissionen und der Flächeninanspruchnahme, spielen Wohngebäude eine bedeutsame Rolle bei der Verminderung von Umweltbelastungen und stehen deshalb im Fokus politischer Entscheidungsträger. Entsprechend versucht eine Vielzahl von Modellen, den Energiebedarf im Wohngebäudesektor auf regionaler und nationaler Ebene zu quantifizieren und zu prognostizieren. Kavgiv u. a. (2010) und Swan und Ugursal (2009) klassifizieren die zugrundeliegenden Ansätze in „Top-down“ und „Bottom-up“. Während bei „Top-down“-Modellen weiterhin ökonometrische und technologische Modelle unterschieden werden können, können „Bottom-up“-Modelle in statistische, auf der Bauphysik basierende und hybride Modelle eingeteilt werden.

„Bottom-up“-Modelle erfordern das Treffen zahlreicher Annahmen, um Datenlücken zu füllen und kleine Stichproben zu verallgemeinern. Swan und Ugursal (2009) erklären die schlechte Datenverfügbarkeit für den Wohngebäudesektor im Vergleich zu anderen Sektoren mit der Einzigartigkeit der Gebäude, datenschutzrechtlichen Gründen, dem starken Einfluss des Nutzerverhaltens und den relativ hohen Kosten detaillierter Messungen. Typische Datenquellen umfassen Befragungen, individuelle Rechnungsdaten, detaillierte Messungen und Energiebedarfs-schätzungen des gesamten Sektors.

„Top-down“-Modelle verwenden aggregierte Daten wie bspw. makroökonomische Indikatoren, Anzahl von Wohnungen inklusive Neubau- und Abrissraten, klimatische Bedingungen und Diffusionsgrad von Haushaltsgeräten. Somit ist die

Kombination von guter Datenverfügbarkeit und der Annahme der Fortschreibbarkeit historischer Daten zugleich Stärke und Schwäche der „Top-Down“-Modelle. Typische Daten von „Bottom-up“-Modellen umfassen Wohnungseigenschaften, Klimadaten, Innentemperaturen und Nutzungsprofile (Swan und Ugursal (2009)). Der Großteil der „Bottom-up“-Modelle zielt auf die Bestimmung technischer Potenziale von Energieeffizienzmaßnahmen und dem Einsatz erneuerbarer Energien ab (z. B. Sartori u. a. (2008)), wobei einige Modelle auch Investitionen (z. B. Prognos AG und Oeko-Institut (2009)) und die techno-ökonomischen Potenziale (z. B. Markewitz und Stein (2003)) berücksichtigen.

In einem aggregierten Modell für Großbritannien zwischen 2000 und 2050 hebt Lowe (2007) die Kohlenstoffintensität der Elektrizitätsversorgung als Determinante für das Treibhausgasreduzierungspotential elektrisch betriebener Wärmepumpen und der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) hervor. Er schlussfolgert zudem, dass beachtliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen ohne erhöhte Abrissraten erreicht werden können. Sartori u. a. (2008) führen eine dynamische Materialflussanalyse des norwegischen Gebäudebestandes von 1900 bis 2100 durch, um die langfristige Entwicklung von Abriss-, Neubau-, und Renovierungsaktivitäten zu analysieren. Diese Methode lässt sich auf die Analyse von Energieflüssen übertragen. Aydinalp u. a. (2002, 2004) nutzen neuronale Netze, um den Energiebedarf für Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Raumkühlung (Aydinalp u. a. (2002)) sowie Raumwärme und Warmwasserbereitung (Aydinalp u. a. (2004)) in Wohngebäuden zu prognostizieren.

Während die meisten Modelle pauschale Implementierungsraten vordefinierter Pakete von Energieeffizienzmaßnahmen und auf erneuerbaren Energien basierende Anlagentechnik annehmen (z. B. Oeko-Institut u. a. (2009)), berücksichtigen Sopha u. a. (2011) das reale Investitionsverhalten von Gebäudeeigentümern auf nationaler Ebene im Rahmen eines agentenbasierten Modells wegen seiner Bedeutung hinsichtlich der Effekte umweltpolitischer Instrumente. Die Arbeit ist jedoch auf die Anlagentechnik beschränkt. Wittmann (2008) analysiert die Investitionsentscheidung der Gebäudeeigentümer in Bezug auf die Dämmung der Ge-

bäudehülle und den Ersatz der Anlagentechnik ebenfalls in einem agentenbasierten Modell. Das Modell findet aber nur in einer prototypischen Stadt Anwendung. Insbesondere hinsichtlich Energieeffizienzmaßnahmen und auf erneuerbaren Energien basierender Anlagentechnik wurden das Investitionsverhalten und die sozioökonomischen Charakteristika von Gebäudeeigentümern und Mietern auf nationaler Ebene nicht hinreichend berücksichtigt.

### **III.1.2. Ziele**

Ziel des Teilmodells Wohngebäude ist es, die Auswirkungen umweltpolitischer Instrumente auf die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen des Wohngebäudebestandes in Deutschland und die Wechselwirkungen mit den anderen otello-Teilmodellen abzubilden. Hierzu werden die Implementierungsraten von spezifischen Energieeffizienzmaßnahmen und Anlagentechnikvarianten im deutschen Wohngebäudebestand bis zum Jahr 2030 simuliert. Dabei werden die Auswirkungen umweltpolitischer Instrumente auf die Sanierungsentscheidung berücksichtigt. Neben den Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , NMVOC und PM werden der zugrundeliegende (emissionsrelevante) Endenergiebedarf und die notwendigen Investitionen modelliert.

### **III.1.3. Einbettung des Teilmodells Wohngebäude**

Die Inputs und Outputs, die die Wechselwirkungen mit den übrigen otello-Teilmodellen charakterisieren, sind in Abbildung III.1.1 dargestellt. Nicht im Detail dargestellt sind die Eingangsparameter, die gebündelt als Szenarios in das Teilmodell eingehen, die Datenbasis des Teilmodells Wohngebäude und die Indikatoren, die für die multikriterielle Entscheidungsunterstützung herangezogen werden. Die zeitliche Auflösung entspricht einem Jahr, wobei einige Indikatoren auf Monatsebene ausgegeben werden können. Der Wohngebäudebestand wird für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland simuliert, wobei die Indikatoren bis zur Gemeindeebene aufgelöst werden können.

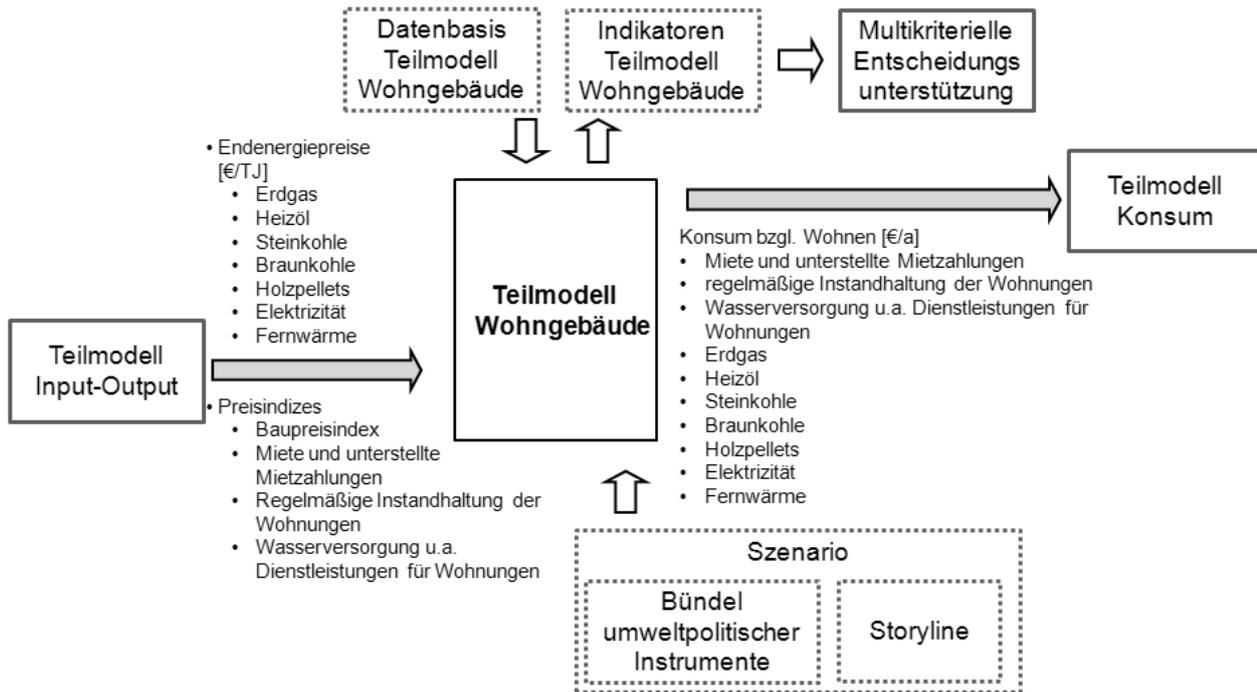


Abb. III.1.1.: Daten mit jährlicher Auflösung, die die Wechselwirkung des Teilmodells Wohngebäude mit den Teilmodellen Input-Output und Konsum charakterisieren (Endenergiepreise brutto inkl. MwSt. und Ökosteuer)

### III.1.4. Modellübersicht

Eine abstrahierte Übersicht über das Teilmodell Wohngebäude zeigt Abbildung III.1.2. Der Wohngebäudebestand wird durch Neubau, Abriss (bzw. Rückbau) sowie Sanierung verändert. Neubau und Sanierung sind durch umweltpolitische Instrumente beeinflusst. Welche Sanierungsvariante gewählt wird, hängt vom Entscheidertyp ab. Die Zugehörigkeit von Entscheidern zu Entscheidertypen wird auf Basis von Daten über die Bewohner von Wohngebäudetypen bestimmt. Neubau, Abriss, Sanierung und Nutzung des Wohngebäudebestandes beeinflussen die Indikatoren, die zur Bewertung der umweltpolitischen Instrumente herangezogen werden.

#### III.1.4.1. Wohngebäudebestand, -zugänge und -abgänge

**Wohngebäudebestand:** Aufgrund der Bedeutung für die Bereitstellung von Raumwärme und die Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand

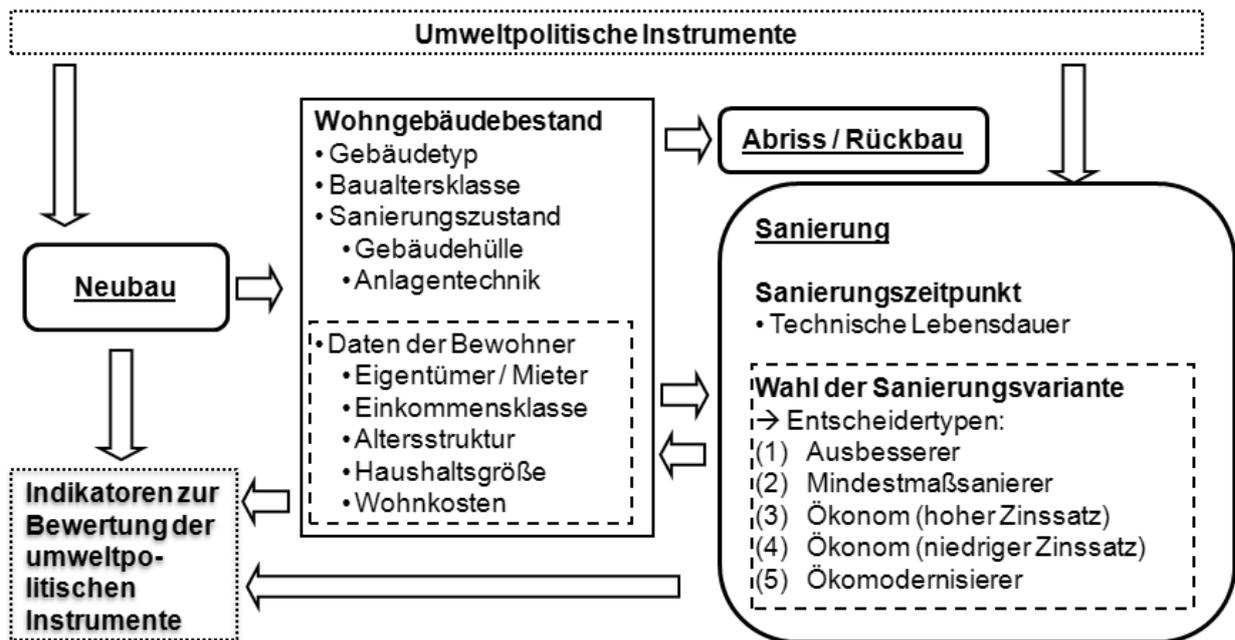


Abb. III.1.2.: Abstrahierte Übersicht über das Teilmodell Wohngebäude

ist die Wohnfläche eine zentrale Größe im Modell. Bei der Wohnfläche  $A_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$  des Jahres  $t$  wird nach dem Gebäudetyp (GT), der Baualtersklasse (BA), der energetischen Qualität der Gebäudehülle (QG), der Qualität der Anlagentechnik (QA), dem für die Raumheizung überwiegend verwendeten Energieträger (RE), der Zentralität der Anlagentechnik (ZA), dem Bundesland (BL), der Gemeindegrößenklasse (GGK) sowie der Eigentümerstruktur (ES) unterschieden (vgl. Tabelle III.1.1).

**Neubau:** Der jährliche Neubau  $N_{t,BA}$  wird exogen für jedes Jahr und jeden Gebäudetyp vorgegeben. Anschließend wird  $N_{t,BA}$  derart disaggregiert, dass man einen dem Detaillierungsgrad der Wohnfläche entsprechenden jährlichen Neubau  $N_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$  erhält. Hierfür werden die Verteilung des Neubaus innerhalb der letzten Baualtersklasse von  $A_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$  sowie Annahmen hinsichtlich des Energieträgerwechsels beim Neubau herangezogen. Die Qualität von Gebäudehülle und Anlagentechnik richtet sich nach den gesetzlichen Mindestanforderungen, die durch die umweltpolitischen Instrumente determiniert werden.

**Abriss (bzw. Rückbau):** Eine exogen vorgegebene jährliche Abrissrate (in % des Bestandes) wird zunächst nach Gebäudetyp und Bundesland differenziert. Einige Gebäudegruppen (historische Bauten, kürzlich errichtete oder sanierte Gebäude) werden per Annahme vom Abriss ausgeschlossen. Die Abrissraten des verbleibenden Bestandes werden zum Ausgleich gleichermaßen erhöht. Somit erhält man analog zum Neubau einen dem Detaillierungsgrad der Wohnfläche entsprechenden jährlichen Abriss  $Ab_{GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$ .

**(Energetische) Sanierung:** Die sanierungsbezogenen Zugänge  $SZ_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$  und Abgänge  $SA_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$  werden ebenfalls dem Detaillierungsgrad der Wohnfläche entsprechend differenziert. Die jeweiligen Größen werden auf Basis von Stammdaten des Gebäudes, Daten über Gebäudehüllen, Anlagentechnik und Bewohner sowie von Endenergiepreisen, Preisindizes und umweltpolitischen Instrumenten bestimmt. Die Stammdaten des Gebäudes ( $DG_{GT,BA}$ ) wie bspw. Bauteilflächen und Wohnflächen, werden nach Gebäudetyp und Baualtersklasse differenziert. Daten über die Gebäudehülle ( $DH_{GT,BA,QG}$ ), wie bspw. Wärmedurchgangskoeffizienten und Investitionen für Dämmungen, werden zusätzlich nach der energetischen Qualität der Gebäudehülle unterschieden. Daten über die Anlagentechnik ( $DA_{GT,QA,RE,ZA}$ ), wie bspw. Jahresnutzungsgrade und Emissionsfaktoren, werden nach Gebäudetyp, Qualität der Anlagentechnik, nach dem für die Raumheizung überwiegend verwendeten Energieträger sowie der Zentralität der Anlagentechnik differenziert. Daten über die Gebäudebewohner ( $DB_{GT,BA,BL,ES}$ ) werden differenziert nach Gebäudetyp, Baualtersklasse, Bundesland und Eigentümerstruktur.

Somit kann der Wohngebäudebestand im Jahr  $t+1$  ausgehend vom Bestand sowie Zu- und Abgängen im Jahr  $t$  anhand von Gleichung III.1.1 bestimmt werden.

$$\begin{aligned}
 A_{t+1,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES} &= A_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES} \\
 &+ N_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES} - Ab_{GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES} \quad [\text{III.1.1}] \\
 &+ SZ_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES} - SA_{t,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}
 \end{aligned}$$

Tab. III.1.1.: Ausprägungen der Indizes GT, BA, QG, QA, RE, ZA, BL, GGK und ES; EnEV steht für Energieeinsparverordnung

Index	Name	Betrachtete Ausprägungen	Anmerkung
t	Jahr	2006, 2007, ..., 2030	-
GT	Gebäudetyp	Reihenhaus, Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus (MFH), MFH Sonderbau Ost <sup>1</sup> , großes MFH, großes MFH Sonderbau Ost, Hochhaus, Hochhaus Sonderbau Ost	-
BA	Baualtersklasse	<1919 (Fachwerk), <1919 (massiv), 1919-1948, 1949-1957, 1958-1968, 1969-1978, 1979-1983, 1984-1994, 1995-2001, 2002-2006, >2006	GT-abhängige Abweichungen
QG	Energetische Qualität der Gebäudehülle	<1968, 1968-1977, 1978-1981, 1982-1994, 1995-2001, 2002-2003, 2004-2006, 2007-2008 (EnEV07), EnEV09, EnEV09-30%, EnEV09-50%	Abweichungen in Abhängigkeit von GT und BA
QA	Qualität der Anlagentechnik	Bestand (Durchschnitt), Niedertemperaturkessel und Vergleichbares, Brennwärtekessel und Vergleichbares	-
RE	Energieträger f. Raumheizung	Leichtes Heizöl, Erdgas, Holzpellets, Steinkohle, Braunkohle, Fernwärme, Elektrizität	-
ZA	Zentralität der Anlagentechnik	Dezentral, zentral ohne Warmwasserbereitung (WW), zentral mit WW, zentral mit WW und Solarthermie	-
BL	Bundesland	16 Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland	-
GGK	Gemeindegrößenklasse	<5.000 [Einwohner], 5.000-19.999, 20.000-99.999, 100.000-499.999, >=500.000	BL-abhängige Abweichungen
ES	Eigentümerstruktur	Gebäude-/Wohnungseigentümer, Hauptmieter	-

<sup>1</sup> Mehrfamilienhäuser, große Mehrfamilienhäuser und Hochhäuser industrieller Bauweise („Plattenbauten“).

Die Ausprägungen der Indizes t, GT, BA, QG, QA, RE, ZA, BL, GGK und ES sind in vereinfachter Form in Tabelle III.1.1 angegeben. Die Hauptdatenquellen des Teilmodells Wohngebäude sind in Tabelle III.1.2 dargestellt.

### III.1.4.2. Energiebedarf sowie Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen

**Raumwärmebedarf:** Der Nutzenergiebedarf jeder Gebäudegruppe wird auf Basis eines Energiebilanzverfahrens, das Transmissions- und Lüftungsverluste sowie Wärmegewinne durch solare Strahlung und interne Wärmequellen berück-

Tab. III.1.2.: Hauptdatenquellen des Teilmodells Wohngebäude

Datenkategorie	Hauptdatenquellen
Wohnflächen $A_{I,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$	IWU (2005), IWU (2007), BBSR (2006)
Neubau $N_{I,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$	BBSR (2006), Statistisches Bundesamt (2006–2010)
Abriss $Ab_{GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$	Statistisches Bundesamt (2006–2010)
(Energetische Sanierung) $SA/SZ_{I,GT,BA,QG,QA,RE,ZA,BL,GGK,ES}$	CO2Online gGmbH (2010)
Stammdaten der Gebäude $DG_{GT,BA}$	IWU (2005)
Gebäudehülle $DH_{GT,BA,QG}$	IWU (2005), BKI (2010)
Anlagentechnik $DA_{GT,QA,RE,ZA}$	Struschka u. a. (2008), VBV (2006), Statistisches Bundesamt (2008b)
Bewohner $DB_{GT,BA,BL,ES}$	BBSR (2006)
Andere Daten	Zusätzlich Oeko-Institut u. a. (2009), Loga und Imkeller-Benjes (1997), Statistisches Bundesamt (2008a)

sichtigt, berechnet (Loga und Imkeller-Benjes (1997)). Die Berechnung basiert auf Stammdaten des Gebäudes, Daten über die Gebäudehülle sowie auf den klimatischen Rahmenbedingungen und Annahmen hinsichtlich der Raumsolltemperatur. Für leerstehende Gebäude wird von einer Bauschäden vermeidenden Beheizung des Gebäudes ausgegangen.

**Warmwasserbedarf:** Der Nutzenergiebedarf jeder Gebäudegruppe wird als Produkt von Wohnfläche und einem konstanten flächenspezifischen Kennwert [kWh/(m<sup>2</sup>yr)] geschätzt. Für leerstehende Gebäude wird kein Bedarf unterstellt.

**Endenergiebedarf:** Der Endenergiebedarf wird auf Basis des berechneten Nutzenergiebedarfs in Verbindung mit Jahresnutzungsgraden der Anlagentechnik, bestehend aus Erzeugungs-, Speicherungs- und Verteilungsverlusten, berechnet.

**Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen:** Die direkten verbrennungsbedingten Emissionen von CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NMVOC und PM werden auf Basis des Endenergiebedarfs in Verbindung mit Daten zur Anlagentechnik, d.h. mit entsprechenden Emissionsfaktoren, berechnet.

### **III.1.4.3. Szenarios: Umweltpolitische Instrumente und unsichere Parameter**

Die im Teilmodell Wohngebäude abgebildeten umweltpolitischen Instrumente umfassen ordnungsrechtliche Instrumente, Energiesteuern, finanzielle Förderprogramme sowie Informationskampagnen. Ordnungsrechtliche Instrumente stellen bspw. Mindestanforderungen an die energetische Qualität der Gebäudehülle sowie die Qualität der Anlagentechnik bei Neubau bzw. Sanierung. Finanzielle Förderungen, wie bspw. Kredite mit günstigen Konditionen, werden als finanzielle Zuschüsse für deutlich über den gesetzlichen Anforderungen liegende Verbesserungen der Anlagentechnik und der Gebäudehülle modelliert. Die Wirkung von Informationskampagnen und Ähnlichem kann über Verschiebungen bei den Entscheidertypen (vgl. Kapitel III.3.3) abgebildet werden. Jedes Instrument verfügt über unterschiedliche Intensitätsstufen. Die Intensität kann für jede Simulationsperiode separat gesetzt werden, um die schrittweise Verschärfung umweltpolitischer Instrumente abbilden zu können. Die Gesamtheit aller Instrumente mit ihren jeweiligen Ausprägungen für jede Simulationsperiode wird als Bündel umweltpolitischer Instrumente definiert. Das Modell umfasst zudem mehrere unsichere Parameter wie bspw. Raumsolltemperaturen und die Länge von Sanierungszyklen. Die gesamte Menge einer konkreten Ausprägung jedes unsicheren Parameters bildet eine Storyline. Jeweils ein Tupel aus einer Storyline und einem Bündel umweltpolitischer Instrumente wird als Szenario definiert.

### **III.1.4.4. Indikatoren**

Die Hauptindikatoren des Teilmodells Wohngebäude sind in Tabelle III.1.3 angegeben. Daneben lässt sich eine Vielzahl an individuellen Auswertungen durchführen.

Tab. III.1.3.: Hauptindikatoren des Teilmodells Wohngebäude angelehnt an Statistisches Bundesamt (2010)

Ebene				Einheit
1	2	3	4	
Generationengerechtigkeit	Ressourcenschonung	Energieeffizienz	Energetische Vollsanierungsrate	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
			Energetische Anlagentechniksaniierungsrate	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
			Anteil EnEV09-50%-Hülle an allen seit 2007 sanierten Hüllen	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
			Anteil EnEV09-30%-Hülle an allen seit 2007 sanierten Hüllen	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
			Anteil EnEV09-Hülle an allen seit 2007 sanierten Hüllen	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
		Wohnflächenspezifischer Endenergiebedarf	kWh/(m <sup>2</sup> a)	
			Gesamtendenergiebedarf (inkl. Biomasse)	TJ/a
		Rohstoffeinsatz	Dämmstoffeinsatz Sanierung	EUR/a
			Fenster Sanierung	EUR/a
			Anlagentechnik Sanierung	EUR/a
	Dämmstoffeinsatz Neubau		EUR/a	
	Anlagentechnik Neubau		EUR/a	
	Baustoffe Neubau		EUR/a	
	Verbrauch fossiler Brennstoffe	Endenergiebedarf Gas	TJ/a	
		Endenergiebedarf Öl	TJ/a	
		Endenergiebedarf Strom	TJ/a	
		Endenergiebedarf Braunkohle	TJ/a	
		Endenergiebedarf Steinkohle	TJ/a	
		Endenergiebedarf Fernwärme	TJ/a	
		Klimaschutz	THG-Emissionen	CO <sub>2</sub> -Emissionen (inkl. Biomasse)
	CO <sub>2</sub> -Emissionen fossil			Tg/a
	CH <sub>4</sub> -Emissionen			Tg/a
	Erneuerbare Energien		Endenergiebedarf Holz u.a. erneuerbare Energien	TJ/a
			Anteil Holz u.a. erneuerbare Energien am Endenergiebedarf	TJ/TJ
	Staatsverschuldung	Förderbudget	Aufwendungen Förderung Hülle	EUR/a
			Aufwendungen Förderung Anlagentechnik	EUR/a
			Durchschnittliche Förderung Sanierung der Gebäudehülle	EUR/EUR
Durchschnittliche Förderung Sanierung der Anlagentechnik			EUR/EUR	
Wirtschaftl. Zukunftsvorsorge	Energieeffizienzinvestitionen	Energieeffizienzinvestitionen Sanierung	EUR/a	
		Energieeffizienzinvestitionen Neubau	EUR/a	
Lebensqualität	Luftqualität	Schadstoffbelastung der Luft	NO <sub>x</sub> -Emissionen	Gg/a
			SO <sub>2</sub> -Emissionen	Gg/a
			VOC-Emissionen	Gg/a
			NMVOC-Emissionen	Gg/a
			PM-Emissionen	Gg/a

### **III.1.5. Aufbau von Teil III**

Die Charakterisierung bzw. Differenzierung des Wohngebäudebestandes sowie die Ermittlung des Ausgangswohngebäudebestandes für das Startjahr 2006 der Simulation wird in Kapitel III.2 beschrieben. In diesem Kapitel wird ebenfalls auf die Berechnung des Energiebedarfs und der Emissionen eingegangen. Die jährliche Veränderung des Wohngebäudebestandes, d.h. insbesondere Neubau, Abriss und die Sanierungsentscheidung, wird in Kapitel III.3 dargestellt. In Kapitel III.4 werden die unsicheren Parameter, die umweltpolitischen Instrumente und die betrachteten Szenarios erläutert. Die Kalibrierung des Startbestandes und der jährlichen Veränderung im Basisszenario wird in Kapitel III.5 beschrieben. Ausgewählte Ergebnisse werden in Kapitel III.6 diskutiert. Die Beschreibung des Teilmodells Wohngebäude endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel III.7.



## **III.2. Charakterisierung des Wohngebäudebestandes und Ableitung des Startwohngebäudebestandes im Jahr 2006**

Für die Berechnung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen und ihrer Entwicklung sind die Eigenschaften der Gebäudehülle und der Anlagentechnik von übergeordneter Bedeutung. In Kapitel III.2.1 wird daher auf die verwendete Charakterisierung der Gebäudehüllen und in Kapitel III.2.2 auf die der Anlagentechnik, jeweils im Bestand, bei einer Sanierung und bei Neubau eingegangen. Hierbei werden auch die verwendeten Emissionsfaktoren vorgestellt. Die bei einer Sanierung bzw. dem Neubau von Wohngebäuden angesetzten Investitionen werden jeweils auch in den Kapiteln III.2.1 und III.2.2 diskutiert. In Kapitel III.2.3 wird anschließend auf die Berechnung des Nutz- und Endeenergiebedarfs eingegangen, bevor in Kapitel III.2.4 die zeitliche und räumliche Auflösung des Teilmodells Wohngebäude vorgestellt wird.

### **III.2.1. Gebäudehüllen: Bestand, Sanierung und Neubau**

Aufgrund der umfangreichen Stichprobe von ca. 1% aller Haushalte in Deutschland wird das Scientific-Use-File des Mikrozensus 2006 (Statistisches Bundesamt (2008b)) als zentrale Datenquelle herangezogen (vgl. Kapitel III.2.1.1). Zur Bestimmung des Raumwärme- und des Endenergiebedarfs der Gebäude sowie der Auswirkung verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen und Anlagentechniken auf die erwähnten Größen sowie die notwendigen Investitionen kann die Gebäudetypologie des Statistischen Bundesamtes, die im Mikrozensus Anwendung fand, auf-

grund fehlender Angaben zu energetischen Eigenschaften nicht direkt angewendet werden. Für den Zweck der energetischen Analyse stellt die IWU-Gebäudetypologie (IWU (2005)) wesentliche Informationen bereit (vgl. Kapitel III.2.1.2). Da zu den zugehörigen veröffentlichten Wohnflächen der diversen Typvertreter (IWU (2007)) keine Informationen über Anlagentechnik und Bewohner der Gebäude und auch keine räumliche Differenzierung zur Verfügung stehen, ist eine Zuordnung der Gebäudetypvertreter des Mikrozensus zu den Typvertretern der IWU-Gebäudetypologie notwendig (vgl. Kapitel III.2.1.3). Um zudem unterschiedliche Sanierungsvarianten und insbesondere auch die zugehörigen Investitionen in der Vergangenheit und in der Zukunft berücksichtigen zu können, ist eine Erweiterung der nur nach Gebäudetypen und Baualtersklasse differenzierenden IWU-Gebäudetypologie um Sanierungsvarianten notwendig (vgl. Kapitel III.2.1.4). Dadurch muss für eine Simulation des Gebäudebestandes bis 2030 zunächst der Ausgangszustand für das Startjahr der Simulation bestimmt werden (vgl. Kapitel III.2.1.5). Hierfür wurde das Jahr 2006 ausgewählt, da dies dem Erhebungsjahr des verwendeten Mikrozensus entspricht.

Nachdem die angesprochenen Sachverhalte in den Kapiteln III.2.1.1 bis III.2.1.5 erläutert wurden, wird in Kapitel III.2.1.6 kurz auf die im Modell verwendeten Leerstandsdaten eingegangen.

### **III.2.1.1. Gebäudetypologie des Statistischen Bundesamtes**

Die im Mikrozensus 2006 verwendete Gebäudetypologie des Statistischen Bundesamtes unterscheidet Wohngebäude, Wohnheime, sonstige Gebäude mit Wohnraum und ständig bewohnte Unterkünfte (EF489). Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die Wohngebäude betrachtet, da die Wohneinheiten (WE), die sich nicht in Wohngebäuden befinden, im Vergleich zu den in Wohngebäuden befindlichen Wohneinheiten mit ca. 1% Anteil am Gesamtbestand vernachlässigbar sind (Statistisches Bundesamt (2008b)).

Zentrale Differenzierungsmerkmale der Wohngebäudetypologie sind das Baujahr des Gebäudes bzw. der Wohnung (EF493) mit den Ausprägungen <1919, 1919-1948, 1949-1978, 1979-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2004 und 2005-2006 sowie die Anzahl der sich in dem Gebäude befindenden Wohneinheiten (EF490, EF635) mit den Ausprägungen 1 WE, 2 WE, 3-6 WE, 7-12 WE, 13-20 WE und >20 WE. Zur Einordnung des Entscheidungsverhaltens ist auch das die Eigentümerstruktur charakterisierende Merkmal EF491 relevant, bei dem die Ausprägungen Eigentümer(in) des Gebäudes, Eigentümer(in) der Wohnung, Hauptmieter(in) und Untermieter(in) unterschieden werden. Ein weiteres relevantes Merkmal ist die Fläche der gesamten Wohnung (EF492, einschl. Küche, Bad, Toilette, Flur, Mansarde, anrechenbarer Balkonfläche oder untervermieteter sowie gewerblich genutzter Räume) in m<sup>2</sup>. Auf Merkmale hinsichtlich der Bundesländer, der Gemeindegrößenklasse, der Beheizungsstruktur, der Bruttokaltmiete, warmer und kalter Nebenkosten sowie soziodemographischer Merkmale der Bewohner der Wohneinheiten wird in den Kapiteln III.2.4 und III.3.3 eingegangen, da diese für die in Kapitel III.2.1.3 beschriebene Transformation der Gebäudetypologie des Statistischen Bundesamtes nicht notwendig sind.

### **III.2.1.2. Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU)**

Für die energetische Analyse des Wohngebäudebestandes wird die IWU-Gebäudetypologie, d. h. die „Deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze“ des IWU Darmstadt (IWU (2005)), herangezogen. Die Gebäude werden anhand der Merkmale Gebäudetyp und Baualtersklasse unterschieden. Bzgl. des Merkmals Gebäudetyp werden die acht Ausprägungen Reihenhaushaus (RH), Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Mehrfamilienhaus in den neuen Bundesländern (MFH\_NBL), Großes Mehrfamilienhaus (GMH), Großes Mehrfamilienhaus in den neuen Bundesländern (GMH\_NBL), Hochhaus (HH) und Hochhaus in den neuen Bundesländern (HH\_NBL) unterschieden. Abgesehen von den Sonder-

bauten in den neuen Bundesländern werden in Abhängigkeit vom Gebäudetyp für das Merkmal Baualtersklasse maximal die zehn Ausprägungen <1919 (Fachwerk), <1919 (Massivbau), 1919-1948, 1949-1957, 1958-1968, 1969-1978, 1979-1983, 1984-1994, 1995-2001 und 2002-2006 unterschieden. Für die Sonderbauten in den neuen Bundesländern werden die Baualtersklassen 1946-1960 und 1961-1969 für MFH\_NBL, 1970-1980, 1981-1985 und 1986-1990 für GMH\_NBL sowie 1970-1980 und 1981-1985 für HH\_NBL unterschieden (IWU (2005)).

Zu jeder Kombination aus Gebäudeklasse und Baualtersklasse werden je Gebäude u. a. die beheizte Wohnfläche [ $m^2$ ], das beheizte Gebäudevolumen [ $m^3$ ], die Bauteilflächen [ $m^2$ ] und Wärmedurchgangskoeffizienten [ $W/(K \cdot m^2)$ ] vom oberen Gebäudeabschluss, den Außenwänden und dem unteren Gebäudeabschluss im Ist-Zustand angegeben. Zu den Fenstern im Ist-Zustand werden neben den Fensterflächen [ $m^2$ ] und den Wärmedurchgangskoeffizienten [ $W/(K \cdot m^2)$ ] zudem g-Werte (Gesamtenergiedurchlassgrade) und die Orientierungen (Süd-Fensterflächen, West-/Ost-Fensterflächen, Nordfensterflächen) angegeben (IWU (2005)).

### III.2.1.3. Transformation der Gebäudetypologien

Bei der Zuordnung der Gebäudetypvertreter des Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)) zu jenen der IWU-Gebäudetypologie (IWU (2005)) werden letztlich die Wohnflächen des Mikrozensus 2006 auf die Typvertreter der IWU-Typologie verteilt. Die zusätzlichen Merkmale des Mikrozensus wie bspw. Informationen hinsichtlich der Anlagentechnik werden jedoch nicht verworfen. Die Zuordnung erfolgt unter der Annahme konstanter Bautätigkeit innerhalb der Baualtersklassen. Die aus dieser Annahme folgenden Faktoren für die Aufteilung der Wohnfläche der Baualtersklassen des Statistischen Bundesamtes auf die Baualtersklassen des IWU sind für die alten Bundesländer in Tabelle III.2.1 gegeben.

Die Fachwerksanteile für EFH und MFH wurden dabei so angepasst, dass die Gebäudeverteilung den vom IWU veröffentlichten Daten (IWU (2007)) strukturell gleicht. Relative Abweichungen, die sich aufgrund unterschiedlicher Vorgehens-

Tab. III.2.1.: Faktoren für die Aufteilung der Wohnfläche der Baualtersklassen des Statistischen Bundesamtes auf die Baualtersklassen des IWU für die alten Bundesländer

Baualtersklasse		IWU-Gebäudetypologie									
		<1919 (Fachwerk)	<1919 (Massiv- bau)	1919- 1948	1949- 1957	1958- 1968	1969- 1978	1979- 1983	1984- 1994	1995- 2001	2002- 2006
Mikrozensus	< 1919	EFH: 0,33 MFH: 0,19 Sonst: 0	EFH: 0,67 MFH:0,81 Sonst: 1	-	-	-	-	-	-	-	-
	1919-1948	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	1949-1978	-	-	-	9/30	11/30	10/30	-	-	-	-
	1979-1990	-	-	-	-	-	-	5/12	7/12	-	-
	1991-1995	-	-	-	-	-	-	-	4/5	1/5	-
	1996-2000	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
	2001-2004	-	-	-	-	-	-	-	-	1/4	3/4
	2005-2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

weisen hinsichtlich der unterschiedlichen zugrundeliegenden Gesamtwohnflächen und der Transformation der Gebäudetypologien ergeben, wurden gleichmäßig verteilt. Die entsprechenden von den alten Bundesländern abweichenden Faktoren für die Aufteilung der Wohnfläche der Baualtersklassen des Statistischen Bundesamtes auf die Baualtersklassen der IWU-Typologie sind für die neuen Bundesländer in Tabelle III.2.2 angegeben.

Tab. III.2.2.: Faktoren für die Aufteilung der Baualtersklassen des Statistischen Bundesamtes auf die Baualtersklassen des IWU für die neuen Bundesländer für Gebäude mit mindestens drei Wohneinheiten, sofern die Aufteilung von den alten Bundesländern abweicht

Baualtersklasse		IWU-Gebäudetypologie										
		1946- 1960	1961- 1969	1970- 1980	1981- 1985	1986- 1990	1919- 1948	1949- 1957	1958- 1968	1969- 1978	1979- 1983	1984- 1994
Mikrozensus	1919-1948	3-12 WE: 3/30 Sonst: 0	-	-	-	-	3-12 WE: 27/30 Sonst: 1	-	-	-	-	-
	1949-1978	12/30	9/30	9/30	-	-	-	-	-	-	-	
	1979-1990	-	-	2/12	5/12	5/12	-	-	-	-	-	

Tab. III.2.3.: Zuordnung der Ausprägungen des Merkmals Anzahl der Wohneinheiten (Statistisches Bundesamt) zu den IWU-Gebäudetypen in Abhängigkeit der Baualtersklasse (IWU) für die alten Bundesländer

Gebäudetypen der IWU-Gebäudetypologie	IWU-Baualtersklassen der IWU-Gebäudetypologie										
	<1919 (Fachwerk)	<1919 (Massivbau)	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978	1979-1983	1984-1994	1995-2001	2002-2006	
Anzahl WE im Mikrozensus	1	EFH	RH/EFH	RH/EFH							
	2	EFH	EFH	EFH	EFH	EFH	EFH	EFH	EFH	EFH	EFH
	3-6	MFH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH	MFH	MFH	MFH
	7-12	MFH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH/GMH	MFH	MFH	MFH	MFH
	13-20	-	GMH	GMH	GMH	GMH	GMH	MFH	MFH	MFH	MFH
	>20	-	GMH	GMH	GMH	HH/GMH	HH/GMH	MFH	MFH	MFH	MFH

Die Ausprägungen des Merkmals „Anzahl der Wohneinheiten“ in der Gebäudetypologie des Statistischen Bundesamtes werden den IWU-Gebäudetypen in Abhängigkeit der Baualtersklasse zugeordnet. Die Zuordnung ist für die alten Bundesländer in Tabelle III.2.3 angegeben.

Da eine eindeutige Zuordnung der Typvertreter auf Basis der Anzahl der Wohneinheiten und der Baualtersklasse nicht möglich ist, werden die Aufteilungsfaktoren von Gebäuden mit 1 WE auf RH und EFH, mit 3-12 WE auf MFH und GMH sowie mit >20 WE auf HH und GMH derart angepasst, dass die hieraus resultierende Gebäudeverteilung den vom IWU veröffentlichten Daten (IWU (2007)) strukturell gleicht. Dies bedeutet, dass relative Abweichungen, die sich aufgrund unterschiedlicher Vorgehensweisen hinsichtlich der unterschiedlichen zugrundeliegenden Gesamtwohnflächen und der Transformation der Gebäudetypologien ergeben, gleichmäßig verteilt werden. Die verwendeten Aufteilungsfaktoren sind in Tabelle III.2.4 dargestellt.

Die entsprechende von den alten Bundesländern abweichende Zuordnung von Ausprägungen des Merkmals Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude des Statisti-

schen Bundesamtes zu den IWU-Gebäudeklassen in Abhängigkeit der Baualtersklasse ist in Tabelle III.2.5 angegeben.

Tab. III.2.4.: Aufteilungsfaktoren zur strukturellen Anpassung der resultierenden Gebäudeverteilung an die vom IWU veröffentlichten Daten (IWU (2007))

Anteil von Gebäudety- pen der IWU-Gebäude- typologie an nach Anzahl der WE differenzierten Gebäuden des Mikrozensus	Anzahl WE im Mikro- zensus	Baualtersklasse der IWU-Gebäudetypologie										
		<1919 (Fach- werk)	<1919 (Mas- siv- bau)	1919- 1948	1949- 1957	1958- 1968	1969- 1978	1979- 1983	1984- 1994	1995- 2001	2002- 2006	
		Gebäudety- pen der IWU-Gebäu- detypologie	RH	1	0%	9%	21%	16%	20%	36%	27%	18%
	GMH	3-12	0%	11%	1%	10%	10%	15%	0%	0%	0%	0%
	GMH	>20	0%	0%	0%	0%	39%	38%	0%	0%	0%	0%

Tab. III.2.5.: Zuordnung der Ausprägungen des Merkmals Anzahl der Wohneinheiten (Statistisches Bundesamt) zu den IWU-Gebäudetypen in Abhängigkeit der Baualtersklasse (IWU) für die neuen Bundesländer für Gebäude mit mindestens drei Wohneinheiten, sofern die Aufteilung von den alten Bundesländern abweicht

Gebäudetypen der IWU-Gebäude- typologie	Anzahl WE im Mikrozensus	Baualtersklassen der IWU-Gebäudetypologie					
		1946- 1960	1961- 1969	1970- 1980	1981- 1985	1986- 1990	1919- 1948
	3-6	MFH _NBL	MFH _NBL	GMH _NBL	GMH _NBL	GMH _NBL	MFH
	7-12	MFH _NBL	MFH _NBL	GMH _NBL	GMH _NBL	GMH _NBL	MFH
	13-20	MFH _NBL	MFH _NBL	GMH _NBL	GMH _NBL	GMH _NBL	GMH
	>20	MFH _NBL	MFH _NBL	HH _NBL	HH _NBL	GMH _NBL	GMH

### III.2.1.4. Erweiterung der Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU)

Die IWU-Gebäudetypologie weist den Ist-Zustand der Gebäudehülle mit Bauteilflächen, Wärmedurchgangskoeffizienten etc. aus. Um Sanierungsvarianten und zugehörige Investitionen berücksichtigen zu können, ist eine Erweiterung der

Tab. III.2.6.: Vereinfachte Darstellung relevanter Kennzahlen der im Teilmodell Raumwärme definierten Sanierungs-epochen

Kürzel Epoche	Orientierung an	Sanierungs-epoche	U-Werte [W/(K· m <sup>2</sup> )]				g-Wert Fenster
			Fenster	Oberer Gebäudeabschluss	Außenwandflächen	Unterer Gebäudeabschluss	
0 (Ur)	-	-1967	>2,57	>2,6	>1,9	>1,6	0,76
1	DIN 4108	1968-1977	2,57	1,2	1,2	0,91	0,76
2	WSchV 78	1978-1981	2,57	0,45	1,2	0,91	0,76
3	WSchV 82	1982-1994	1,8	0,3	1,2	0,55	0,76
4	WSchV 95	1995-2001	1,3	0,3	0,5	0,4	0,63
5	EnEV 02	2002-2003	1,3	0,3	0,5	0,4	0,63
6	EnEV 04	2004-2006	1,3	0,3	0,45	0,4	0,63
7	EnEV 07	2007-2008	1,3	0,3	0,45	0,4	0,63
8	EnEV 09	2007-2030a	1,3	0,24	0,24	0,3	0,63
9	-	2007-2030b	1	0,17	0,17	0,21	0,63
10	-	2007-2030c	0,7	0,12	0,12	0,21/0,15	0,63

IWU-Gebäudetypologie notwendig. Daher wurde die IWU-Gebäudetypologie verfeinert, indem für jede Kombination aus Gebäudetyp und Baualtersklasse neben dem Urzustand auf Basis der gesetzlichen Anforderungen (Wärmeschutzverordnungen, Energieeinsparverordnungen etc.) unterschiedliche Sanierungsepochen mit entsprechenden typischen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) dieser Zeit definiert wurden. Dies wurde nicht nur für den Bestand sondern auch für die zukünftig möglichen Sanierungen vorgenommen. Die relevanten Daten zu diesen Sanierungsepochen sind in vereinfachter Form in Tabelle III.2.6 dargestellt, wobei die ersten Sanierungsepochen bei jüngeren Baualtersklassen entsprechend wegfallen. Insbesondere bei Fachwerksgebäuden ergeben sich bspw. aufgrund von Innendämmungen leichte Abweichungen von den dargestellten Werten.

Bei den energetischen Sanierungen der Gebäudehülle nach dem Startjahr der Simulation in 2006, werden je Gebäudetyp und Baualtersklasse vier Varianten unterschieden, nämlich 2007-2008 (+), 2007-2030a (++), 2007-2030b (+++) und 2007-2030c (++++)). Diese stellen Pakete dar, die sich aus Einzelmaßnahmen für Außen-

wandflächen, oberen Gebäudeabschluss, unteren Gebäudeabschluss und Fenster zusammensetzen. Die zugehörigen Investitionen umfassen im Fall der Außenwände und des oberen Gebäudeabschlusses die durch die Dämmung (Montage und Material) verursachten Mehrinvestitionen im Vergleich zur Instandsetzung ohne energetische Verbesserung. Es wird angenommen, dass eine Instandsetzung wie bspw. die Erneuerung des Außenputzes ohnehin alle 30-50 Jahre (technische Lebensdauer) durchgeführt wird. Eine energetische Verbesserung von Außenwänden und dem oberen Gebäudeabschluss muss (Energieeinsparverordnung) dann je nach Ausgangszustand zusätzlich durchgeführt werden. Eine vorzeitige Dämmung ist weder immer wirtschaftlich noch gesetzlich vorgeschrieben und wird daher von der Betrachtung ausgeschlossen. (Eine Ausnahme stellt die grundsätzliche Nachrüstverpflichtung der Dämmung der obersten Geschossdecke dar.) Zudem würde die Komplexität und damit Laufzeit des Modells drastisch ansteigen. Bei Fenstern werden die Gesamtinvestitionen (Montage und Material) exkl. Ausbau und Entsorgung der alten Fenster angesetzt, da nach dem Ablauf der mit 30-50 Jahren angenommenen technischen Lebensdauer von einem Austausch der Fenster ausgegangen wird. Dieser ist typischerweise immer mit einer energetischen Verbesserung verbunden, so dass sich die energetisch bedingte Mehrinvestition nicht quantifizieren lässt. Im Falle des unteren Gebäudeabschlusses werden die Gesamtinvestitionen (Montage und Material) betrachtet, da diese Energieeffizienzmaßnahmen nicht unbedingt an allgemeine Instandhaltungsmaßnahmen gekoppelt sind. Um die Variantenvielfalt möglicher Sanierungen bzw. Sanierungspakete einzuschränken, wird angenommen, dass die energetische Sanierung der gesamten Gebäudehülle inkl. des unteren Gebäudeabschlusses in notwendiger jedoch nicht hinreichender Weise an eine einheitliche technische Lebensdauer von 30-50 Jahren gebunden ist.

Die im Modell verwendeten bauteilflächenspezifischen Investitionen sind in Tabelle III.2.7 dargestellt. Alternative bauteilflächenspezifische Investitionen sind in Tabelle III.2.8 angegeben. Die Investitionen werden mithilfe des Baupreisindex des Statistischen Bundesamtes, der jährlich vom otello-Teilmodell Input-Output berechnet und an das Teilmodell Wohngebäude übergeben wird, angepasst.

Tab. III.2.7.: Bauteilflächenspezifische Investitionen (einschließlich Montage) für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in den Varianten 2007-2008 (+), 2007-2030a (++), 2007-2030b (+++), 2007-2030c (++++) im Jahr 2007

Investitionen [EUR/m <sup>2</sup> ], netto, Stand 2007																
Oberer Gebäudeabschluss				Außenwandflächen				Unterer Gebäudeabschluss				Fenster				
+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	
20	25	30	35	50	60	75	85	35	35	40	40	300	300	350	420	

Tab. III.2.8.: Alternative bauteilflächenspezifische Investitionen (einschließlich Montage) für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in den Varianten 2007-2008 (+), 2007-2030a (++), 2007-2030b (+++), 2007-2030c (++++) im Jahr 2009 (verändert nach BKI (2010))

Gebäudetyp	Investitionen [EUR/m <sup>2</sup> ], netto, Stand 1. Quartal 2009															
	Oberer Gebäudeabschluss				Außenwandflächen				Unterer Gebäudeabschluss				Fenster			
	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++
HH, HH_NBL	20	24	45	47	50	59	61	64	13	15	16	17	234	234	257	347
Sonstiger Massivbau	14	17	18	19	49	58										
Fachwerk					34	40	42	44								

Für die Berücksichtigung des Neubaus wurde die IWU-Gebäudetypologie bei den Gebäudetypen RH, EFH und MFH um die Baualtersklasse 2007-2030 ergänzt. Diese können in den energetischen Varianten 2007-2030a (++), 2007-2030b (+++) und 2007-2030c (++++) ausgeführt werden. Die bruttogrundflächenspezifischen Investitionen sind in Tabelle III.2.9 angegeben.

### III.2.1.5. Bestimmung des Ausgangszustandes der Hülle 2006

Als Ausgangszustand für die Simulation des Wohngebäudebestandes wurde das Jahr 2006 gewählt, da dies dem Erhebungsjahr des verwendeten Mikrozensus entspricht. Hierfür wird ausgehend vom Baujahr der Gebäude eine Zuordnung zu den unterschiedlichen Sanierungsepochen vorgenommen. Dabei wird zunächst von einer konstanten Bautätigkeit innerhalb der Baualtersklassen ausgegangen, um das Baualter der Gebäude in jährlicher Auflösung approximativ zu bestimmen.

Tab. III.2.9.: Bruttogrundflächenspezifische Investitionen für die Kostengruppe 300 (Bauwerk - Baukonstruktionen) nach DIN 276 des Neubaus der Baualtersklasse 2007-2030 differenziert nach Gebäudetyp und Qualität der Gebäudehülle im Jahr 2008 [BKI (2008)]

Gebäudetyp	Bruttogeschossflächenspezifische Investitionen [EUR/m <sup>2</sup> ], netto, Stand August 2008											
	2007-2030a (++)				2007-2030b (+++)				2007-2030c (++++)			
	Kosten- gruppe 300	Bau- stof- fe	Fens- ter, Tü- ren	Däm- mung	Kosten- grup- pe 300	Bau- stof- fe	Fens- ter, Tü- ren	Däm- mung	Kosten- grup- pe 300	Bau- stof- fe	Fens- ter, Tü- ren	Däm- mung
RH	458	382	45	32	682	590	61	30	818	709	74	36
EFH	554	467	48	39	690	579	59	52	899	753	74	73
MFH	479	414	36	28	601	515	40	46	761	652	85	24

Es wird angenommen, dass die Gebäudehülle, d. h. Außenwandflächen, oberer Gebäudeabschluss, Fenster und unterer Gebäudeabschluss, alle 40 Jahre saniert wurde, wobei diese Größe in Szenarios variiert werden kann. Eine energetische Sanierung erfolgte in der Realität allerdings nur bei einem Teil dieser Gebäude bzw. einem Teil dieser Bauteile. Daher werden bauteilspezifische energetische Sanierungsraten angenommen, die den Anteil der Gebäude bzw. Bauteile angeben, die bei der nach 40 Jahren anstehenden Sanierung energetisch saniert wurden. Der Anteil von RH und EFH mit energetisch modernisierten Fenstern wird von Weiß und Dunkelberg (2010) für die Baualtersklasse bis 1968 auf 60-70% geschätzt. Diese Zahl (60%) wird ebenfalls für MFH, GMH und HH dieser Baualtersklasse in den alten Bundesländern verwendet. Am häufigsten wurden Fenster energetisch modernisiert bzw. erneuert. Die auf die Fenster bezogenen energetischen Modernisierungen von oberem Gebäudeabschluss, Wandfläche und unterem Gebäudeabschluss wurden nach neuen und alten Bundesländern differenziert aus dem Heizatlas ([www.heizatlas.de](http://www.heizatlas.de), CO2Online gGmbH (2010)) übernommen (vgl. Tabelle III.2.10). Diese beziehen sich auf Gebäude mit Baujahr vor 1990. Bei dem gewählten Startjahr 2006 und einem Sanierungszyklus von 40 Jahren wären jedoch nur Gebäude mit Baujahr vor 1968 bereits saniert worden, sodass diese Angaben mit den Angaben in Weiß und Dunkelberg (2010) kombiniert werden. Die sich ergebenden Anteile modernisierter Gebäude sind für die alten Bundesländer ebenfalls in Tabelle III.2.10 angegeben.

Tab. III.2.10.: Anteil energetisch modernisierter Gebäude an den Gebäuden mit Baujahr vor 1990 bzw. 1968 differenziert nach Fenstern, oberem Gebäudeabschluss, Außenwänden und unterem Gebäudeabschluss (verändert nach CO2Online gGmbH (2010), Weiß und Dunkelberg (2010))

Anteil energetisch modernisierter Gebäude mit Baujahr vor 1990 bzw. 1968		Energetische Modernisierung			
		Fenster	Oberer Gebäudeabschluss	Außenwände	Unterer Gebäudeabschluss
Bezogen auf Gebäude mit energetisch modernisierten Fenstern	Neue Bundesländer	100%	62%	34%	14%
	Alte Bundesländer	100%	78%	32%	15%
Bezogen auf Gebäude mit Baujahr vor 1990 bzw. 1968	Alte Bundesländer	60%	47%	19%	9%

Für Nichtsonderbauten in den neuen Bundesländern mit Baujahr vor 1990 werden dieselben Anteile hinsichtlich energetischer Modernisierung angenommen, wie in den alten Bundesländern. Der Anteil von MFH\_NBL, GMH\_NBL und HH\_NBL in den neuen Bundesländern mit energetisch modernisierten Fenstern wird auf Basis des Heizatlases (www.heizatlas.de, CO2Online gGmbH (2010)) auf 70% für 2006 geschätzt. GMH\_NBL und HH\_NBL wurden erst ab 1970 gebaut und wurden daher theoretisch bei einem Sanierungszyklus von 40 Jahren noch nicht saniert, wobei durch ein Sondersanierungsprogramm von 1995-2005 ein Großteil dieser Gebäude aufgrund mangelhafter Bauausführung vorzeitig saniert wurde. Die Sanierungsraten von MFH\_NBL, GMH\_NBL und HH\_NBL wurden im Modell derart gewählt, dass jeweils ein Anteil von Gebäuden mit modernisierten Fenstern von 70% erreicht wird. Bei MFH\_NBL wird davon ausgegangen, dass vorrangig die älteren Baujahre saniert wurden. Das Verhältnis anderer energetischer Maßnahmen im Vergleich zu den modernisierten Fenstern wird aus Tabelle III.2.10 übernommen. Damit ergibt sich ein Anteil energetisch modernisierter Gebäude am Gesamtbestand der MFH\_NBL, GMH\_NBL und HH\_NBL von 70% für Fenster, 43% für den oberen Gebäudeabschluss, 24% für Wandflächen und 10% für den unteren Gebäudeabschluss.

Abgesehen von GMH\_NBL und MFH\_NBL gehen bei der Bestimmung des Startbestandes 2006 modelltechnisch auch die nicht energetisch sanierten Gebäu-

de bei Erreichen des potentiellen Jahres für die energetische Sanierung in die entsprechende Sanierungsepoche über. Die Typvertreter der Sanierungsepoche einer Kombination von Gebäudetyt und Baualtersklasse stellen demnach fiktive, durchschnittliche Gebäude dar. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile (und im Falle der Fenster auch die g-Werte) eines fiktiven Gebäudes werden als mit der bauteilspezifischen energetischen Sanierungsrate gewichteter Mittelwert der Wärmedurchgangskoeffizienten vom Urzustand und den in der Sanierungsepoche typischen Werten gemäß Gleichung III.2.1 berechnet.

$$\begin{aligned} \text{Wärmedurchgangskoeffizient (Bauteil, Fiktiver Typvertreter der} \\ \text{Sanierungsepoche)} = \text{Sanierungsrate (Bauteil)} \cdot \text{Wärmedurchgangs-} \\ \text{koeffizient (Bauteil, (Realer) Typvertreter der Sanierungsepoche)} \\ + (1 - \text{Sanierungsrate (Bauteil)}) \cdot \text{U-Wert (Bauteil, Urzustand)} \end{aligned} \quad \text{[III.2.1]}$$

Dieses Vorgehen wurde gewählt, da einerseits keine ausreichenden Informationen darüber vorliegen, welche realen Gebäude welche Arten von energetischen Modernisierungen durchlaufen haben und andererseits die Anzahl der in der Datenstruktur vorzuhaltenden Sanierungsvarianten drastisch ansteigen würde, wenn alle möglichen Kombinationen einzelner Maßnahmen an der Gebäudehülle als eigener Typvertreter berücksichtigt würden. Im Falle von GMH\_NBL und MFH\_NBL verbleiben die Gebäude, die nicht energetisch saniert wurden, modelltechnisch im Urzustand und durchlaufen den normalen Sanierungszyklus. Die Gebäude, die bereits energetisch saniert wurden, werden analog zu den anderen Gebäudetypen behandelt und stehen im Modell erst nach Ablauf des Sanierungszyklus ausgehend von dem Jahr der vorgezogenen Sanierung abermals zur Sanierung an.

### III.2.1.6. Wohnungsleerstand

Für den Leerstand von Wohnungen werden aus amtlichen Statistiken nach Bundesländern differenzierte Leerstandsquoten verwendet (Statistisches Bundesamt (2006–2010)). Diese sind in Tabelle III.2.11 angegeben und werden bis 2030 konstant gehalten.

Tab. III.2.11.: Leerstandsquoten von Wohnungen im Jahr 2006 differenziert nach Bundesländern (Statistisches Bundesamt (2006–2010))

Bundesland	Leerstandsquote [WE/WE]
Schleswig-Holstein	5,3%
Hamburg	4,5%
Niedersachsen einschl. Bremerhaven	5,5%
Bremen ohne Bremerhaven	4,2%
Nordrhein-Westfalen	7,9%
Hessen	6,0%
Rheinland-Pfalz	8,0%
Baden-Württemberg	7,0%
Bayern	6,7%
Saarland	8,4%
Berlin	8,8%
Brandenburg	11,5%
Mecklenburg-Vorpommern	11,3%
Sachsen	14,6%
Sachsen-Anhalt	16,6%
Thüringen	10,5%

### III.2.2. Anlagentechnik: Bestand, Sanierung und Neubau

In diesem Kapitel wird die im Teilmodell Wohngebäude verwendete Charakterisierung der Anlagentechnik im Bestand und bei Sanierung bzw. Neubau erläutert. Für die Anlagentechnik im Bestand wird auf die Merkmale des Mikrozensus zurückgegriffen. Die daraus abgeleitete Typologie der Anlagentechnik kann den Ge-

bäudehüllen aus Kapitel III.2.1 eindeutig zugeordnet werden. Daher dienen die Merkmale im Mikrozensus als Ausgangspunkt für die Charakterisierung bzw. Typisierung der Anlagentechnik des Bestandes. Diese Typisierung wird dann in modifizierter Form für die im Falle einer Sanierung bzw. des Neubaus von Gebäuden im Teilmodell Wohngebäude potentiell verfügbaren Anlagentechniken verwendet. Beim Ersatz der Anlagentechnik und dem Einsatz im Neubau wird zudem auf die entsprechenden Investitionen eingegangen.

### **III.2.2.1. Anlagentechnikvarianten im Bestand**

Die Merkmale im Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)) hinsichtlich der in den Wohngebäuden eingesetzten Anlagentechnik umfassen die überwiegend für die Beheizung verwendete Energieart (EF497), die überwiegend für die Warmwasserversorgung verwendete Energieart (EF498) und die Beheizungsstruktur (EF496). Bei den Merkmalen EF497 und EF498 werden die Ausprägungen Fernwärme, Gas, Elektrizität (Strom), Briketts oder Braunkohle, Koks oder Steinkohle sowie Holz oder sonstige erneuerbare Energieträger (Sonnen-, Windenergie, Wärmepumpe u. Ä.) unterschieden. Bei der Beheizungsstruktur (EF496) werden Fernheizung, Block- oder Zentralheizung, Etagenheizung sowie Einzel- oder Mehrraumöfen (auch Elektrospeicher) differenziert. Fern-, Block-, Zentral- und Etagenheizung werden im Folgenden als Sammelheizung bezeichnet.

Zur Berücksichtigung der Leistung der Anlagentechnik wurden drei Leistungsklassen (<25 kW, 25-50kW und 50-1000kW) unterschieden und den aus den Mikrozensusmerkmalen abgeleiteten Gebäudetypen RH/EFH (<25kW), MFH/MFH/GMH/GMH\_NBL (25-50kW) und HH/HH\_NBL (50-1.000kW) zugeordnet. Hintergrund der unterschiedenen Leistungsklassen sind überschlägig angenommene Heizlasten der unterschiedlichen Gebäudegrößen in der Gebäudetypologie. Die angenommene Kesselauslegung orientiert sich damit nicht an der exakten Heizlast, die sich je nach Sanierungszustand der Gebäudehülle unterscheidet, sondern stellt eine Abschätzung der möglichen Bandbreite dar. Die

gewählten Leistungsintervalle sind des Weiteren auch an der späteren Zuordnung von Emissionsfaktoren ausgerichtet.

In Anbetracht der verfügbaren, den jeweiligen Gebäudehüllen zuordenbaren Merkmale (EF496, EF497, EF498) werden im Teilmodell Wohngebäude für jede Leistungsklasse explizit die in Tabelle III.2.12 angegebenen 20 Anlagentechnikvarianten für den Wohngebäudebestand des Jahres 2006 unterschieden. In dieser Tabelle sind auch die jeweiligen Kombinationen von Merkmalsausprägungen des Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)), die diesen Anlagentechnikvarianten zugeordnet werden, enthalten.

Prinzipiell wurden sieben Endenergieträger für die Raumheizung, nämlich Fernwärme, Gas, Elektrizität (Strom), Briketts bzw. Braunkohle, Koks oder Steinkohle sowie Holz oder sonstige erneuerbare Energieträger (Sonnen-, Windenergie, Wärmepumpe u. Ä.), sowie drei Stufen der Zentralität der Anlagentechnik, nämlich zentrale Raumwärmeversorgung mit integrierter Warmwasserbereitung (zentral mit WW), zentrale Raumwärmeversorgung ohne integrierte Warmwasserbereitung (zentral ohne WW) sowie dezentrale Raumwärmeversorgung unterschieden (dezentral). Da bei der Fernwärmeversorgung eine dezentrale Raumwärmeversorgung ausgeschlossen werden kann, ergeben sich  $7 \times 3 - 1 = 20$  Anlagentechnikvarianten. Während bei der zentralen Raumwärmeversorgung mit integrierter Warmwasserbereitung der Endenergieträger für Raumheizung und Warmwasserbereitung identisch ist, wird für die Warmwasserbereitung bei den beiden anderen Zentralitätsvarianten entweder Gas oder Elektrizität angenommen.

Eine Anlagentechnikvariante des Bestandes im Teilmodell Wohngebäude umfasst dabei in der Realität wiederum eine Vielzahl von Anlagentechnikvarianten, die insbesondere für die Bestimmung der Emissionsfaktoren von Bedeutung sind. Die Varianten B1, B2 und B3 (vgl. Tabelle III.2.12) umfassen Raumheizer (1% anteiliger Endenergieverbrauch (im Text im Folgenden weggelassen)), Gasbrenner ohne Gebläse als Heizkessel (50,5%), Gasbrenner mit Gebläse als Heizkessel (13%), Brennwertgeräte (14,3%), Durchlaufwasserheizer (2,1%), Kombiwasserheizer (18,3%) und Vorratswasserheizer (0,8%) (Anteile nach Struschka u. a.

Tab. III.2.12.: Im Teilmodell Wohngebäude je Leistungsklasse (<25kW, 25-50kW, 50-1.000kW) differenzierte Anlagentechnikvarianten für den Wohngebäudebestand 2006 und die jeweiligen Kombinationen von Merkmalsausprägungen des Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)), die diesen zugeordnet werden; \* steht für beliebige Merkmalsausprägungen, WW für Warmwasser

Kürzel	Energie-träger Raumhei-zung	Zentralität	Energie-träger Warm-wasser	Energie-träger Warmwasser (EF498)	Zentralität (EF496)	Energieträ-ger Raumhei-zung (EF497)
B1	Gas	Zentral mit WW	Gas	Gas (Gebäu-debaujahr nach 1979)	Sammelheizung	Gas
B2		Zentral ohne WW	Gas	Gas (Gebäu-debaujahr bis 1979)	Sammelheizung	Gas
				Elektrizität	Sammelheizung	Gas
B3		Dezentral	Gas	Gas	Einzel- oder Mehrraumöfen	Gas
				Elektrizität	Einzel- oder Mehrraumöfen	Gas
B4	Öl	Zentral mit WW	Öl	Öl	*	*
B5		Zentral ohne WW	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Sammelheizung	Öl
B6		Dezentral	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Einzel- oder Mehrraumöfen	Öl
B7	Elektrizität	Zentral mit WW	Elektrizität	Elektrizität	Sammelheizung	Elektrizität
B8		Zentral ohne WW	Gas	Gas	Sammelheizung	Elektrizität
B9		Dezentral	Elektrizität	Elektrizität	Sammelheizung	Elektrizität
				Gas	Einzel- oder Mehrraumöfen	Elektrizität
B10	Braunkohle (oder Briketts)	Zentral mit WW	Braunkohle	Braunkohle	*	*
B11		Zentral ohne WW	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Sammelheizung	Braunkohle
B12		Dezentral	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Einzel- oder Mehrraumöfen	Braunkohle
B13	Steinkohle (oder Koks)	Zentral mit WW	Steinkohle	Steinkohle	*	*
B14		Zentral ohne WW	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Sammelheizung	Steinkohle
B15		Dezentral	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Einzel- oder Mehrraumöfen	Steinkohle
B16	Holz (u.a. Erneuerbare)	Zentral mit WW	Holz	Holz	*	*
B17		Zentral ohne WW	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Sammelheizung	Holz
B18		Dezentral	Elektrizität	Gas/Elektrizität	Einzel- oder Mehrraumöfen	Holz
B19	Fernwärme	Zentral mit WW	Fernwärme	Fernwärme	*	*
B20		Zentral ohne WW	Gas	Fernwärme	*	Gas/Elektrizität

(2008)). Während Raumheizer und Kombiwasserheizer auf die dezentrale Variante B3 beschränkt sind, sind Durchlaufwasserheizer und Vorratswasserheizer zudem bei Variante B2 und auch bei von Gas abweichenden überwiegend für die Beheizung verwendeten Energiearten anzutreffen. Die Varianten B4, B5 und B6 umfassen Ölöfen mit Verdampfungsbrennern (0,2%), Heizkessel mit Ölgebläsebrennern (99,6%) sowie Ölbrennwertgeräte (0,2%) (Struschka u. a. (2008)). Es wird angenommen, dass B3 den Ölöfen mit Verdampfungsbrennern entspricht. Die Varianten B10 bis B18 umfassen handbeschickte Heizkessel (25,4% anteiliger Endenergieverbrauch für naturbelassenes Holz (im Text im Folgenden weggelassen)), Heizkessel für Pellets (1,5%), Dauerbrandöfen (1,4%), Kachelöfen (34,5%), Kamine (10,6%), Kaminöfen (24,1%), Pelletöfen (0,6%), Badeöfen (0,1%) und Herde (1,8%). Der Anteil von Wärmepumpen, Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung, Solarthermie und Ähnlichem wird für den Startbestand Null gesetzt. Im Falle von naturbelassenem Holz werden den zentralen Varianten B16 und B17 handbeschickte Heizkessel sowie Heizkessel für Pellets und der dezentralen Variante B18 Dauerbrandöfen, Kachelöfen, Kamine, Kaminöfen und Pelletöfen zugeordnet. Badeöfen und Herde werden im Modell nicht berücksichtigt. Aufgrund der Datenlage werden zudem keine Nebenfeuerstätten berücksichtigt. Insbesondere die der Variante B18 zugeordneten Anlagentechnikvarianten werden typischerweise als Nebenfeuerstätten verwendet.

Für die einzelnen Anlagentechnikvarianten wurden auf Basis von Struschka u. a. (2008) Emissionsfaktoren für die betrachteten Luftschadstoffe bestimmt (vgl. Tabelle III.2.13). Diese sind endenergiebezogen, sodass sich durch Multiplikation mit dem Endenergiebedarf die Luftschadstoffemissionsfrachten berechnen lassen. Die verwendeten Jahresnutzungsgrade sind in Tabelle III.2.14 angegeben. Die verwendeten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren werden lediglich nach dem eingesetzten Brennstoff unterschieden und sind in Tabelle III.2.15 angegeben.

Tab. III.2.13.: Verwendete, auf die Endenergie bezogene Emissionsfaktoren für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung des Startbestandes 2007; berechnet auf Basis von Struschka u. a. (2008)

Kürzel Anlagentechnik	Energie-träger Raumheizung bzw. WW	Zentralität	Leistungs-klasse Gebäude [kW]	NO <sub>x</sub> [kg/TJ]	SO <sub>2</sub> [kg/TJ]	VOC [kg/TJ]	CH <sub>4</sub> [kg/TJ]	NMVOC [kg/TJ]	PM [kg/TJ]
B1, B2	Gas	Zentral mit/ohne WW	< 25	18,78	0,5	2,89	3,3	0,47	0,03
			25-50	28,77	0,5	2,25	2,27	0,55	0,03
			50-1.000	25,16	0,5	2,1	2,25	0,33	0,03
B3		Dezentral	< 1.000	18,67	0,5	1,91	0,52	1,53	0,03
B2, B3, B20		Seperate WW-Bereitung	<1.000	43,14	0,5	1,12	0,96	0,39	0,03
B4, B5	Öl	Zentral mit/ohne WW	< 25	40	60	2,5	0,02	2,5	1,2
			25-50	43	60	1,9	0,07	1,8	0,6
			50-1.000	42	60	0,12	0,02	0,11	0,8
B6		Dezentral	< 1.000	34	60	1,3	0,15	1,2	2,2
B10, B11	Braunkohle	Zentral mit/ohne WW	< 25	87	251	482	248	296	73
B12		Dezentral		48	403	351	54	310	94
B13, B14	Steinkohle	Zentral mit/ohne WW	< 25	73	185	212	170	85	278
			25-1.000	88	343	106	84	42	278
B15		Dezentral	< 1.000	43	392	385	308	154	278
B16, B17	Holz	Zentral mit/ohne WW	< 25	119,9	5,1	17,55	7,11	12,02	83,62
			25-50	81,06	5,1	48,13	18,66	33,39	51,25
			50-1.000	86,65	5,1	76,06	30,42	53,24	61,45
B18		Dezentral	< 1.000	64,03	8,68	303,04	131,32	204,42	120,12

Tab. III.2.14.: Im Teilmodell Wohngebäude für alle Leistungsklassen verwendete Jahresnutzungsgrade des Gesamtsystems (inkl. Erzeugungs-, Verteil- und Speicherverluste) für den Wohngebäudebestand 2006 (basierend auf Annahmen der Autoren und Pistohl (2000))

Jahresnutzungs-grad Gesamtsystem [%]	Kürzel Anlagentechnik																			
	B																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Raumheizung	75	75	80	75	75	80	90	90	100	70	70	80	70	70	80	70	70	80	90	90
Warmwasser	70	90	90	70	90	90	90	90	90	70	90	90	70	90	90	70	90	90	80	90

Tab. III.2.15.: Im Teilmodell Wohngebäude verwendete endenergiebezogene CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung in Abhängigkeit des Energieträgers (Struschka u. a. (2008), Pfeiffer u. a. (2000))

Energieträger	Gas	Öl	Braunkohle, Briketts	Steinkohle, Koks	Holz(pellets)
CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor [kg/TJ]	55.796	73.344	95.662	95.930	103.093

### III.2.2.2. Anlagentechnik bei der Sanierung

Im Modell werden beim Ersatz der Anlagentechnik bei Sanierung analog zu den Anlagentechnikvarianten im Bestand die drei Leistungsklassen <25kW, 25-50kW und 50-1.000kW unterschieden. Die je Leistungsklasse berücksichtigten Anlagentechnikvarianten sind in Tabelle III.2.16 angegeben.

Prinzipiell werden zusätzlich zum Bestand zwei Qualitätsstufen der Anlagentechnik unterschieden. Die niedrigere Qualitätsstufe orientiert sich an Niedertemperaturkesseln (NT) und die höhere Stufe an Brennwertkesseln (BW). Derzeit sind die fünf Endenergieträger Gas, Öl, Holz(pellets), Fernwärme und Elektrizität (für Wärmepumpen) berücksichtigt. Je Endenergieträger werden drei Stufen der Zentralität der Anlagentechnik, nämlich zentrale Raumwärmeversorgung mit solarthermisch unterstützter integrierter Warmwasserbereitung (zentral mit WW (solar)), zentrale Raumwärmeversorgung mit integrierter Warmwasserbereitung (zentral mit WW) sowie zentrale Raumwärmeversorgung ohne integrierte Warmwasserbereitung (zentral ohne WW), unterschieden.

Da Hochtemperaturkessel mit Mischer nach EnEV 2009 nicht mehr zulässig sind, werden für die Endenergieträger Gas und Öl Niedertemperaturkessel (NT1, NT2, NT3) und Brennwertkessel (BW1, BW2, BW3) unterschieden. Für den Endenergieträger Holz(pellets) werden monovalente Holzpelletkessel ohne (NT7, NT8, NT9) und mit Partikelabscheider zur Reduktion von Feinstaubemissionen (BW7, BW8, BW9) betrachtet. Bei dem Endenergieträger Fernwärme entfällt die angenommene Unterscheidung in unterschiedliche Qualitätsstufen. Innerhalb des Gebäudes fallen keine Erzeugungsverluste an, da i. d. R. nur ein Wärmetauscher vorhanden ist. Für den Endenergieträger Elektrizität werden monovalente Wär-

Tab. III.2.16.: Im Teilmodell Wohngebäude je Leistungsklasse (&lt;25kW, 25-50kW, 50-1.000kW) differenzierte Anlagentechnikvarianten beim Ersatz der Anlagentechnik

Kürzel Anlagentechnik Qualitätsstufe 1	Kürzel Anlagentechnik Qualitätsstufe 2	Energieträger Raumheizung	Zentralität	Energieträger Warmwasser	Investitionsbestandteile bei Sanierung ohne Energieträgerwechsel
NT1	BW1	Gas	Zentral mit WW (solar)	Gas und solare Strahlung	NT/BW2 + Thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung
NT2	BW2		Zentral mit WW	Gas	NT/BW3 + Trinkwasserspeicher, Schaltung und Regelung als Pumpschaltung
NT3	BW3		Zentral ohne WW	Gas	Heizkesselanlage, Entleeren, Füllen und Entlüften der Heizanlage
NT4	BW4	Öl	Zentral mit WW (solar)	Öl und solare Strahlung	NT/BW5 + Thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung
NT5	BW5		Zentral mit WW	Öl	NT/BW6 + Trinkwasserspeicher, Schaltung und Regelung als Pumpschaltung
NT6	BW6		Zentral ohne WW	Elektrizität	Heizkesselanlage, Entleeren, Füllen und Entlüften der Heizanlage
NT7	BW7	Holz	Zentral mit WW (solar)	Holz und solare Strahlung	NT/BW8 + Thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung
NT8	BW8		Zentral mit WW	Holz	NT/BW9 + Trinkwasserspeicher, Schaltung und Regelung als Pumpschaltung
NT9	BW9		Zentral ohne WW	Elektrizität	Heizkesselanlage, Entleeren, Füllen und Entlüften der Heizanlage
NT10	-	Fernwärme	Zentral mit WW (solar)	Fernwärme und solare Strahlung	NT/BW11 + Thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung
NT11	-		Zentral mit WW	Fernwärme	NT/BW12 + Trinkwasserspeicher, Schaltung und Regelung als Pumpschaltung
NT12	-		Zentral ohne WW	Gas	Wärmeübergabestation, Entleeren, Füllen und Entlüften der Heizanlage
NT13	-	Elektrizität (Wärmepumpe)	Zentral mit WW (solar)	Elektrizität	(nur Neubau)
NT14	-		Zentral mit WW	Elektrizität	(nur Neubau)
NT15	-		Zentral ohne WW	Elektrizität	(nur Neubau)

Tab. III.2.17.: Im Teilmodell Wohngebäude verwendete Investitionen (netto) für die Anlagentechnik differenziert nach Leistungsklasse (&lt;25kW, 25-50kW, 50-1.000kW), Anlagentechnikvariante und Investitionsbestandteil bei dem Ersatz der Anlagentechnik ohne Energieträgerwechsel und ohne Wechsel von dezentraler zu zentraler Raumwärmeversorgung im Jahr 2006 (VBV (2006), Wagner u. a. (2010), Internetrecherche, Schätzungen der Autoren)

Anlagentechnikvariante	Investitionsbestandteile	Investitionen [EUR/Anlage bzw. EUR/Gebäude], netto, Stand September 2006		
		<25kW	25-50kW	50-1.000kW
NT1, NT2, NT3, NT4, NT5, NT6	Heizkesselanlage, Entleeren,	2.825	4.818	16.638
BW1, BW2, BW3, BW4, BW5, BW6	Füllen und Entlüften der Heizungsanlage	4.246	5.905	23.293
NT7, NT8, NT9, BW7, BW8, BW9		17.500	23.362	57.750
NT10, NT11, NT12	Wärmeübergabestation, Entleeren, Füllen und Entlüften der Heizungsanlage	2.269	4.403	11.773
BW7, BW8, BW9	Partikelabscheider (Abscheidegrad von 60-90%)	1.513 (2010)	1.513 (2010)	2.269 (Schätzung)
Alle mit integrierter Warmwasserbereitung	Trinkwarmwasserspeicher, Schaltung und Regelung als Pumpenschaltung	3.190	5.190	8.672
Alle mit solarthermisch unterstützter integrierter Warmwasserbereitung	Thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung	4.810	7.190	19.086

mepumpen für den Neubau berücksichtigt. Andere Anlagentechnikvarianten, wie Blockheizkraftwerke, Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und gasbetriebene Wärmepumpen sind derzeit im Modell nicht berücksichtigt.

Die im Modell bei dem Ersatz der Anlagentechnik berücksichtigten Investitionsbestandteile sind ebenfalls in Tabelle III.2.16 angegeben, die Investitionssummen in Tabelle III.2.17. Bei einem Energieträgerwechsel oder einem Wechsel von dezentraler zu zentraler Raumwärmeversorgung müssen jedoch weitere Investitionsbestandteile berücksichtigt werden. Der Wechsel von dezentraler zu zentraler Raumwärmeversorgung ist heute üblich, so dass bei den verfügbaren Anlagentechnikvarianten keine dezentrale Raumwärmeversorgung berücksichtigt wird. Die notwendigen Investitionen bei einem Wechsel von dezentraler zu zentraler Raum-

Tab. III.2.18.: Durch Energieträgerwechsel verursachte Investitionen beim Wechsel der Anlagentechnik je Wohnfläche und je Gebäude im Jahr 2006 (VBV (2006))

<b>Wohnflächenspezifische Investitionen bzw. Investitionen bei Energieträgerwechsel, netto</b>							
Energieträgerwechsel	Art der Investition (bzw. Kosten)	RH/EFH (150 m <sup>2</sup> Wohnfläche)		MFH/MFH_NBL/ GMH/GMH_NBL (1.000 m <sup>2</sup> Wohnfläche)		HH/HH_NBL (5.000 m <sup>2</sup> Wohnfläche)	
		[EUR/ m <sup>2</sup> ]	[EUR/ Gebäude]	[EUR/ m <sup>2</sup> ]	[EUR/ Gebäude]	[EUR/ m <sup>2</sup> ]	[EUR/ Gebäude]
Von Öl	Demontage des alten Tanks	4,2	628	0,6	628	0,1	628
Zu Öl	Heizöltank und Kelleraufstellung	19	2.854	4,4	4.388	1,3	6.500
Zu Gas	Erdgasanschluss oder Flüssiggastank	10	1.500	1,5	1.500	0,3	1.500
Zu Holzpellets	Sacksilo und Fördereinrichtung (auch bei Wechsel von Holz dezentral)	36	5.405	2,8	2.810	0,6	2.810
Von Elektrizität	Schornstein	13,3	2.000	3	3.000	0,8	4.000

wärmeversorgung fallen bei jeder im Modell verfügbaren Anlagentechnikvariante an und sind somit nicht entscheidungsrelevant. Sie umfassen u. a. Kupferrohre mit Mineralwolldämmung sowie Röhrenheizkörper und betragen im Jahr 2006 wohnflächenspezifisch 61 EUR/m<sup>2</sup> (netto) für RH und EFH bzw. 9.136 EUR/Gebäude mit 150 m<sup>2</sup> Wohnfläche, 46 EUR/m<sup>2</sup> für MFH, MFH\_NBL, GMH und GMH\_NBL bzw. 46.416 EUR/Gebäude mit 1000 m<sup>2</sup> Wohnfläche sowie 45 EUR/m<sup>2</sup> für HH und HH\_NB bzw. 225.467 EUR/Gebäude mit 5000 m<sup>2</sup> Wohnfläche (VBV (2006)).

Bei einem Energieträgerwechsel weg von Heizöl fallen Kosten für die Demontage und die Entsorgung des alten Tanks an und bei einem Wechsel zu Heizöl ist zudem ein neuer Tank zu installieren. Es wird unterstellt, dass bestehende Öltanks noch eine hinreichende Restlebensdauer aufweisen. Beim Wechsel zu Holzpelletkesseln sind Sacksilos und Fördereinrichtungen notwendig. Bei einem Wechsel zu Erdgas wird angenommen, dass ein Erdgasanschluss installiert werden kann. Falls nur Flüssiggas verwendet werden könnte, wären die notwendigen Investitionen

Tab. III.2.19.: Im Teilmodell Wohngebäude verwendete endenergiebezogene Emissionsfaktoren für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung bei einem Ersatz bzw. Wechsel der Anlagentechnik; berechnet auf Basis von Struschka u. a. (2008); PM-Abscheidegrad von 75% nach Wagner u. a. (2010)

Kürzel	Energie-träger Raumhei- zung bzw. WW	Zentra- lität	Leis- tungs- klasse	NO <sub>x</sub> [kg/TJ]	SO <sub>2</sub> [kg/TJ]	VOC [kg/TJ]	CH <sub>4</sub> [kg/TJ]	NMVOG [kg/TJ]	PM [kg/TJ]
NT1, NT2, NT3, NT12	Gas	Zentral mit/ohne WW	<25	21,86	0,5	1,45	1,34	0,5	0,03
			25-50	34,1	0,5	0,66	0,08	0,6	0,03
			50- 1.000	29,68	0,5	0,48	0,06	0,33	0,03
		Separate WW- Bereitung	<1.000	43,14	0,5	1,12	0,96	0,39	0,03
BW1, BW2, BW3		Zentral mit/ohne WW, separate WW- Bereitung	<1.000	5,1	0,5	9,3	12	0,34	0,03
NT4, NT5, NT6	Öl	Zentral mit/ohne WW	<25	40	60	2,5	0,02	2,5	1,2
			25-50	43	60	1,9	0,07	1,8	0,6
			50- 1.000	42	60	0,12	0,02	0,11	0,8
BW4, BW5, BW6	Öl	Zentral mit/ohne WW	<25	40	60	2,5	0,02	2,5	0,1
			25-50	43	60	1,9	0,07	1,8	0,1
			50- 1.000	42	60	0,12	0,02	0,11	0,1
NT7, NT8, NT9	Holz	Zentral mit/ohne WW	<25	119,9	5,1	17,55	7,11	12,02	83,62
			25-50	81,06	5,1	48,13	18,66	33,39	51,25
			50- 1.000	86,65	5,1	76,06	30,42	53,24	61,45
BW7, BW8, BW9		Zentral mit/ohne WW	<25	119,9	5,1	17,55	7,11	12,02	20,9
			25-50	81,06	5,1	48,13	18,66	33,39	12,81
			50- 1.000	86,65	5,1	76,06	30,42	53,24	15,36

und die Brennstoffkosten höher. Ein Wechsel von bzw. zu Fernwärme wird nicht betrachtet. Die durch einen Energieträgerwechsel bedingten Investitionen sind in Tabelle III.2.18 angegeben. Bei den Investitionen, die durch einen Zentralitätswechsel oder einen Energieträgerwechsel bedingt sind, werden im Modell wie bei der Leistungsklasse die gebäudebezogenen Werte und nicht die wohnflächenspezifischen Werte verwendet.

Für die einzelnen Anlagentechnikvarianten wurden für das Modell auf Basis von Struschka u. a. (2008) und Wagner u. a. (2010) Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe (vgl. hierzu Tabelle III.2.13) bestimmt, die in Tabelle III.2.19 dargestellt sind.

### **III.2.2.3. Anlagentechnikvarianten beim Neubau**

Beim Neubau von Gebäuden wird angenommen, dass immer die beste Qualitätsstufe aus Kapitel III.2.2.2 verwendet wird. Es werden Öl- und Gasbrennwertkessel, Holzpelletkessel, Fernwärmeversorgung sowie monovalente elektrische Wärmepumpen berücksichtigt. Alle Varianten werden ausschließlich mit solarthermisch unterstützter integrierter Warmwasserbereitung (zentral mit WW (solar)) betrachtet. Zur Ermittlung der Investitionen für die Anlagentechnik wird die Kostengruppe 420 (Wärmeversorgungsanlagen) nach VDI 2067 herangezogen. Beim Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (BKI (2008)) werden drei Standards unterschieden: einfach, mittel und hoch. Dabei wird bei Neubauten nicht nach Energieträgern und Kesseltypen unterschieden, sondern ausschließlich nach der Gesamteffizienz des Systems. Da die Neubauten als abgestimmte Einheit aus Gebäudehülle und Anlagentechnik betrachtet werden, richten sich die anzusetzenden Investitionen für die Anlagentechnik nach der Qualität der Gebäudehülle (Vgl. Kapitel III.2.1.4). Die bruttogrundflächenspezifischen Investitionen sind in Tabelle III.2.20 angegeben.

Die verwendeten Jahresnutzungsgrade sind in Tabelle III.2.21 angegeben. Es wird angenommen, dass bei solarthermischer Unterstützung 50% des Warmwasserbedarfs durch Solarthermie gedeckt werden kann.

Tab. III.2.20.: Im Teilmodell Wohngebäude verwendete bruttogrundflächenspezifische Investitionen für die Kosten-  
 gruppen 300 (Bauwerk - Baukonstruktionen) und 420 (Wärmeversorgungsanlagen) nach DIN 276 des  
 Neubaus der Baualtersklasse 2007-2030 differenziert nach Gebäudetyp und Qualität der Gebäudehülle  
 im Jahr 2008 (BKI (2008))

Gebäude- typ	Bruttogrundflächenspezifische Investitionen [EUR/m <sup>2</sup> ], netto, Stand August 2008					
	2007-2030a (++)		2007-2030b (+++)		2007-2030c (++++)	
	Kosten- gruppe 300	Kosten- gruppe 420	Kosten- gruppe 300	Kosten- gruppe 420	Kosten- gruppe 300	Kosten- gruppe 420
RH	458	33	682	71	818	85
EFH	554	48	690	63	899	77
MFH	479	29	601	39	761	35

 Tab. III.2.21.: Im Teilmodell Wohngebäude für alle Leistungsklassen verwendete Jahresnutzungsgrade des Gesamtsystems  
 (inkl. Erzeugungs-, Verteil- und Speicherverluste) beim Ersatz der Anlagentechnik in Wohngebäuden  
 (basierend auf Annahmen der Autoren und Pistohl (2000))

Jahresnutzungsgrad (bzw. Jahresarbeitszahl) Gesamtsystem [%]		Kürzel Anlagentechnik														
		NT bzw. BW														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
NT	Raumheizung	80	80	80	80	80	80		80	95	95	95	350	350	350	
	Warmwasser			90			95	80	80	95	90	90	90	95	95	95
BW	Raumheizung	90	90	90	90	90	90		80	-	-	-	-	-	-	
	Warmwasser			95			90		95	-	-	-	-	-	-	

### III.2.3. Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs

Der Nutzenergiebedarf umfasst den Raumwärmebedarf und den Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitung. Auf Basis des Nutzenergiebedarfs und der Effizienz der Anlagentechnik kann der Endenergiebedarf berechnet werden. Nutz- und Endenergiebedarf werden zunächst für die Gebäudetypvertreter berechnet und anschließend auf die Bundesrepublik Deutschland bzw. kleinräumigere Gebiete (vgl. Kapitel III.2.4) hochskaliert.

**Raumwärmebedarf je Typvertreter:** Der Nutzenergiebedarf je Gebäude zu jeder Kombination aus Gebäudetyp, Baualtersklasse und Sanierungszustand, wird auf Basis eines Energiebilanzverfahrens, das Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sowie Wärmegewinne durch solare Strahlung und interne Wärmequellen

len berücksichtigt, berechnet (Loga und Imkeller-Benjes (1997)). Die Berechnung basiert auf Stammdaten des Gebäudes (insbesondere der beheizten Wohnfläche), Daten über die Gebäudehülle sowie über klimatische Rahmenbedingungen und Annahmen hinsichtlich der Raumsolltemperatur. Für leerstehende Gebäude wird von 20% des Raumwärmebedarfs eines bewohnten Gebäudes ausgegangen, damit Bauschäden vermieden werden.

**Warmwasserbedarf je Typvertreter:** Der Nutzenergiebedarf je Gebäude zu jeder Gebäudegruppe wird als Produkt von Wohnfläche und einem konstanten flächenspezifischen Kennwert von  $15,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  berechnet (DIN 4701). Für leerstehende Gebäude wird kein Bedarf unterstellt.

**Endenergiebedarf je Typvertreter:** Der Endenergiebedarf je Gebäudetypvertreter wird auf Basis des berechneten Nutzenergiebedarfs und Daten über die Anlagentechnik, d.h. Jahresnutzungsgrade inkl. Verteilungsverluste, berechnet (vgl. hierzu Tabelle III.2.14 und Tabelle III.2.21).

Als Basis für die Hochskalierung des Nutz- und Endenergiebedarfs der Gebäudetypvertreter auf Deutschland und kleinräumigere Gebiete (vgl. Kapitel III.2.4) wird die aus dem Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)) abgeleitete Wohnfläche differenziert nach Gebäudetyp, Baualtersklasse, Sanierungszustand und Anlagentechnikvariante herangezogen. Diese Wohnfläche wird unterteilt in bewohnte Wohnfläche und leerstehende Wohnfläche (vgl. Kapitel III.2.1.6). Für die leerstehende Wohnfläche werden kein Warmwasserbedarf und ein reduzierter Raumwärmebedarf unterstellt. Der Warmwasserbedarf wird auf Basis der gesamten bewohnten Wohnfläche berechnet. Diese bewohnte Wohnfläche wird jedoch nicht vollständig mit der angenommenen Raumsolltemperatur beheizt und daher durch einen gebäudetypspezifischen Faktor ( $>1$ ) geteilt, bevor sie in die jeweilige Anzahl der Gebäudetypvertreter, die auf der beheizten Wohnfläche basieren, umgerechnet wird. Die Korrektur für die unbeheizte Fläche in bewohnten Wohnungen erfolgt auf Basis von Schätzungen (1,2 für RH und EFH sowie 1,15 für die restlichen Gebäudetypen) zur Anpassung des Endenergiebedarfs an den Endenergiebedarf für Wohngebäude auf nationaler Ebene (Umweltbundesamt (2010)) (vgl. Kapitel III.5).

### III.2.4. Zeitliche und räumliche Auflösung

Die Ergebnisse des Teilmodells Wohngebäude können demnach direkt differenziert nach Bundesland und Gemeindegrößenklasse und indirekt für jede einzelne Gemeinde simuliert werden. Die grundsätzliche räumliche Auflösung entspricht der Kombination aus Bundesländern und Gemeindegrößenklassen. Die zugehörigen Ergebnisse werden auf Jahresebene (31.12.2006 bis 31.12.2030) berechnet und anschließend auf die Gemeindeebene heruntergebrochen, indem Daten auf Gemeindeebene herangezogen werden, die jedoch nur für das Jahr 2006 zur Verfügung stehen (Statistisches Bundesamt (2008a)). End- und Nutzenergiebedarf sowie Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen können bis auf Monatsebene aufgelöst werden.

Die betrachteten Gemeindegrößenklassen entsprechen dem Merkmal EF536 des Mikrozensus 2006 (Statistisches Bundesamt (2008b)) und sind vom Bundesland abhängig. Sie richten sich nach den Einwohnerzahlen der Gemeinden. Für Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Schleswig-Holstein und Thüringen werden die Klassen  $<5.000$ ,  $5.000-19.999$ ,  $20.000-99.999$ ,  $100.000-499.999$  und  $\geq 500.000$  unterschieden, für Hessen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt die Klassen  $<20.000$ ,  $20.000-99.999$ ,  $100.000-499.999$  und  $\geq 500.000$ , für Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Saarland die Klassen  $<5.000$ ,  $5.000-19.999$ ,  $20.000-499.999$  und  $\geq 500.000$ . Im Falle von Bremen, Berlin und Hamburg existiert nur die Klasse  $\geq 500.000$ .

Um die räumliche Auflösung im Modell zu erhöhen werden für die einzelnen Gemeinden (und auch die Kreise) neben dem Bundesland und dem Kreis die Anzahl der Wohngebäude mit einer Wohneinheit, die Anzahl der Wohngebäude mit 2 Wohneinheiten, die Anzahl der Wohngebäude mit mehr als 2 Wohneinheiten, die Gesamtwohnfläche von Wohngebäuden [ $\text{m}^2$ ], die Anzahl von Wohnungen in Gebäuden, die Gebietsfläche [ $\text{km}^2$ ], die Bevölkerungszahl und die Siedlungsfläche für das Wohnen [ $\text{km}^2$ ] für das Jahr 2006 vorgehalten (Statistisches Bundesamt (2008a)). Daten über die Altersstruktur des Wohngebäudebestandes in den einzel-

nen Gemeinden stehen nicht zur Verfügung. Über die Bevölkerungszahl können die Gemeinden eines Bundeslandes einer Gemeindegrößenklasse zugeordnet werden. Die Verteilung des nach Bundesland und Gemeindegrößenklasse differenzierten Wohngebäudestandes im Modell über die Gemeinden erfolgt unter der Annahme einer Gleichverteilung von Altersstruktur und Anlagentechnik etc. anhand der drei Merkmale zur Anzahl der Wohngebäude in den Gemeinden. Somit können beispielsweise Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen sowie der nach Endenergieträgern differenziert berechnete Endenergiebedarf für jede Gemeinde Deutschlands abgeschätzt werden. Zur Kondensierung der Ergebnisse können die Emissionen und der Endenergiebedarf der zu einem Kreis gehörigen Gemeinden aufsummiert und zur Bildung von Kennwerten auf die Gebietsfläche, die Siedlungsfläche für das Wohnen oder die Bevölkerungszahl bezogen werden.

### **III.2.5. Exkurs: Ansatz zur schrittweisen Vervollständigung und Plausibilitätskontrolle der emissionsrelevanten Daten zu Wärmeerzeugern im deutschen Wohngebäudebestand**

#### **III.2.5.1. Grundlagen**

Zur Berechnung von Luftschadstoffemissionen aus Wärmeerzeugern (z.B. Heizkesseln) in Wohngebäuden sind Emissionsfaktoren zuzuordnen, die nach emissionsrelevanten Kriterien, wie Typ, Leistungsklasse, Baujahr und Wartungszustand der Wärmeerzeuger unterscheiden. Emissionsfaktoren, die nach den drei erstgenannten Kriterien unterscheiden, sind bereits verfügbar (Pfeiffer u. a. (2000)). Hinsichtlich des Wartungszustandes sind momentan noch keine weiterentwickelten Emissionsfaktoren bekannt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass solche in absehbarer Zeit in der Forschung entwickelt und veröffentlicht werden. Ein wesentlicher Mehrwert der im otello-Projekt organisierten und ausgewerteten Daten des deutschen Schornsteinfegerhandwerks setzt die Verfügbarkeit der weiterentwickelten Emissionsfaktoren voraus. Während des Projektverlaufs konnten die Daten des deutschen Schornsteinfegerhandwerks nicht direkt in das Emissionsberechnungs-

modell integriert werden. Zu stichprobenartigen Plausibilitätskontrollen und als Lösungsansatz für zukünftige Verfeinerungen des Emissionsberechnungsmodells stellen die Daten des deutschen Schornsteinfegerhandwerks schon jetzt eine wichtige Grundlage dar. Das deutsche Schornsteinfegerhandwerk ist in 16 Landesinnungsverbände (LIVs) gegliedert, die in den Zentralinnungsverband (ZIV) eingeordnet sind (IWU (2007)). Deutschland ist in ca. 8.000 Kehrbezirke eingeteilt, die jeweils von einem Bezirksschornsteinfegermeister (BSM) betreut werden. Alle BSM sind wiederum Mitglieder der regionalen Innungen. Zwischen ZIV, LIVs und Innungen existiert ein eingespieltes Informationssystem. Es ist davon auszugehen, dass die BSM rund 80% der beheizten und gekühlten Gebäude in ihren Akten, den sogenannten Kehrbüchern, führen. Gebäude, die rein elektrisch oder fernbeheizt sind, werden nicht erfasst. In jedem Kehrbezirk werden vom BSM ca. 2.000 bis 2.200 Anlagen betreut und erfasst. Die Erhebung der Daten des deutschen Schornsteinfegerhandwerks für otello erfolgte nach Genehmigung des ZIV in Kooperation mit dem LIV in Hessen und ausgewählten BSM. Das deutsche Schornsteinfegerhandwerk unterscheidet zwischen vier Kehrbezirkstypen: Stadt, Stadtrand, Kleinstadt und Land. 16 hessische Kehrbezirke wurden vom LIV Hessen für die Datenabfrage ausgewählt, und zwar jeweils vier von jedem Kehrbezirkstyp. Die Kehrbücher werden bei den BSM durchweg in digitaler Form verwaltet. So konnten relativ einfach Datensätze mit den für otello relevanten Attributen abgefragt werden. Hierfür wurde vom Entwickler und Betreuer der Schornsteinfegersoftware ein entsprechendes Abfragemodul generiert. Jeder Datensatz, der in Form einer Excel-Tabelle vorliegt, enthält folgende Attribute:

- Kehrbezirksnummer,
- Postleitzahl (Standort des Gebäudes),
- Schornsteinhöhe,
- Feuerstättenart,
- Brennstoffart,

- Nennwärmeleistung,
- Haupt- bzw. Nebenfeuerstätte,
- Art der Warmwasserbereitung,
- Baujahr,
- Rußzahl (nur bei Energieträger Heizöl),
- Ölderivate (nur bei Energieträger Heizöl),
- Wärmeträgertemperatur (gemessen),
- Abgastemperatur (gemessen),
- O<sub>2</sub> im Ringspalt (gemessen),
- Abgasverlust (berechnet<sup>1</sup>),
- Druckdifferenz in hPa,
- CO ppm im Abgas,
- Messung nach 1. BImSchV bestanden/nicht bestanden.

Aus Gründen des Datenschutzes wurden vom LIV Hessen weder Namen der Eigentümer noch die genauen Adressen weitergegeben. Räumlich sind die Gebäude bzw. die darin befindlichen Wärmeerzeuger nur über die Postleitzahl lokalisierbar. Von besonderer Bedeutung für die Auswertungen sind Feuerstättenart, Brennstoffart, Nennwärmeleistung, Baujahr und Abgasverlust. (Rußzahl und Ölderivate liefern bei Ölheizungen zusätzliche Informationen zur Verbrennungsqualität.) Die Auswertung der Schornsteinfegerdaten liefert für die vier Kehrbezirkstypen aufbereitete Informationen zur Energieträgerverteilung und Altersstruktur sowie zu Leistungsklassen und Wartungszustand. Diese Informationen sollen eine Aussage

---

<sup>1</sup>nach Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV), 2010, Anlage 2, Absatz 3

Tab. III.2.22.: Begrenzung der Abgasverluste nach 1. BImSchV

Leistungsklasse	höchstzulässige Abgasverluste
4 bis 25 kW	11%
25 bis 50 kW	10%
größer 50 kW	9%

darüber ermöglichen wie ein typischer Kehrbezirk (Modellkehrbezirk) strukturiert sein könnte. Mögliche Energieträger sind Erdgas, Stadtgas, Flüssiggas, Heizöl, Holz und Kohle. Die Wärmeerzeuger werden in die Leistungsklassen kleiner 25 kW, 25 bis 50 kW, 50 bis 100 kW, 100 bis 500 kW, 500 bis 1.000 kW und größer 1.000 kW eingeteilt. Die Baujahre werden in Fünfjahresschritten von vor 1975 bis nach 2000 differenziert. Wichtige Informationen zum Wartungszustand der Wärmeerzeuger liefern die Werte zu den Abgasverlusten. Die Abgasverluste, angegeben in Prozent, werden nach der 1. BImSchV u.a. aus den Messwerten von Abgastemperatur, Verbrennungslufttemperatur und Sauerstoffgehalt ermittelt. Die Auswertung unterscheidet zwischen Werten unter 5 % (sehr guter Wartungszustand), 5 bis 10 % (guter Wartungszustand) und größer 10 % (schlechter Wartungszustand). Nach der 1. BImSchV gelten die Anforderungen bei Öl- und Gasfeuerungsanlagen unter den Bedingungen nach Tabelle III.2.22 als erfüllt. Festbrennstoffanlagen, Einzelraumfeuerungsanlagen bis zu 11 kW und Feuerungsanlagen bis 28 kW, die ausschließlich der Trinkwarmwasserbereitung dienen, sind von diesen Bestimmungen ausgenommen.

In den folgenden Auszügen aus der vorgenommenen Auswertung (Abschnitte III.2.1 bis III.2.4) werden die Häufigkeitsverteilungen der Wartungszustände (sehr gut, gut, schlecht) innerhalb der Baualtersklassen für die beiden wichtigsten Energieträger Erdgas und Heizöl dargestellt. Betrachtet werden dabei zunächst die am häufigsten auftretenden Wärmeerzeuger mit einer Nennwärmeleistung von weniger als 25 kW aus jeweils einem Kehrbezirk. Angegeben wird jeweils die absolute Anzahl der gemessenen Wärmeerzeuger.

## III.2.5.2. Auswertung

### Stadtkehrbezirke

**Energieträger Erdgas:** Abbildung III.2.1 zeigt die typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtkehrbezirken. Die Altersverteilung in den Baualtersklassen ab 1985 variiert zwischen den vier ausgewerteten Stadtkehrbezirken, wobei die Baualtersklassen davor generell aus dem Bestand gefallen sind. Es ist erkennbar, dass sich ein überwiegender Teil der Anlagen ab 1985 laut oben genannter Definition in gutem Wartungszustand befindet. Auffallend ist ebenso, dass sich gerade bei neueren Baualtersklassen (z.B. ab 2000) genau so viele Anlagen in schlechtem wie in sehr gutem Wartungszustand befinden.

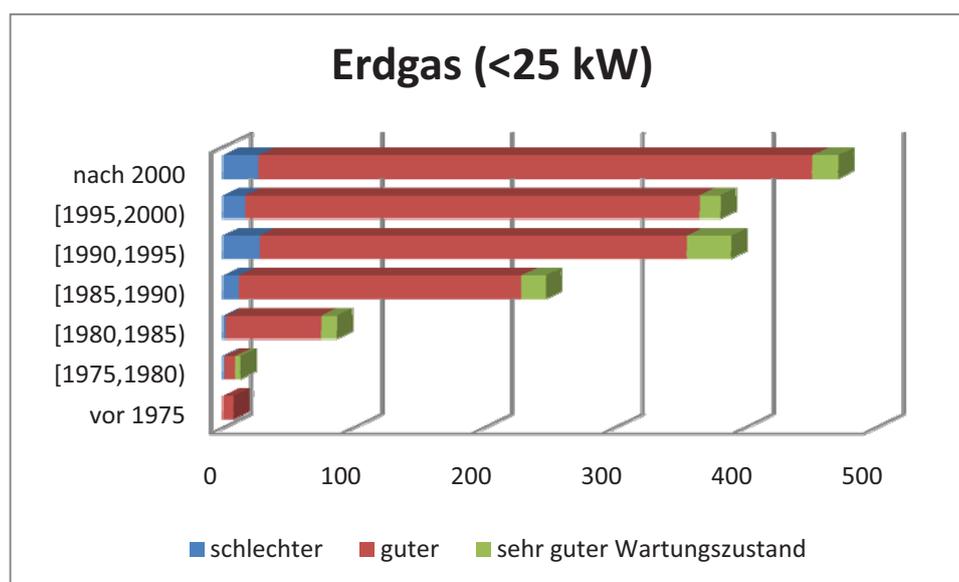


Abb. III.2.1.: Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtkehrbezirken

**Energieträger Heizöl:** Heizöl-Wärmeerzeuger sind in den vier Stadtkehrbezirken deutlich weniger häufig anzutreffen als erdgasbetriebene Wärmeerzeuger. Hiervon sind die meisten in der kleinsten Leistungsklasse angesiedelt. Anzumerken ist, dass im Gegensatz zu Erdgas in den Baualtersklassen zwischen 1985 und 1995 keine Wärmeerzeuger mit schlechten Wartungszuständen angetroffen wurden (siehe Abbildung III.2.2).

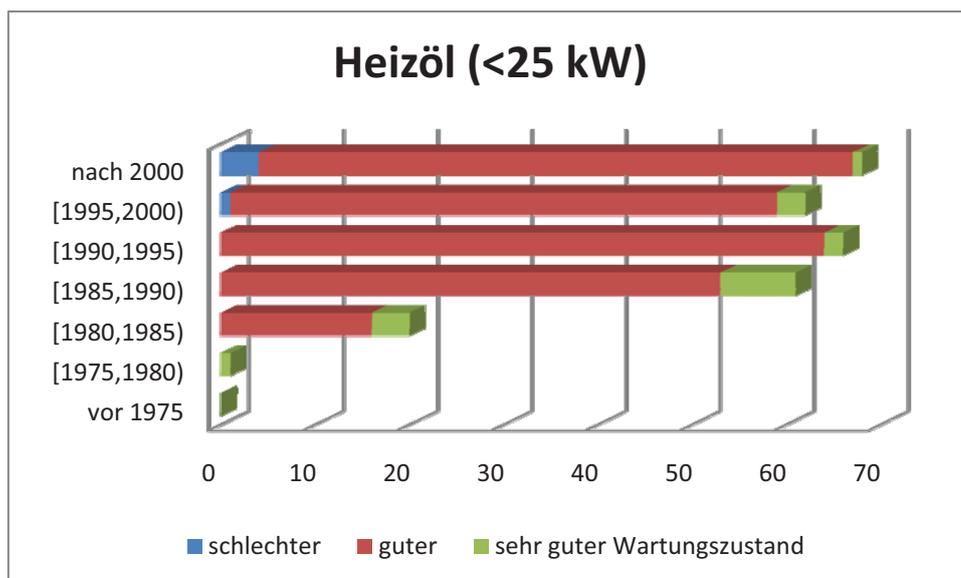


Abb. III.2.2.: Typische Altersverteilung für Heizölwärmerezeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtkehrbezirken

## Stadtrandkehrbezirke

**Energieträger Erdgas:** Neben einer zu den Stadtkehrbezirken ähnlichen Verteilung der Baualtersklassen innerhalb der Stadtrandkehrbezirke fällt in einem Kehrbezirk eine erhebliche Abweichung der Wartungszustände auf. Hier wurden überwiegend Anlagen mit schlechtem Wartungszustand gemessen (Abbildung III.2.3).

**Energieträger Heizöl:** In Abbildung III.2.4 fallen Heizölwärmerezeuger mit schlechtem Wartungszustand in der jüngsten Baualtersklasse auf. Neben der Tatsache, dass auch in allen vier Stadtrandkehrbezirken Heizölwärmerezeuger in geringerer Anzahl als Erdgaswärmerezeuger auftreten, lässt sich auch hier erkennen, dass Wärmerezeuger mit Baujahren vor 1978 praktisch keine Rolle mehr spielen.

## Kleinstadtkehrbezirke

**Energieträger Erdgas:** Altersstruktur und Häufigkeit sind mit jenen in Stadtkehrbezirken vergleichbar (Abbildung III.2.5). Deutlich fällt jedoch der auffallend große Anteil schlecht gewarteter Erdgaswärmerezeuger in den Baualtersklassen ab 1985 auf.

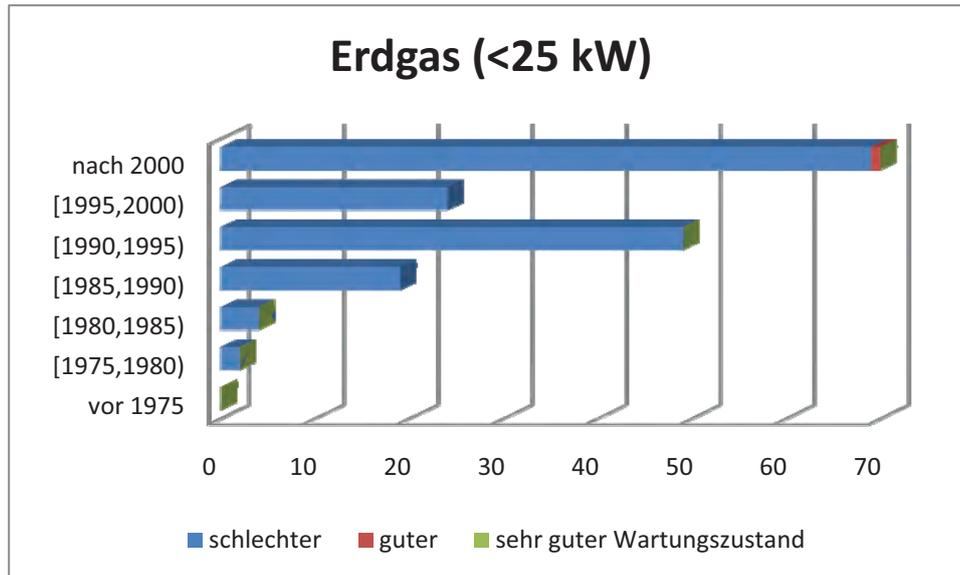


Abb. III.2.3.: Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtrandkehrbezirken

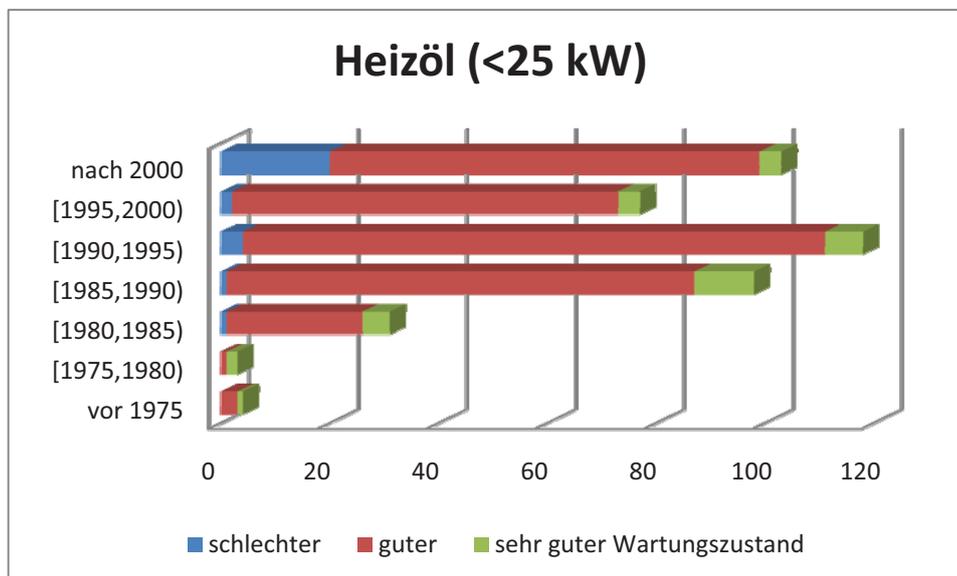


Abb. III.2.4.: Typische Altersverteilung für Heizölwärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtrandkehrbezirken

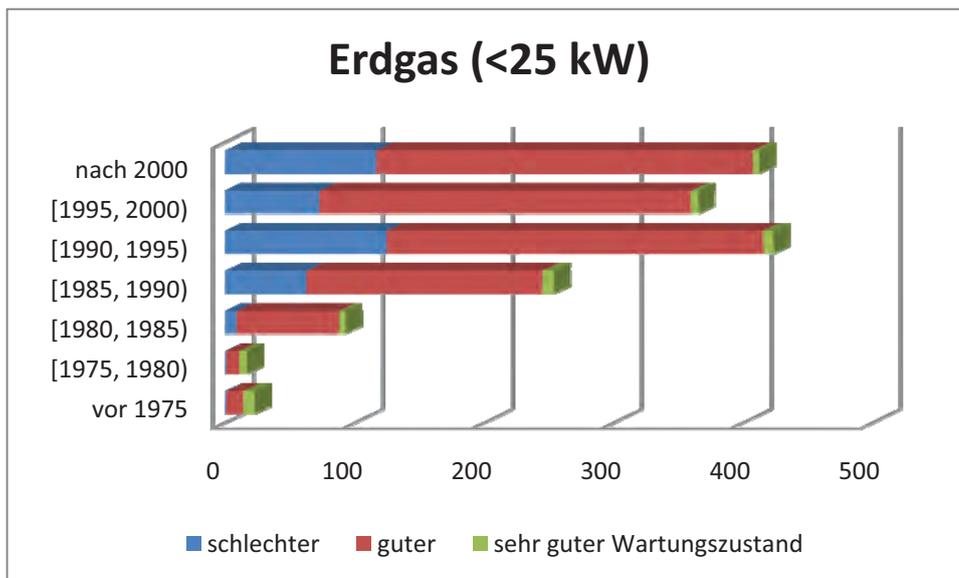


Abb. III.2.5.: Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Kleinstadtkehrbezirken

**Energieträger Heizöl:** In Abbildung III.2.6 fällt auf, dass heizölbetriebene Kessel in Kleinstädten deutlich weniger (bis gar nicht) in sehr gutem Wartungszustand angetroffen wurden. Schlechter Wartungszustand tritt erneut bei der jüngsten Baualtersklasse in Erscheinung.

Zusammenfassend könnte aufgrund der Beobachtungen eine in Kleinstädten gegenüber Großstädten abweichende „Wartungskultur“ angenommen werden.

### Landkehrbezirke

**Energieträger Erdgas:** Erwartungsgemäß sind aufgrund der von Ballungsgebieten abweichenden Versorgungsstruktur in ländlichen Kehrbezirken weniger erdgasbetriebene Systeme anzutreffen als in den anderen Kehrbezirkstypen. In Abbildung III.2.7 fällt auch auf, dass ein überwiegender Teil hiervon in der mittleren Altersklasse (1995 - 2000) anzutreffen ist.

**Energieträger Heizöl:** Heizölbetriebene Heizungen sind gemäß Abbildung III.2.8 wieder in der typischen Altersverteilung anzutreffen. Die neuesten Systeme sind zahlenmäßig am stärksten vertreten. Altsysteme vor 1975 treten praktisch nicht mehr in Erscheinung. Neben überwiegend gut gewarteten

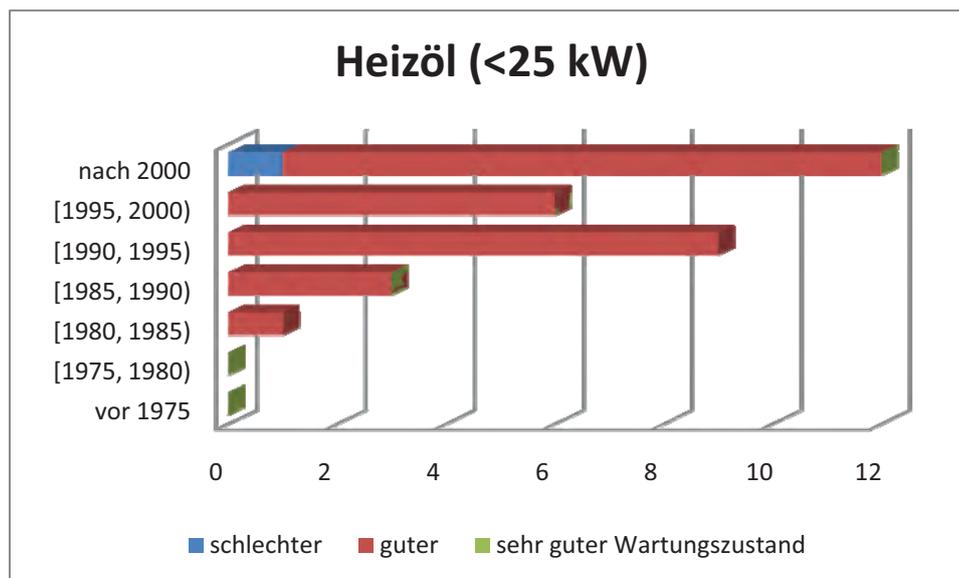


Abb. III.2.6.: Typische Altersverteilung für Heizölwärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Kleinstadtkehrbezirken

Heizölwärmeerzeugern ist die vergleichsweise hohe Anzahl schlecht gewarteter Wärmeerzeuger in der jüngsten Baualtersklasse zu erwähnen.

### III.2.5.3. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die hier vorgestellten typischen Ergebnisse einer Auswertung der erfassten Kehrbezirke sollen verdeutlichen, dass statistisches Datenmaterial existiert, um Emissionsfaktoren, die den Wartungszustand berücksichtigen, zuzuordnen. Ein wichtiger Schritt ist dabei eine mögliche Klassifizierung der Wärmeerzeuger in Wartungszustände (hier schlecht, mittel und gut anhand der Abgasverluste). Es wird empfohlen, vergleichbare Erhebungen in ausgewählten Bundesländern und Regionen zu wiederholen, um die aktuelle Datenlage um eine bisher schwierig zu ermittelnde und zu beschreibende Einflussgröße, dem Wartungszustand, zu erweitern. Aus ersten Erfahrungen wird nun deutlich, dass eine entscheidende Verbesserung der Vorgehensweise zukünftiger Erhebungen die gleichzeitige Erfassung von gebäudebezogenen Daten darstellt. Neben Überlegungen, in bereits abgeschlossenen Projekten ermittelte Gebäudedaten (z.B. auf LOD-2-Ebene) auf Verknüpfungsmöglichkeiten mit Schornsteinfegerdaten zu überprüfen,

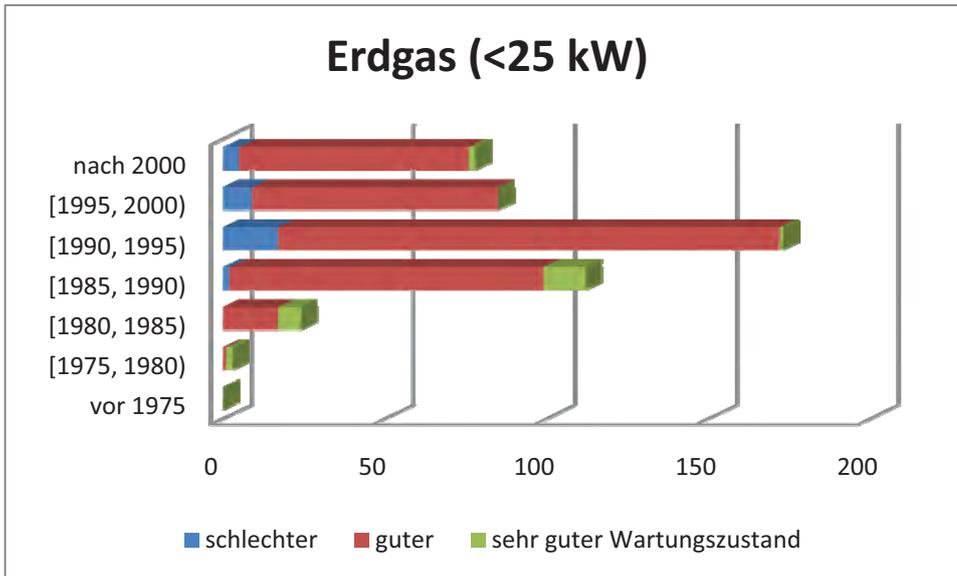


Abb. III.2.7.: Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Landkehrbezirken

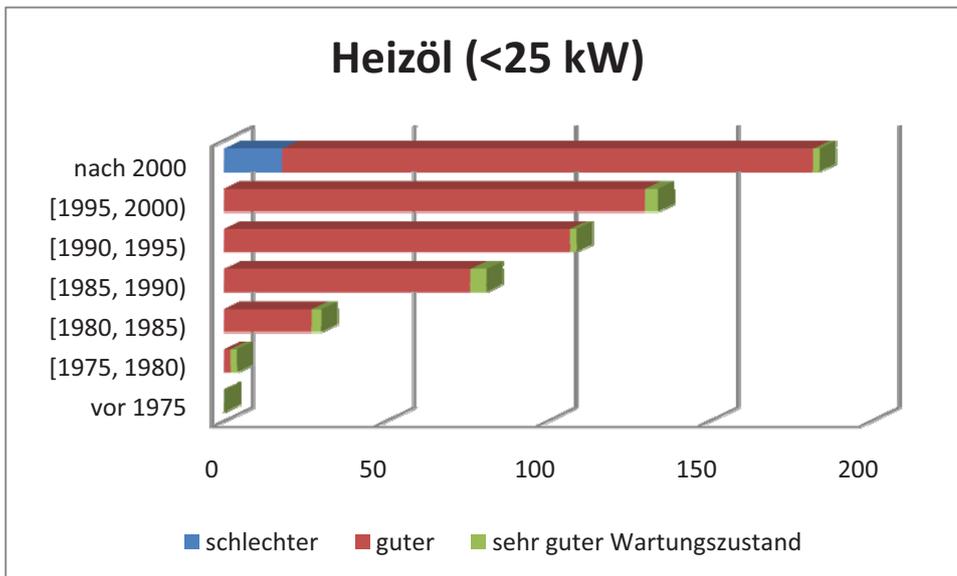


Abb. III.2.8.: Typische Altersverteilung für Heizölrwärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Landkehrbezirken

sollten auch aktuelle gesetzliche Entwicklungen als mögliche Chance zu einer Verbesserung der Datenlage gesehen werden.

So kommen nach der aktuellen Energieeinsparverordnung<sup>2</sup> den BSM zukünftig erweiterte Aufgaben im Rahmen einer sogenannten Feuerstättenschau zu (etwa alle fünf Jahre). Neben den gemäß 1. BImSchV vorgeschriebenen Kontrollen und Messungen sind darüber hinausgehende Eigenschaften der gesamten Heizungsanlage, wie z.B. Dämmung der Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen, zu kontrollieren. Die hierzu ohnehin notwendige Begehung der Gebäude wäre eine Chance, wesentliche Eigenschaften der Gebäudehülle (Baujahr, Ausführung, Sanierungszustand) in zeitlich vertretbarem Aufwand zu erfassen und somit einen Beitrag zur Erstellung sinnvoll verwertbarer Datensätze zu leisten. Um Datenschutz zu gewährleisten, wäre eine Zustimmung der jeweiligen Hauseigentümer anzustreben.

---

<sup>2</sup>vgl. EnEV 2009, §26b.



## **III.3. Veränderung des Wohngebäudebestandes 2006-2030**

In diesem Kapitel wird auf die jährliche Veränderung des Wohngebäudebestandes durch Neubau, Abriss und Sanierung im Teilmodell Wohngebäude von 2006 bis 2030 eingegangen. Nach der Behandlung des Neubaus in Kapitel III.3.1 und des Abrisses in Kapitel III.3.2 wird die Modellierung der Sanierungsentscheidung in Kapitel III.3.3 dargestellt. Die Umnutzung von Gebäuden wird im Modell nicht berücksichtigt.

### **III.3.1. Neubau**

Für die Berücksichtigung des Neubaus von RH, EFH und MFH werden in jährlicher Auflösung bis zum Jahr 2020 zur Verfügung stehende Neubauprognosen (BBSR (2006)) herangezogen. Die verwendete Prognose differenziert nach Bundesland und zwei Gebäudetypen, nämlich MFH und einem einer Kombination aus RH und EFH entsprechenden Gebäudetyp. Von 2020 bis 2030 wird der prognostizierte Neubau von 2020 verwendet. Für die Umrechnung der in Anzahl Wohneinheiten angegebenen Neubauprognose in Wohnflächen werden die Relationen zwischen Wohneinheiten und Wohnflächen der im Modell verwendeten Gebäudetypologie herangezogen (vgl. Kapitel III.2.1). Die Qualität der Gebäudehülle richtet sich nach den gesetzlichen Mindestanforderungen, die durch die umweltpolitischen Instrumente determiniert wird. Hinsichtlich der Anlagentechnik wird angenommen, dass immer die beste Qualitätsstufe aus Kapitel III.2.2 verwendet wird.

Der nach Gebäudetyp und Bundesland differenzierte Neubaubedarf wird proportional zum Wohngebäudebestand auf die Gemeindegrößenklassen in dem je-

Tab. III.3.1.: Zuordnung der Anlagentechnikvarianten im Neubau zu den Anlagentechnikvarianten in der Baualterklasse 2002-2006 im Teilmodell Wohngebäude

<b>Anlagentechnikvariante im Neubau: zentral mit WW (solar)</b>		<b>Anteil am Neubau</b>	<b>Anlagentechnikvariante in der Baualterklasse 2002-2006</b>
NT15	Elektrische Wärmepumpe	RH/EFH: 23% im Jahr 2007 und linearer Anstieg auf 40% im Jahr 2030 MFH: 0%	-
BW6	Ölbrennwertkessel	Anteil der entsprechenden Anlagentechnikvarianten der Baualterklasse 2002-2006, pauschal korrigiert um Wärmepumpenanteil	B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15
BW3	Gasbrennwertkessel		B1, B2, B3
BW9	Holzpelletkessel		B16, B17, B18
NT12	Fernwärme		B19, B20

weiligen Bundesland umgelegt. Die Aufteilung auf Mieter und Eigentümer erfolgt hierbei anhand der Verteilung in der Baualterklasse zwischen 2002 und 2006. Der Wärmepumpenanteil wird exogen vorgegeben. Für den verbleibenden Teil wird die Energieträgerverteilung der Baualterklasse 2002-2006 herangezogen. Die detaillierte Zuordnung der Anlagentechnikvarianten im Neubau zu den Anlagentechnikvarianten der Baualterklasse 2002-2006 ist in Tabelle III.3.1 angegeben. Beim Neubau werden Öl- und Gasbrennwertkessel, Holzpelletkessel, Fernwärmeversorgung sowie monovalente elektrische Wärmepumpen berücksichtigt. Es wird angenommen, dass alle Varianten ausschließlich mit solarthermisch unterstützter integrierter Warmwasserbereitung (zentral mit WW (solar)) verbaut werden.

Der Anteil von Wärmepumpen bei dem den RH und EFH entsprechenden Gebäudetypen lag im Jahr 2006 bei 23%, wobei ein Anteil von 40% vom Bundesverband WärmePumpe (BWP) angestrebt wird (BWP (2010)). Daher wird der Anteil der Wärmepumpen im Neubau für RH und EFH für 2007 auf 23% gesetzt und steigt bis 2030 linear auf 40% an. Es wird angenommen, dass in MFH keine Wärmepumpen eingesetzt werden.

### III.3.2. Abriss

Eine exogen vorgegebene jährliche Abrissrate (in % des Bestandes) wird zunächst nach Gebäudetyp und Bundesland differenziert. Für die alten Bundesländer wird angenommen, dass jährlich 0,043% [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ] des Gesamtbestandes abgerissen (bzw. zurückgebaut) werden. Für die neuen Bundesländer wird von einem jährlichen Abriss von 0,027% für RH und EFH sowie 0,26% für alle übrigen Gebäudetypen (überwiegend die Sonderbauten) ausgegangen. Diese Werte entsprechen mittleren Abrissraten der letzten Jahre (Statistisches Bundesamt (2006–2010)).

Tab. III.3.2.: Kombinationen von Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen, die im Teilmodell Wohngebäude nicht vom Abriss ausgeschlossen sind

Gebäudetyp	Baualtersklasse	Sanierungszustände
RH	1919-48	
	1949-57	
	1958-68	
	1969-78	
EFH, MFH	1919-48	Alle Sanierungszustände mit Sanierung bis einschließlich 2001: -1967, 1968-1977, 1978-1981, 1982-1994, 1995-2001
	1949-57	
	1958-68	
	1969-78	
MFH_NBL	1946-60	
	1961-69	
GMH	1919-48	
	1949-57	
	1958-68	
	1969-78	
GMH_NBL	1970-80	
	1981-85	
	1986-90	
HH	1958-68	
	1969-78	
HH_NBL	1970-80	
	1981-85	

Es wird angenommen, dass nur bestimmte Kombinationen von Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen abgerissen werden. Die Übrigen (historische Bauten, kürzlich errichtete oder energetisch sanierte Gebäude) werden vom Abriss per Annahme ausgeschlossen. Die Abrissraten der im Modell abreibaren Gebäude werden gleichermaßen erhöht, um die vorgegebene Gesamtabrissrate zu erreichen.

### III.3.3. Modellierung der Sanierungsentscheidung

Eine Sanierung wird im Modell durch den Sanierungszeitpunkt und die gewählte Sanierungsvariante determiniert. Eine Sanierungsvariante umfasst die Gebäudehüllenvariante (Vgl. Kapitel III.2.1), d. h. die Art der Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses, der Außenwände und des unteren Gebäudeabschlusses sowie die Fenster, und die Anlagentechnikvariante, d. h. die Leistungsklasse, den Endenergieträger, die Zentralität und die Qualität der Anlagentechnik (vgl. Kapitel III.2.2).

**Sanierungszeitpunkt:** Die potentiellen Sanierungszeitpunkte werden durch Sanierungszyklen bestimmt. Basierend auf dem Baujahr eines Gebäudes wird angenommen, dass die Anlagentechnik bspw. alle 20 Jahre (angelehnt an VDI 2067) und die Gebäudehülle bspw. alle 40 Jahre (angelehnt an BVBW (2001)) saniert werden. „Potentiell“ bedeutet, dass einerseits derartige Sanierungen nicht immer durchgeführt werden bzw. die durchgeführten Sanierungen nicht immer energetischer Natur sind. Dieser Sachverhalt wird bei der Bestimmung bzw. der Auswahl der Sanierungsvarianten berücksichtigt, die durch „Entscheidertypen“ vorgenommen wird. Wird ein Gebäude, das zur Sanierung ansteht, nicht energetisch modernisiert, so besteht im Modell erst nach Ablauf des folgenden Sanierungszyklus wieder die Möglichkeit einer energetischen Sanierung.

**Wirtschaftlichkeit von Sanierungsvarianten:** Auf Basis sozioökonomischer und demographischer Merkmale der selbstnutzenden Eigentümer und Mieter werden die Entscheider unterschiedlichen „Entscheidertypen“ zugeordnet. Für man-

che „Entscheidertypen“ ist die Wirtschaftlichkeit einer Sanierungsvariante ausschlaggebend für die getroffene Entscheidung. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Sanierungsalternative wird die Annuität der Versorgung mit Raumwärme und Warmwasser aus Sicht des selbstnutzenden Eigentümers herangezogen. Gleichung III.3.1 beschreibt formal die Auswahl der wirtschaftlichsten Sanierungsalternative bei der Verwendung dieser Annuität als Wirtschaftlichkeitskriterium.

### Parameter:

$T_{GH}$ :	Lebensdauer Gebäudehülle (Dach, Außenwand, Fenster und Fußboden) [a]
$T_{AT}$ :	Lebensdauer Anlagentechnik [a]
$T_{EW}$ :	Planungshorizont für Zentralitäts- und Energieträgerwechselinvestitionen [a]
$p_a$ :	Preis des Endenergieträgers für Raumwärme von Heizungstyp a [EUR/(kWh/a)]
$p_{a,WW}$ :	Preis des Endenergieträgers für Warmwasser bei Heizungstyp a [EUR/(kWh/a)]
$\eta_a$ :	Jahresnutzungsgrad von Heizungstyp a [-]
$\eta_{a,WW}$ :	Jahresnutzungsgrad der Warmwasserbereitung von Heizungstyp a [-]
$v_a$ :	Anteil des Warmwasserenergiebedarfs, der von abweichendem Energieträger gedeckt wird [-]
$\dot{Q}_{HW,h}$ :	Heizwärmebedarf bei Gebäudehüllenvariante h [kWh/a]
$\dot{Q}_{WW}$ :	Nutzenergiebedarf Warmwasser [kWh/a]
$i$ :	Kalkulationszinssatz [1/a]
$I_h$ :	Investition für Gebäudehüllenvariante h [EUR]
$I_a$ :	Investition für Anlagentechnikvariante a [EUR]
$I_{EW,a}$ :	Investition für Zentralitäts- und Energieträgerwechsel zu Anlagentechnikvariante a [EUR]
$F_h$ :	Förderung für Gebäudehüllenvariante h [EUR]

- $F_a$  : Förderung für Anlagentechnikvariante a [EUR]  
 $F_{EW,a}$  : Förderung für Energieträgerwechsel zu  
 Anlagentechnikvariante a [EUR]

**Entscheidungsvariablen:**

- $a = 1 \dots A$  Anlagentechnikvarianten [-]  
 $h = 1 \dots H$  Gebäudehüllenvarianten [-]

**Zielfunktion:**

- $k(a, h)$  : Annuität für die Versorgung eines Gebäudes mit Raumwärme und  
 Warmwasser mit Anlagentechnik  $a$  und Gebäudehülle  $h$  [EUR/a]

$$\begin{aligned}
 \min_{a,h} k(a, h) &= \frac{(1+i)^{T_{GH}} \cdot i}{(1+i)^{T_{GH}} - 1} (I_h - F_h) + \frac{(1+i)^{T_{AT}} \cdot i}{(1+i)^{T_{AT}} - 1} (I_a - F_a) \\
 &+ \frac{(1+i)^{T_{EW}} \cdot i}{(1+i)^{T_{EW}} - 1} (I_{EW,a} - F_{EW,a}) + \frac{p_a}{\eta_a} \cdot \dot{Q}_{HW,h} \\
 &+ \frac{p_{a,WW}}{\eta_{a,WW}} \cdot (1 - v_a) \cdot \dot{Q}_{WW}
 \end{aligned} \tag{III.3.1}$$

In die Zielfunktion gehen die Annuitäten der Investitionen (abzgl. der jeweiligen Förderungen) für die Gebäudehüllenvariante, die Anlagentechnikvariante, den Zentralitäts- und den Energieträgerwechsel sowie für den Endenergieträgerverbrauch ein. Wartung und Instandhaltung werden vernachlässigt. Es wird hierbei angenommen, dass die Entscheider auf Basis der aktuellen Energiepreise über die Vorteilhaftigkeit einer Investition entscheiden. Eine Annahme steigender Energiepreise führte tendenziell zur Auswahl einer stärkeren Dämmung und Anlagentechnik, die mit höheren Investitionen und niedrigeren Energiekosten verbunden wäre. Letzteres ist einerseits durch eine Erhöhung des Jahresnutzungsgrades der Anlagentechnik und andererseits durch einen Wechsel zu günstigeren Energieträgern möglich.

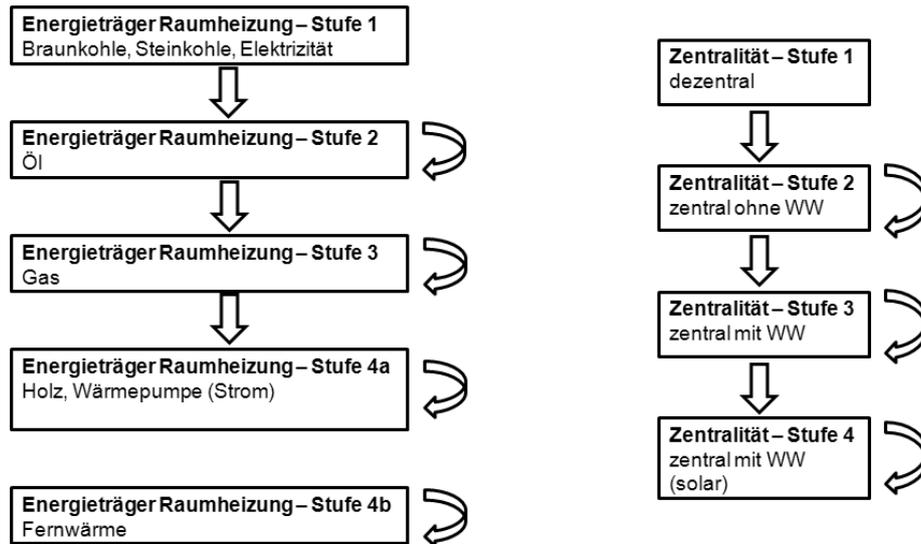


Abb. III.3.1.: Zulässige Wechsel der Energieträger (links) und der Zentralität (rechts) der Anlagentechnik im Teilmodell Wohngebäude

**Praktische Relevanz und Legalität von Sanierungsvarianten:** Unabhängig von den rechtlichen Rahmenbedingungen und der Wirtschaftlichkeit von Alternativen sind in Deutschland bestimmte Übergänge zwischen Anlagentechnikvarianten, wie der Wechsel von Öl zu Kohle, in der Realität kaum vorstellbar. Dies kann zumindest teilweise mit mangelndem Komfort bspw. für die Befuerung von Kohleöfen begründet werden. Daher sind im Modell nur die Energieträgerwechsel und Zentralitätswechsel zugelassen, die in Abbildung III.3.1 dargestellt sind. Dies wird durch die Einschränkung der möglichen Sanierungsalternativen berücksichtigt. Derart wird auch die „Legalität“ der Sanierungsvarianten von Gebäudehülle und Anlagentechnik, die durch ordnungsrechtliche Instrumente eingeschränkt werden kann, berücksichtigt.

**Entscheidertypen:** Die Entscheider werden unterschieden in selbstnutzende Eigentümer und Vermieter. Diese beiden Gruppen werden jeweils in fünf Untergruppen unterteilt. Im Falle der selbstnutzenden Eigentümer sind dies fünf Entscheidertypen, nämlich Ausbesserer, Mindestmaßsanierer, Ökonom mit hoher Renditeforderung, Ökonom mit niedriger Renditeforderung und Öko. Im Falle der Vermieter sind dies fünf Bewirtschaftungsstrategien, nämlich Abbruchstrategie, Substanzerhaltungsstrategie, Wertvermehrungsstrategie mit hohem und niedrigem Kalkula-

tionszinssatz und Ökomodernisierungsstrategie. **Ausbesserer und Vermieter mit Abbruchstrategie** investieren nicht in Energieeffizienzmaßnahmen und auf erneuerbaren Energien basierende Anlagentechnikvarianten, da ordnungspolitische Instrumente bzgl. der Gebäudehülle und der Anlagentechnik, wie bspw. die EnEV, nicht greifen bzw. nicht durchgesetzt werden und bspw. die Anlagentechnik bis zum endgültigen technischen Versagen nur notdürftig instandgesetzt wird. **Mindestmaßsanierer und Vermieter mit Substanzerhaltungsstrategie** investieren in Energieeffizienzmaßnahmen gemäß den ordnungsrechtlichen Mindestanforderungen an Gebäudehülle und Qualität der Anlagentechnik. Bei der Anlagentechnik wird eine „Trägheit“ unterstellt; derart, dass ausgehend von der zu ersetzenden Anlagentechnik nur die Mindestzahl an Schritten gemäß Abbildung III.3.1 durchgeführt wird, die notwendig ist, um eine „legale“ oder verfügbare Anlagentechnikvariante zu erhalten. Dies entspricht mindestens Stufe 2 hinsichtlich der Zentralität und Stufe 2 oder Stufe 4b hinsichtlich des Energieträgers. Besteht aus zuvor genannten Gründen keine Notwendigkeit zum Wechsel, verharren sie auf ihrer bisherigen Stufe. Die Entscheidertypen **Ökonom mit hoher oder niedriger Renditeforderung** sowie **Vermieter mit Wertvermehrungsstrategie mit hohem oder niedrigem Kalkulationszinssatz** wählen im Falle einer Teilsanierung (nur Anlagentechnik) die Anlagentechnikvariante mit minimaler Annuität bei bestehender Hülle, wobei die unterschiedlichen Zinssätze die unterschiedlichen Fremdkapitalzinsen bzw. Renditeforderungen repräsentieren. Bei einer Vollsanierung (Gebäudehülle und Anlagentechnik) wird die Kombination aus Gebäudehülle und Anlagentechnik mit der minimalen Annuität ausgewählt. Die gesetzlichen Mindestanforderungen müssen eingehalten werden. Die Entscheidertypen **Öko und Vermieter mit Ökomodernisierungsstrategie** investieren im Falle einer Teilsanierung in die Anlagentechnikvariante mit minimaler Annuität aus einer Menge vermeintlich „umweltfreundlicher“ Anlagentechnikvarianten bei bestehender Gebäudehülle, d. h. die qualitativ hochwertigere Anlagentechnikvariante (z. B. Brennwertkessel), Stufe 4a und 4b hinsichtlich des Energieträgers und Stufe 3 oder 4 hinsichtlich der Zentralität (vgl. Abbildung III.3.1). Im Falle einer Vollsanierung

wird die stärkste Dämmung verbaut und wiederum die Anlagentechnikvariante mit optimaler Annuität aus einer Menge „umweltfreundlicher“ Anlagentechnikvarianten gewählt.

**Transformationsmatrizen:** Die Anteile der Entscheidungstypen und der Bewirtschaftungsstrategien an den Entscheidungsträgern werden auf der Basis von sozio-ökonomischen und demografischen Merkmalen der Selbstnutzer und der Mieter geschätzt. Diese Merkmale werden differenziert nach Gebäudetyp, Baualtersklasse, Bundesland sowie Eigentümerstruktur und sind ebenfalls dem Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)) entnommen. Sie umfassen im Falle der Selbstnutzer das Alter des Haupteinkommensbeziehers (EF732), das Haushaltsnettoeinkommen (EF707) sowie die Haushaltsgröße und im Falle vermieteter Wohnungen die Bruttokaltmiete (EF502), das Haushaltsnettoeinkommen sowie die warmen Nebenkosten (EF501). Die Vielfalt möglicher Merkmalsausprägungen wurde durch Klassenbildung reduziert. Beim Alter des Haupteinkommensbeziehers werden die Klassen <35 Jahre, 35-53 Jahre sowie >53 Jahre, beim Haushaltsnettoeinkommen <1.500 EUR/Monat, 1.500-3.200 EUR/Monat sowie >3.200 EUR/Monat, bei der Haushaltsgröße 1, 2, 3, 4 und  $\geq 5$  Personen, bei der Bruttokaltmiete <4,9 EUR/m<sup>2</sup> (Wohnfläche), 4,9-7 EUR/m<sup>2</sup> sowie >7 EUR/m<sup>2</sup> und bei den warmen Nebenkosten <0,8 EUR/m<sup>2</sup> (Wohnfläche), 0,8-1,5 EUR/m<sup>2</sup> sowie >1,5 EUR/m<sup>2</sup> unterschieden. Eine Transformationsmatrix weist jeder Kombination solcher Klassen zu einem gewissen Anteil einen Entscheidungstyp bzw. eine Bewirtschaftungsstrategie zu. Unsicherheiten in Hinsicht auf die Transformationsmatrizen können über Szenarios berücksichtigt werden. Die für das Basisszenario verwendeten Transformationsmatrizen basieren auf Annahmen und sind für selbstnutzende Eigentümer in Tabelle III.3.3 und für Vermieter in Tabelle III.3.4 dargestellt.

Die Gedanken, die den Transformationsmatrizen zu Grunde liegen, werden im Folgenden beschrieben. Selbstnutzende Eigentümer mit niedrigem Haushaltseinkommen können keine hinreichenden finanziellen Mittel für eine Sanierung aufbringen. Bei mittlerem Haushaltseinkommen stehen prinzipiell hinreichend finanzielle Mittel zur Verfügung, wobei einerseits ein hoher Zinssatz bzw. eine hohe Renditeforderung verwendet wird, um die begrenzten

Tab. III.3.3.: Transformationsmatrix zur Zuordnung selbstnutzender Eigentümer zu Entscheidertypen im Basisszenario

Altersklasse des Haupteinkommensbeziehers [Jahre]	Haushaltsnettoeinkommen [EUR/Monat]	HH-Größe [Personen]	Anteil der Ausbeserter	Mindestmaßsanierer	Ökonom mit hoher Renditeforderung	Ökonom mit niedriger Renditeforderung	Öko
<35	<1.500	1	100%	0%	0%	0%	0%
		2	100%	0%	0%	0%	0%
		3	100%	0%	0%	0%	0%
		4	100%	0%	0%	0%	0%
		>=5	100%	0%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	1	0%	50%	33%	0%	17%
		2	20%	40%	27%	0%	13%
		3	40%	30%	20%	0%	10%
		4	60%	20%	13%	0%	7%
		>=5	80%	10%	7%	0%	3%
	>3.200	1	0%	17%	0%	33%	50%
		2	0%	17%	0%	33%	50%
		3	0%	17%	0%	33%	50%
		4	0%	17%	0%	33%	50%
		>=5	0%	17%	0%	33%	50%
35-53	<1.500	1	100%	0%	0%	0%	0%
		2	100%	0%	0%	0%	0%
		3	100%	0%	0%	0%	0%
		4	100%	0%	0%	0%	0%
		>=5	100%	0%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	1	0%	58%	33%	0%	8%
		2	20%	47%	27%	0%	7%
		3	40%	35%	20%	0%	5%
		4	60%	23%	13%	0%	3%
		>=5	80%	12%	7%	0%	2%
	>3.200	1	0%	33%	0%	33%	33%
		2	0%	33%	0%	33%	33%
		3	0%	33%	0%	33%	33%
		4	0%	33%	0%	33%	33%
		>=5	0%	33%	0%	33%	33%
>53	<1.500	1	100%	0%	0%	0%	0%
		2	100%	0%	0%	0%	0%
		3	100%	0%	0%	0%	0%
		4	100%	0%	0%	0%	0%
		>=5	100%	0%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	1	40%	35%	20%	0%	5%
		2	40%	35%	20%	0%	5%
		3	40%	35%	20%	0%	5%
		4	60%	23%	13%	0%	3%
		>=5	80%	12%	7%	0%	2%
	>3.200	1	30%	41%	0%	18%	12%
		2	30%	41%	0%	18%	12%
		3	20%	47%	0%	20%	13%
		4	10%	53%	0%	23%	15%
		>=5	10%	53%	0%	23%	15%

Tab. III.3.4.: Transformationsmatrix zur Zuordnung von Mietern zu Bewirtschaftungsstrategien im Basisszenario

Bruttokaltmiete [EUR/m <sup>2</sup> ]	Haushaltsnettoeinkommen des Mieters [EUR/Monat]	Warme Nebenkosten [EUR/m <sup>2</sup> ]	Abbruchstrategie	Substanzerhaltungsstrategie	Wertvermehrungsstrategie mit hohem Kalkulationszinssatz	Wertvermehrungsstrategie mit niedrigem Kalkulationszinssatz	Ökomodernisierungsstrategie
<4,9	<1.500	<0,8	75%	25%	0%	0%	0%
		0,8-1,5	50%	50%	0%	0%	0%
		>1,5	25%	75%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	<0,8	50%	25%	25%	0%	0%
		0,8-1,5	33%	33%	33%	0%	0%
		>1,5	0%	33%	50%	0%	17%
	>3.200	<0,8	0%	25%	75%	0%	0%
		0,8-1,5	0%	0%	92%	0%	8%
		>1,5	0%	0%	83%	0%	17%
4,9-7	<1.500	<0,8	75%	25%	0%	0%	0%
		0,8-1,5	50%	50%	0%	0%	0%
		>1,5	25%	75%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	<0,8	50%	25%	25%	0%	0%
		0,8-1,5	33%	33%	33%	0%	0%
		>1,5	0%	33%	50%	0%	17%
	>3.200	<0,8	0%	25%	75%	0%	0%
		0,8-1,5	0%	0%	92%	0%	8%
		>1,5	0%	0%	83%	0%	17%
>7	<1.500	<0,8	75%	25%	0%	0%	0%
		0,8-1,5	50%	50%	0%	0%	0%
		>1,5	25%	75%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	<0,8	50%	25%	25%	0%	0%
		0,8-1,5	33%	33%	33%	0%	0%
		>1,5	0%	33%	50%	0%	17%
	>3.200	<0,8	0%	25%	75%	0%	0%
		0,8-1,5	0%	0%	92%	0%	8%
		>1,5	0%	0%	83%	0%	17%

Mittel zu berücksichtigen, und andererseits bei steigender Haushaltsgröße die finanziellen Restriktionen stärker werden. Ein Großteil der durchgeführten Sanierungen entspricht aufgrund der Finanzrestriktionen den gesetzlichen Mindestanforderungen. Für hohe Haushaltseinkommen wird angenommen, dass Bereitschaft und Fähigkeit, in umweltfreundlichere Alternativen zu investieren, höher sind. Die abnehmenden Finanzrestriktionen spiegeln sich zudem in einem höheren Anteil des Entscheidertyps mit niedriger Renditeforderung wider. In allen Einkommensklassen nehmen bei hohem Alter des Haupteinkommensbeziehers die Anteile der Ökos ab und die der Ausbesserer zu. Dies kann beispielsweise durch kürzere Planungshorizonte begründet werden.

Bei den Vermietern stehen aufgrund der Struktur des Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)) nur sozio-ökonomische und demographische Daten der Mieter zur Verfügung, auf Basis derer Rückschlüsse auf das Sanierungsverhalten der Vermieter gezogen werden müssen. Ökomodernisierungen sind im Vergleich zu selbstnutzenden Eigentümern seltener anzutreffen. Mit zunehmender Einkommensklasse der Mieter steigt einerseits die Möglichkeit, Mieterhöhungen zu tragen, und zudem wird unterstellt, dass diese eher in Wohngebieten angetroffen werden, in denen für sanierte Wohnungen adäquate Mieten erzielt werden können. Mit steigenden warmen Nebenkosten steigen ebenso die Notwendigkeit von Sanierungen sowie die Akzeptanz von Mietsteigerungen bei gleichzeitiger Nebenkostenreduktion. Der Einfluss der Bruttokaltmiete wurde zunächst nicht berücksichtigt, da zuvor eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Gemeindegrößenklassen sinnvoll scheint.

Obwohl die begrenzte Datenverfügbarkeit hinsichtlich der Entscheidertypen große Unsicherheiten birgt, ermöglicht sie die Einbindung von qualitativem Expertenwissen wie bspw. Aussagen über Relationen zwischen unterschiedlichen unsicheren Größen. Da aber für gegebene Transformationsmatrizen bspw. die sich ergebenden aggregierten Sanierungsraten mit Sanierungsraten aus der Literatur verglichen werden können, kann zumindest die Plausibilität der unterstellten, die Relationen widerspiegelnden Transformationsmatrizen überprüft werden. Unterschiedliche plausible Matrizen können dann in Szenarios analysiert werden.

## **III.4. Szenarios: Unsichere Parameter und umweltpolitische Instrumente**

Das Modell umfasst mehrere unsichere Parameter, deren konkrete Ausprägungen in Storylines zusammengefasst werden, und mehrere umweltpolitische Instrumente, deren konkrete Ausprägungen in Bündeln zusammengefasst werden. Jeweils ein Tupel aus einer Storyline und einem Bündel umweltpolitischer Instrumente wird als Szenario definiert. Die unsicheren Parameter werden in Kapitel III.4.1, die berücksichtigten umweltpolitischen Instrumente in Kapitel III.4.2 und die Szenarios in Kapitel III.4.3 erläutert.

### **III.4.1. Unsichere Parameter**

Als Bottom-up-Modell besitzt das Teilmodell Wohngebäude zahlreiche unsichere Parameter. Auf sämtliche unsichere Parameter einzugehen, ist nicht das Anliegen dieses Kapitels. Vielmehr werden kurz unsichere Parameter vorgestellt, auf die das Teilmodell Raumwärme entweder sensitiv reagiert oder die für die Interpretation der Ergebnisse anderweitig von Bedeutung sind. Zu diesen zählen die technischen Lebensdauern der Anlagentechnik und der Gebäudehülle, die mit dem Planungshorizont für Zentralitäts- und Energieträgerwechselinvestitionen gleichgesetzt werden, der Kalkulationszinssatz bzw. die Renditeforderung der Entscheider, die Raumsolltemperatur, die Außentemperaturen sowie die Faktoren für unbeheizte Flächen. Weitere Parameter stellen die Bevölkerungsentwicklung sowie die Neubau-, Abriss- und Leerstandsdaten dar, die bei dem vorliegenden Modell jedoch nicht variiert wurden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit konzentriert sich die Darstellung der Ergebnisse auf die beiden in Tabelle III.4.1 angegebenen Story-

Tab. III.4.1.: Übersicht über die im Teilmodell Wohngebäude betrachteten Storylines

Name der Storyline	Technische Lebensdauer der Anlagentechnik bzw. Gebäudehülle [Jahre]	Kalkulationszinssatz		Raum-solltemperatur	Außen-temperatur	Faktor für unbeheizte Fläche	
		niedrig	hoch			$\leq 2WE$	$> 2WE$
Basis	20 bzw. 40	5%	7%	19 °C	Basis	1,2	1,15
Kurze Zyklen	15 bzw. 30	5%	7%	19 °C	Basis	1,2	1,15

lines, bei denen ob ihrer Bedeutung ausschließlich die technischen Lebensdauern und damit die Sanierungszyklen variiert wurden. Die Faktoren für unbeheizte Flächen wurden zur Kalibrierung verwendet (vgl. Kapitel III.5).

### III.4.2. Umweltpolitische Instrumente

Die im Teilmodell Raumwärme abbildbaren umweltpolitischen Instrumente umfassen ordnungsrechtliche Instrumente, Energiesteuern, finanzielle Förderprogramme sowie Informationskampagnen. Jedes Instrument verfügt über unterschiedliche Intensitätsstufen. Die Intensität kann für jede Simulationsperiode separat gesetzt werden, um die schrittweise Verschärfung umweltpolitischer Instrumente abbilden zu können. Die Gesamtheit aller Instrumente mit ihren jeweiligen Ausprägungen für jede Simulationsperiode wird als Bündel umweltpolitischer Instrumente bezeichnet.

**Ordnungsrechtliche Instrumente:** Die Ordnungspolitischen Instrumente sind an die Energieeinsparverordnung (EnEV) auf Basis des Energieeinspargesetzes (EnEG) sowie die 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) angelehnt und umfassen Mindestanforderungen hinsichtlich der energetischen Qualität der Gebäudehülle sowie der Qualität der Anlagentechnik. Die EnEV enthält Mindestanforderungen an den Neubau, an die Sanierung bei wesentlichen Änderungen von Bauteilen sowie Nachrüstverpflichtungen. Durch diese Mindestanforderungen werden einerseits die zulässigen, d. h. die legalen, Sanierungsvarianten eingeschränkt und zudem die Wirtschaftlichkeit durch an die Gesetzgebung gekoppelte Fördersätze beeinflusst. Bei den Mindestanforderungen an die Gebäudehülle

werden sowohl beim Neubau als auch bei der energetischen Sanierung vier Intensitäten unterschieden, nämlich den Sanierungsepochen 2007-2008 (+), 2009-2030a (++) , 2009-2030b (+++) und 2009-2030c (++++) entsprechenden Gebäudehüllen. Bei den Mindestanforderungen an die Anlagentechnik werden drei Intensitäten unterschieden, nämlich \*, \*\* und \*\*\*. Die Intensitäten \* und \*\* entsprechen den Anlagentechnikvarianten NT1 bis NT15 und unterscheiden sich lediglich in einer Herabsetzung der finanziellen Förderung von \* zu \*\*. \*\*\* entspricht den Anlagentechnikvarianten BW1 bis BW9 und NT10 bis NT15.

**Energiesteuern:** Die Energiesteuern sind angelehnt an die Ökosteuer und werden über die Preise der Endenergieträger abgebildet. Es werden die drei Intensitäten # (Basis), ## (erhöhte Ökosteuer) und ### (stark erhöhte Ökosteuer) unterschieden.

Tab. III.4.2.: Investitionszuschuss [in % der Investition] in finanziellen Förderprogrammen für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in Abhängigkeit von ordnungsrechtlichen Instrumenten; n. m. steht für nicht möglich bzw. nicht betrachtet

Geförderte Gebäudehüllenvariante	Ordnungsrechtliche Instrumente															
	+			++			+++			++++						
	*	**	***	*	**	***	*	**	***	*	**	***				
+	0			n.m.												
++	10	n.m.		n.m.			0	0	n.m.							
+++	15			n.m.			10	10	n.m.		0	0	n.m.			
++++	20			n.m.			15	15	n.m.		10	10	n.m.		0	0

**Finanzielle Förderprogramme:** Die finanziellen Förderprogramme sind vor allem angelehnt an das am 31.03.2009 geschlossene CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm, den Nachfolger Energieeffizient Sanieren und das Marktanreizprogramm Erneuerbare Energien (Oeko-Institut u. a. (2009)). Diese umfassen bspw. Kredite mit günstigen Konditionen oder Investitionszuschüsse. Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) fördert in diesem Rahmen z. Zt. Maßnahmen, die einer über den gesetzlichen Anforderungen liegenden Verbesserung des energetischen Standards dienen. Dabei sind Gesamtmaßnahmen (KfW-Effizienzhäuser) für Neubau und Be-

stand sowie Einzelmaßnahmen für den Bestand förderfähig. Das Bundesamt für Wirtschaft (BAFA) konzentriert seine Förderangebote im Rahmen des Marktanzreizprogramms auf ausgewählte Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien. Modelliert werden diese finanziellen Förderprogramme allesamt als Investitionszuschüsse für die Anlagentechnik und die energetische Sanierung der Gebäudehülle. Somit werden z. Zt im Modell Unterschiede bei den Auszahlungsarten, die von der Rolle der Antragsteller (z.B. Vermieter oder selbstnutzende Eigentümer) beeinflusst werden, vernachlässigt. Im Modell wird z. Zt auch nur die Sanierung des Wohngebäudebestandes berücksichtigt. Es werden drei Intensitäten unterschieden, nämlich keine Förderung (\$), Basis (\$\$) und um 50% erhöhte Fördersätze (\$\$\$). Die konkreten Fördersätze zur Intensität Basis (\$) orientieren sich dabei an den ordnungsrechtlichen Instrumenten und sind in Tabelle III.4.2 für die Gebäudehülle und in Tabelle III.4.3 für die Anlagentechnik dargestellt. So werden Maßnahmen, die die ordnungsrechtlichen Instrumente höchstens erfüllen, nie gefördert.

Tab. III.4.3.: Investitionszuschuss [in % der Investition] bei finanziellen Förderprogrammen für den Ersatz der Anlagentechnik in Abhängigkeit von ordnungsrechtlichen Instrumenten; n. m. steht für nicht möglich bzw. nicht betrachtet

Geförderte Anlagentechnikvariante	Ordnungsrechtliche Instrumente												
	+			++			+++			++++			
	*	**	***	*	**	***	*	**	***	*	**	***	
*	5	n.m.		0	0		n.m.	0	0		n.m.	0	0
**	10			10	10			10	0			0	0

**Informationskampagnen:** Die Wirkung von Informationskampagnen und Ähnlichem wird über die Veränderung von Transformationsmatrizen, die die Grundlage für die Ermittlung der Entscheidertypenanteile bilden, abgebildet (vgl. Kapitel III.3.3). Es werden vier Intensitäten unterschieden, nämlich Basis (Beibehaltung, vgl. Tabelle III.3.3 und Tabelle III.3.4), nur Mindestmaßsanierer und Substanzerhaltungsstrategien (Mindestmaßsanierer), nur Ökonomen mit niedriger Renditeforderung und Werterhaltungsstrategien mit niedrigem Kalkulationszinsatz (Ökonom) sowie nur Ökos und Ökomodernisierungsstrategien (Öko).



Tab. III.4.5.: Übersicht über die betrachteten Szenarios im Teilmodell Wohngebäude

Name des Szenarios	Name des Bündels umweltpolitischer Instrumente	Name der Storyline
Basis	Basis	Basis
Strenges Recht	Strenges Recht	Basis
Stufenweises Recht	Stufenweises Recht	Basis
Ohne Förderung	Ohne Förderung	Basis
Erhöhte Förderung	Erhöhte Förderung	Basis
Ökomodernisierer	Ökokampagne	Basis
Ökonom	Wirtschaftlichkeitskampagne	Basis
Mindestmaßsanierer	Ordnungspolitischer Vollzug	Basis
Ökoschnellmodernisierer	Ökokampagne	Kurze Zyklen
Ambitionierter Vollzug	Ambitionierter Vollzug	Basis

wird im Vergleich zum Basis-Szenario die finanzielle Förderung weggelassen bzw. um 50% erhöht.

Das Szenario *Mindestmaßsanierer* repräsentiert den vollständigen Vollzug ordnungspolitischer Rahmenbedingungen. Beim Szenario *Ökonom* wählen die Entscheider darüber hinaus eine ambitionierte Alternative, falls diese wirtschaftlicher ist. Die Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* stellen Extremszenarios dar, bei denen sämtliche Entscheider die energieeffizienteste Gebäudehülle und eine „vermeintlich umweltfreundliche“ Anlagentechnikvariante wählen. Im ersteren Fall werden die Sanierungszyklen des Basisszenarios und im letzteren verkürzte Sanierungszyklen angesetzt. Das Szenario *Ambitionierter Vollzug* repräsentiert eine Kombination der Szenarios *Strenges Recht* und *Mindestmaßsanierer*, in dem die Durchsetzung der verschärften ordnungspolitischen Rahmenbedingungen erzwungen wird.

## **III.5. Kalibrierung des Modells für das Szenario Basis**

Die Kalibrierung des Modells erfolgte für das Szenario *Basis* und kann in die Kalibrierung des Startbestandes im Jahre 2006 (Kapitel III.5.1) und die Kalibrierung der jährlichen Dynamik (Kapitel III.5.2) unterteilt werden.

### **III.5.1. Kalibrierung des Startbestandes 2006**

Um die den „Bottom-up“-Modellen inhärenten, vielfältigen Annahmen, die für die Ableitung des Startbestandes bzw. -zustandes der Wohngebäude im Jahr 2006 notwendig waren, zumindest zu plausibilisieren, werden bestimmte Größen, die aus diesen rechnerisch folgen, mit anderweitig verfügbaren (Ergebnis-)Daten abgeglichen. Zu diesen zählen Daten zu Wohnflächen, Endenergiebedarfen, Heizwärmebedarfen, Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen sowie der Anteil sanierter Gebäude im Jahr 2006.

#### **III.5.1.1. Wohnflächen im Jahr 2006**

In Abbildung III.5.1 werden die Wohnflächen des Teilmodells Wohngebäude (otello) im Jahr 2006 und die vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) im Jahr 2007 veröffentlichten Wohnflächen (IWU (2007)) differenziert nach Gebäudetyp (ohne Sonderbauten) und Baualtersklassen gegenübergestellt. Als Wohnfläche wird hierbei die Wohnfläche inkl. unbeheizter Fläche und Leerstand verstanden. Die Wohnflächen der Gebäudetypen und Baualtersklassen wurden strukturell verglichen und weniger bekannte Parameter bei der Transformation der Gebäudetypologien entsprechend angepasst (vgl. Kapitel III.2.1.3). Dennoch verbleiben Abweichungen,

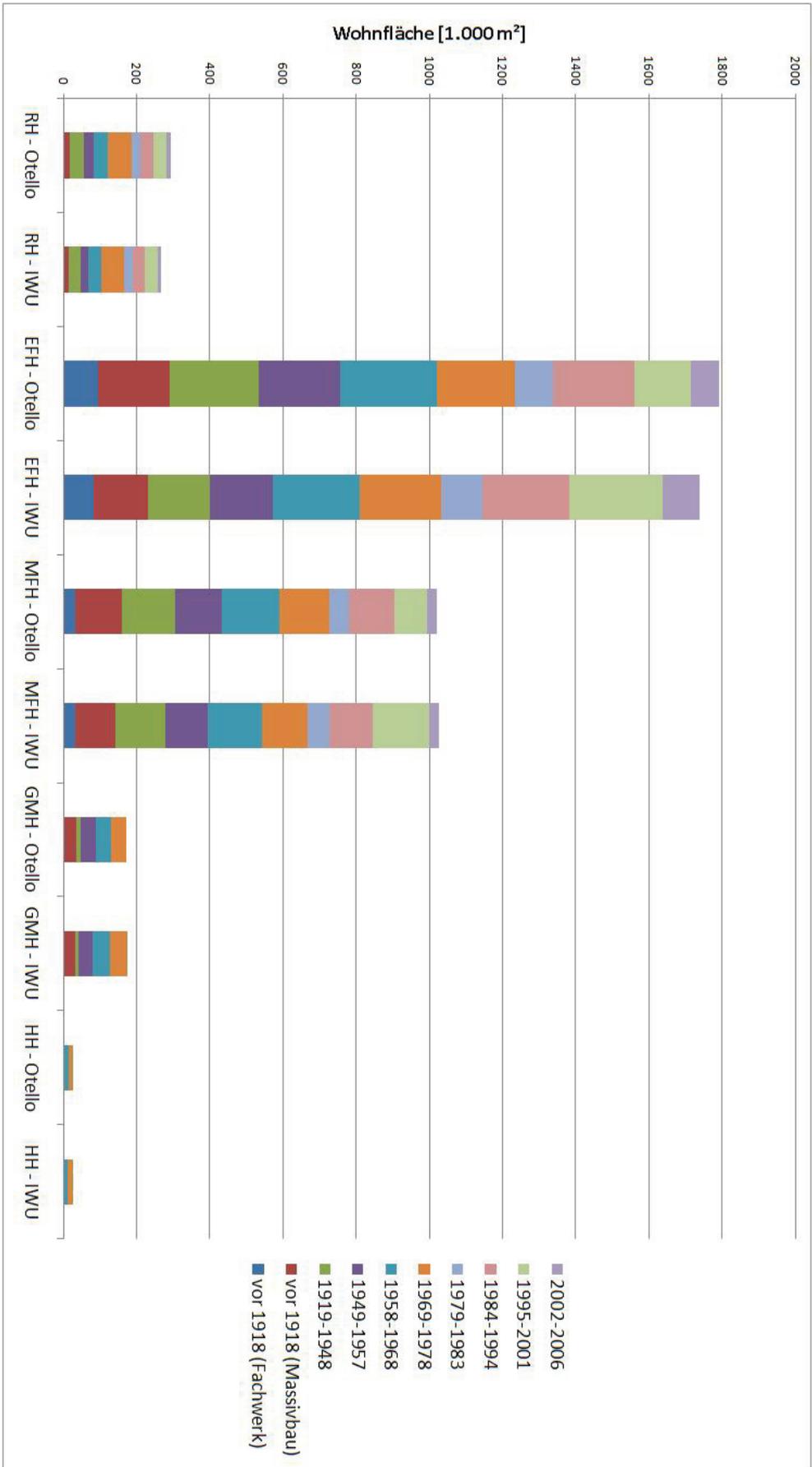


Abb. III.5.1.: Gegenüberstellung der Wohnflächen des Teilmodells Wohngebäude (otello) im Jahr 2006 und der vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) im Jahr 2007 veröffentlichten Wohnflächen differenziert nach Gebäudeart (ohne Sonderbauten) und Baualtersklasse (IWU (2007))

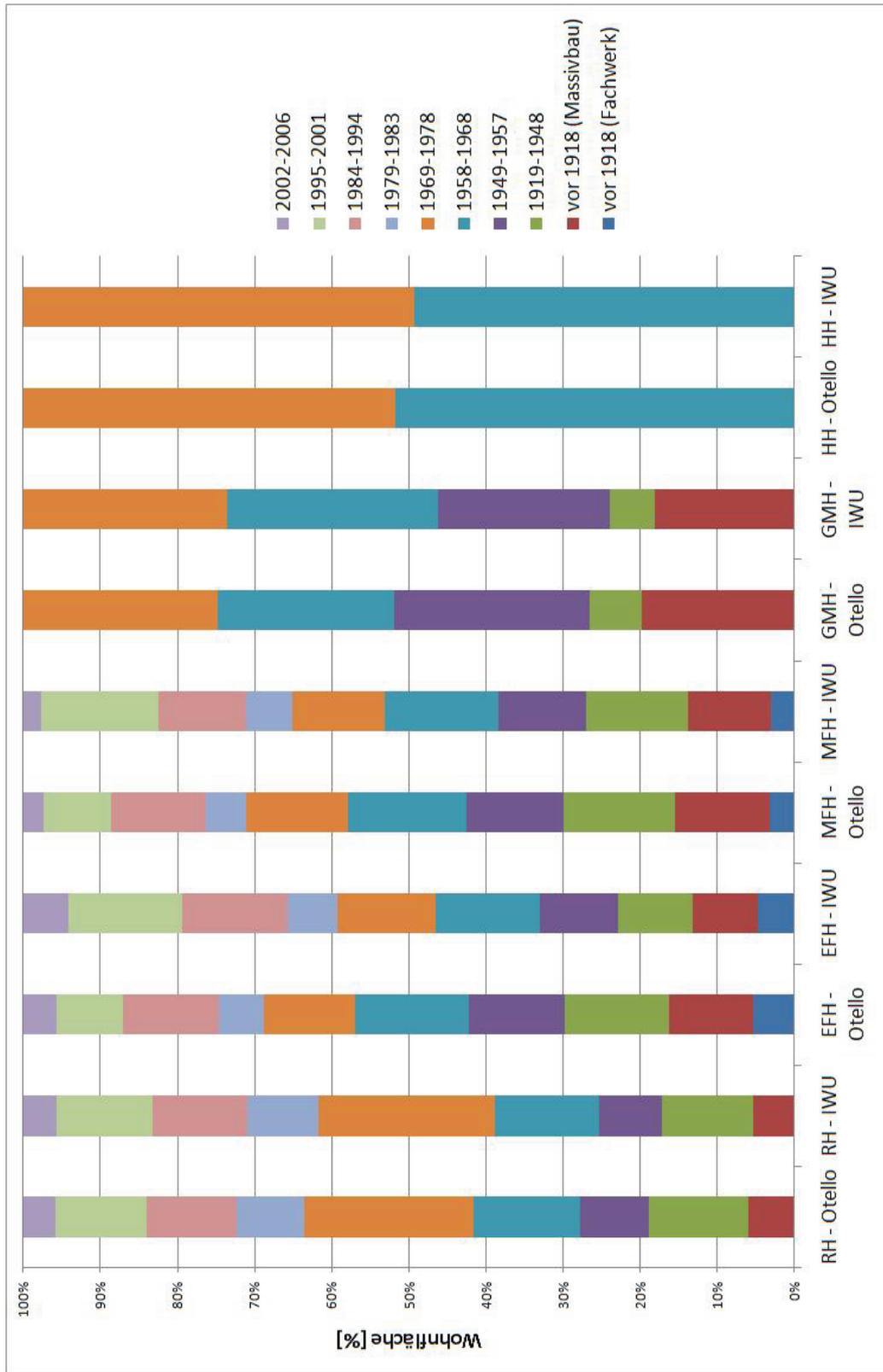


Abb. III.5.2.: Gegenüberstellung der Altersverteilung der Gebäudetypen (ohne Sonderbauten) im Teilmodell Wohngebäude (otello) im Jahr 2006 mit den vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) im Jahr 2007 veröffentlichten Daten (IWU (2007))

da die verwendeten Mikrozensusdaten (Statistisches Bundesamt (2008b)) einerseits eine höhere Gesamtwohnfläche als die Daten vom IWU aufweisen (vgl. Abbildung III.5.1) und andererseits unterschiedliche Wohnflächen innerhalb der jeweiligen Altersklassen ausgewiesen werden (vgl. Abbildung III.5.2).

Nach Abbildung III.5.1 sind EFH gefolgt von MFH die hinsichtlich der Wohnfläche und damit auch hinsichtlich des Energiebedarfs und der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen dominierenden Gebäudetypen. Während RH und GMH ebenfalls nennenswerte Anteile an der Wohnfläche halten, erscheinen HH hier relativ unbedeutend, wobei die Sonderbauten in den neuen Bundesländern (MFH\_NBL, GMH\_NBL, HH\_NBL) hier nicht berücksichtigt sind. Letztere entsprechen jedoch nur 5% der Gesamtwohnfläche in Deutschland (IWU (2007)). Ein Abgleich der Sonderbauten in den neuen Bundesländern ist nicht möglich, da zu den verwendeten Baualtersklassen keine veröffentlichten Daten existieren.

Nach Abbildung III.5.2 wurden RH, EFH und MFH zwischen „vor 1918“ und heute errichtet. Im Gegensatz dazu wurden GMH nur bis 1978 gebaut. Dies gilt gleichermaßen für HH, wobei diese erst mit Baujahren ab 1958 in nennenswertem Umfang anzutreffen sind. Während die Baualtersklassenverteilungen von RH, GMH und HH relativ gut mit den vom IWU veröffentlichten Werten übereinstimmen (IWU (2007)), sind bei den bedeutenderen Wohngebäudetypen EFH und MFH größere Abweichungen festzustellen.

### **III.5.1.2. Endenergiebedarf im Jahr 2006**

In Abbildung III.5.3 werden der im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechnete, nach Energieträgern differenzierte Endenergiebedarf der privaten Haushalte in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser für das Jahr 2006 und die entsprechenden von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) veröffentlichten Werte gegenübergestellt. Es wurden insbesondere die Faktoren für die unbeheizte Wohnfläche in vertretbarem Rahmen angepasst, um das Teilmodell Wohngebäude zu kalibrieren. Der Gesamtendenergiebedarf der privaten Haushalte (exkl. Elektri-

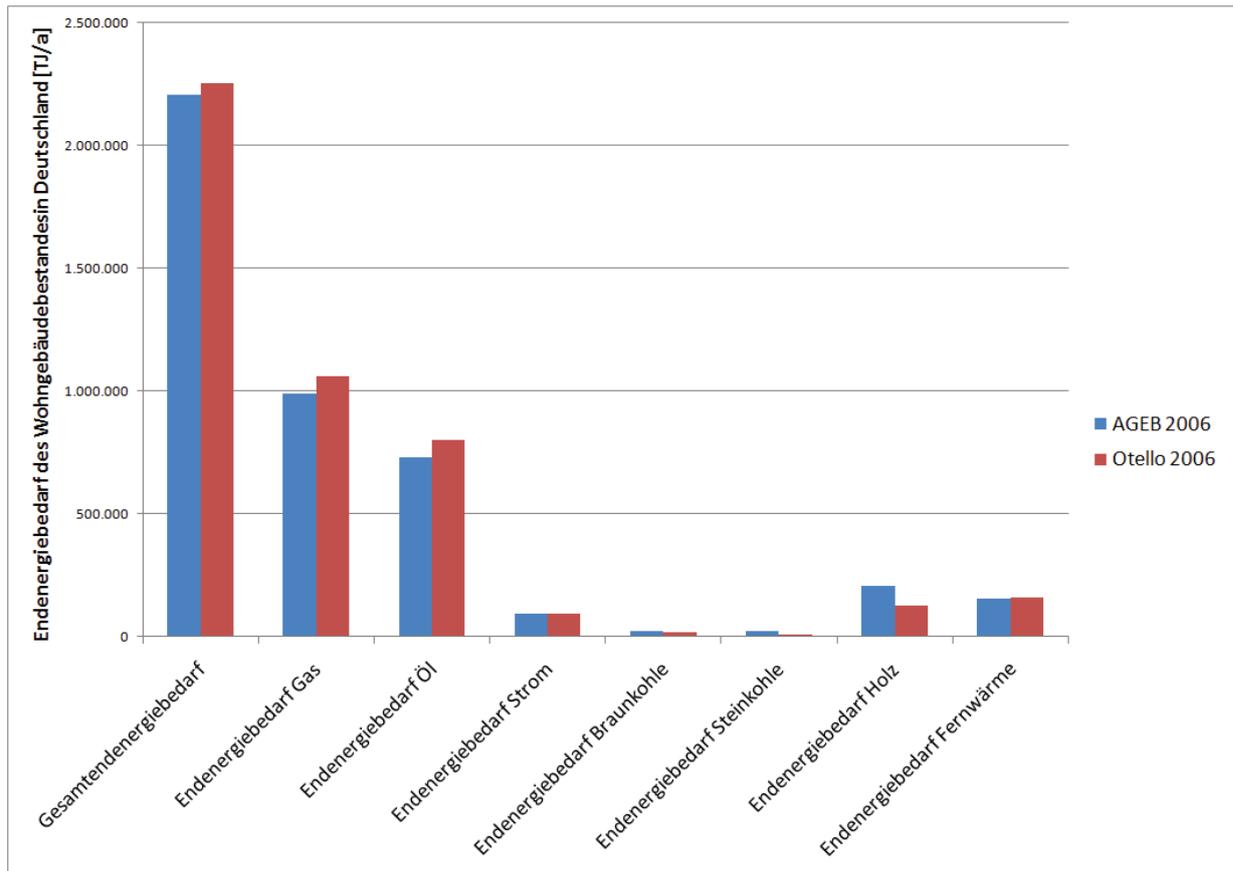


Abb. III.5.3.: Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Energieträgern differenzierten Endenergiebedarfen der privaten Haushalte in Deutschland für Raumwärme sowie Warmwasser für das Jahr 2006 mit den entsprechenden von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) veröffentlichten Werten (AGEB (2010))

azität für Nichtheizzwecke) überschreitet die von der AGEB ausgewiesenen Werte leicht. Es fällt auch auf, dass der Holzenergiebedarf (u. a. erneuerbare Energien) im otello-Modell geringer ausfällt und der Energiebedarf an Gas sowie Öl die von der AGEB ausgegebenen Werte übersteigt. Dies kann unter Anderem damit begründet werden, dass im Modell keine Nebenfeuerstätten und beim Startbestand auch keine bereits vorhandenen solarthermischen Anlagen berücksichtigt werden. Dies liegt daran, dass über den Mikrozensus (Statistisches Bundesamt (2008b)) nur Informationen über die überwiegend verwendeten Energieträger zur Verfügung stehen. Der Einsatz von Kohle erscheint hier vernachlässigbar, ist jedoch aufgrund hoher Emissionsfaktoren und lokaler Konzentration der Feuerstätten hinsichtlich der Luftreinhaltung von großer Bedeutung.

### III.5.1.3. Heizwärmebedarf im Jahr 2006

In Abbildung III.5.4, Abbildung III.5.5, Abbildung III.5.6 und Abbildung III.5.7 werden der im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechnete, nach Baualtersklassen differenzierte spezifische Heizwärmebedarf für RH und EFH im Jahr 2006 den von Weiß und Dunkelberg (2010) veröffentlichten Werten gegenübergestellt. Die Gruppe der EFH und ZFH bei Weiß und Dunkelberg (2010) entspricht der Gruppe der RH und EFH im Modell. Durchgehend weisen RH einen niedrigeren spezifischen Heizwärmebedarf auf als die EFH der entsprechenden Altersklasse. Dies kann man insbesondere durch die Anbausituation erklären. Eine Berechnung der aggregierten Werte würde aufgrund des geringen Flächenanteils der Reihenhäuser (vgl. Abbildung III.5.1) durch die EFH-Werte dominiert werden. Dies bedeutet, dass die Vergleichswerte von Weiß und Dunkelberg (2010) für die Baualtersklassen bis 1994 niedriger sind, obwohl sie zumindest für die Baualtersklassen bis 1968 und 1979-1994 innerhalb der Schwankungsbreite von RH und EFH liegen. Dies lässt sich allerdings dadurch begründen, dass Weiß und Dunkelberg (2010) selbst darauf hinweisen, dass ihre Stichprobe nicht repräsentativ ist und bei älteren Gebäuden höhere Sanierungsraten und damit einen niedrigeren Heizwärmebedarf aufweist.

Nach Abbildung III.5.4 sinkt der spezifische Heizwärmebedarf der RH und EFH mit Baujahr vor 1968 jeweils mit steigendem Baujahr. Die Fachwerks-EFH mit Baujahr vor 1918 weisen hier auffälligerweise insbesondere aufgrund der kompakteren Bauweise des verwendeten Typvertreter im Vergleich zum Massivbau einen niedrigeren spezifischen Heizwärmebedarf auf. (IWU (2005))

Nach Abbildung III.5.6 steigt der spezifische Energiebedarf für EFH beim Übergang von der Baualtersklasse 1979-1983 zur Baualtersklasse 1984-1994. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Wärmeschutzverordnung von 1982 erst wieder 1995, d. h. nach 13 Jahren, verschärft wurde und zudem der verwendete ältere Typvertreter kompakter gebaut war. (IWU (2005))

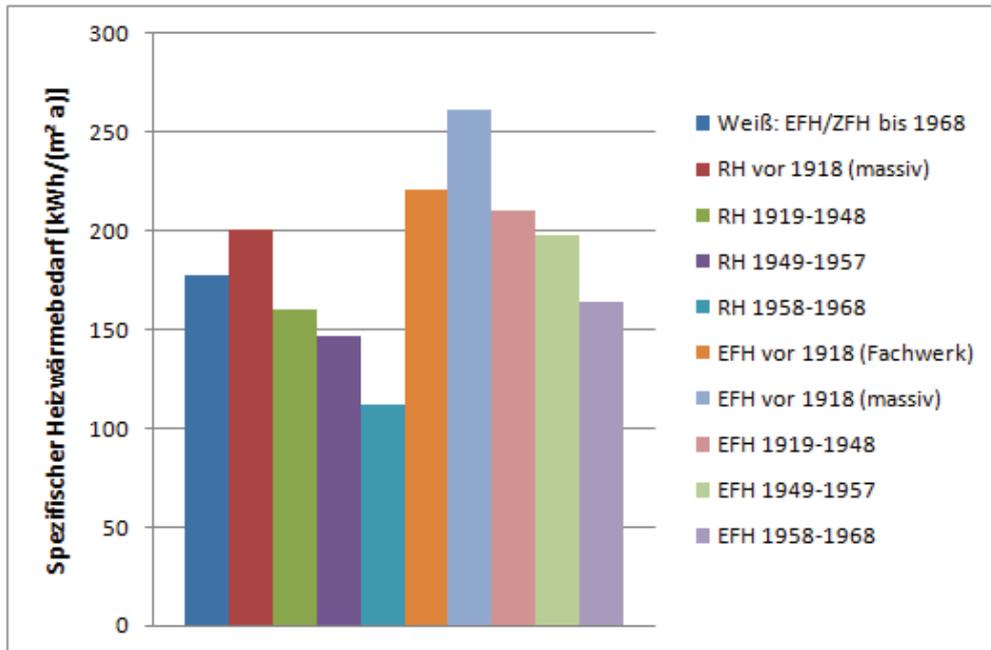


Abb. III.5.4.: Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Baualtersklassen (bis 1968) differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH im Jahr 2006 mit den entsprechenden von Weiß und Dunkelberg (2010) veröffentlichten Werten

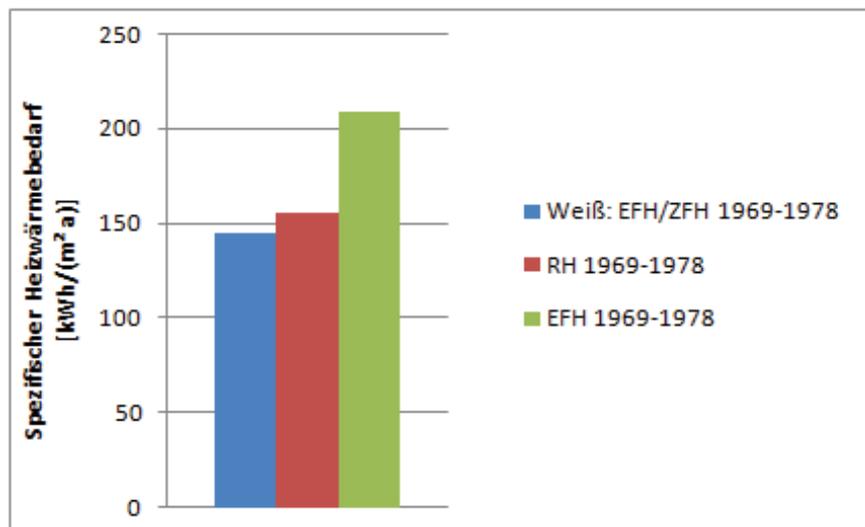


Abb. III.5.5.: Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH der Baualtersklasse 1969-1978 im Jahr 2006 mit dem entsprechenden von Weiß und Dunkelberg (2010) veröffentlichten Wert

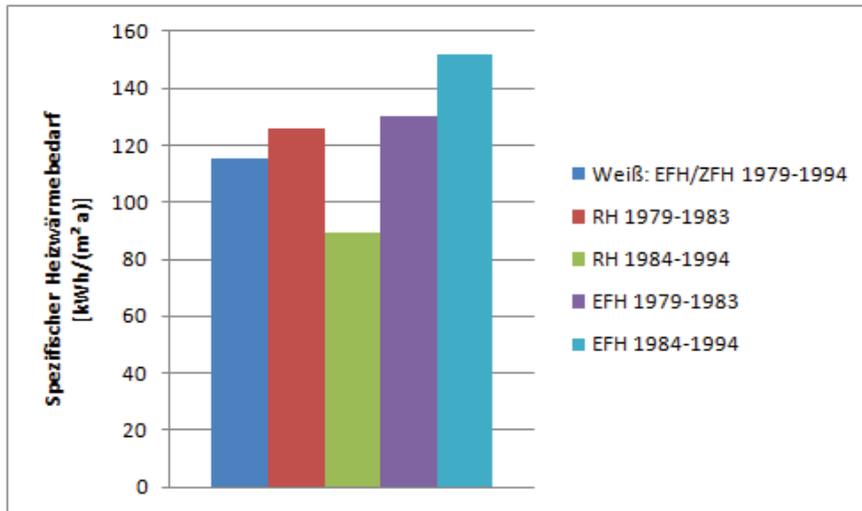


Abb. III.5.6.: Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Baualtersklassen (zwischen 1979 und 1994) differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH im Jahr 2006 mit den entsprechenden von Weiß und Dunkelberg (2010) veröffentlichten Werten

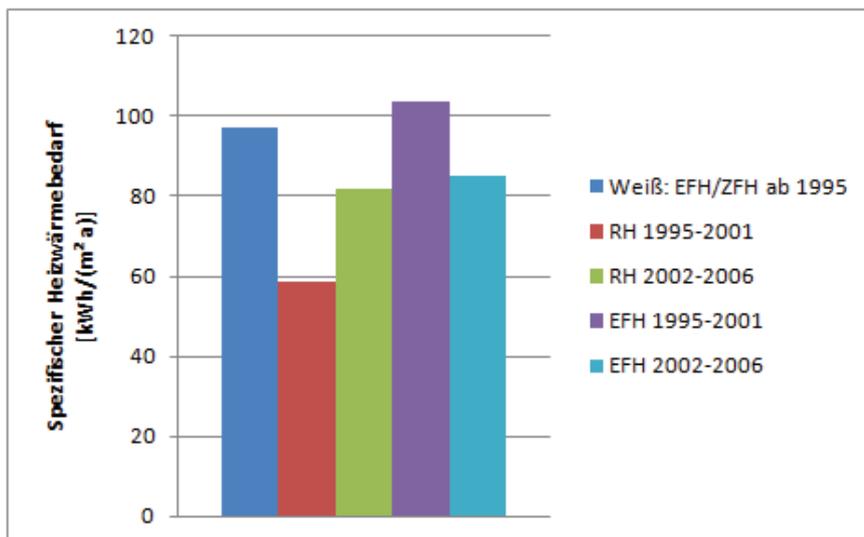


Abb. III.5.7.: Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Baualtersklassen (zwischen 1995 und 2006) differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH im Jahr 2006 mit den entsprechenden von Weiß und Dunkelberg (2010) veröffentlichten Werten

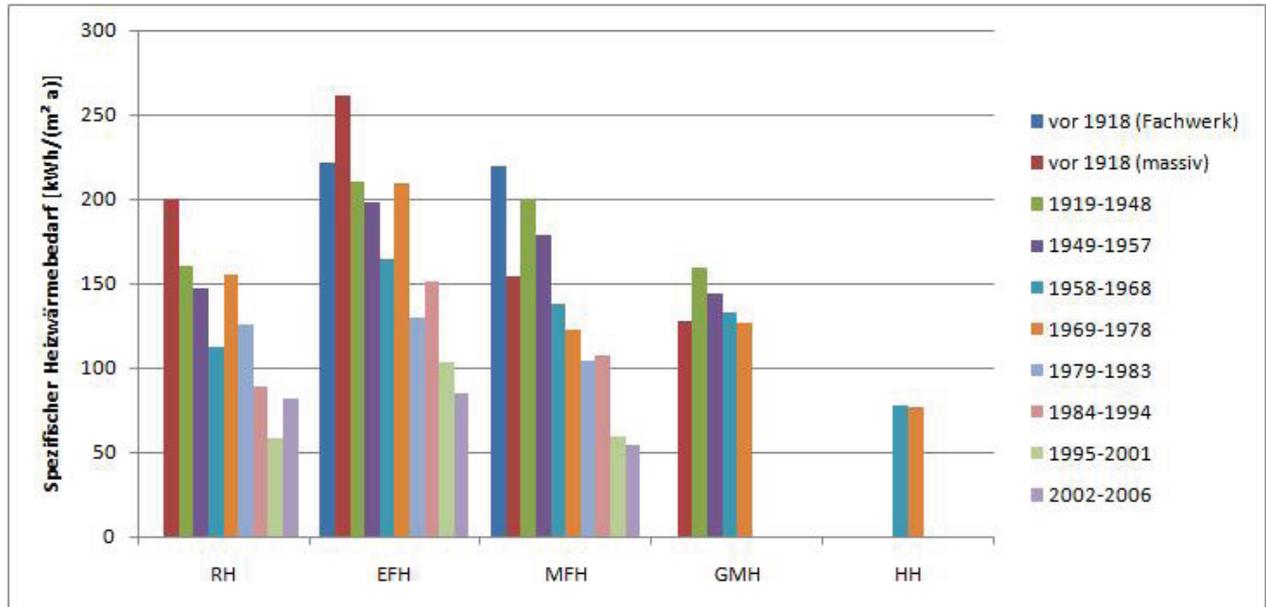


Abb. III.5.8.: Im Teilmodell Wohngebäude berechnete spezifische Heizwärmebedarfe für das Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetypen (ohne Sonderbauten in den neuen Bundesländern) und Baualtersklassen

Für die EFH ab 1995 stimmen die Heizwärmebedarfe von Weiß und Dunkelberg (2010) relativ gut mit denen im Teilmodell Wohngebäude überein, da diese Baualtersklasse vermutlich auch bei der Stichprobe von Weiß und Dunkelberg (2010) noch keine energetische Sanierung der Gebäudehülle durchlaufen hat. Der starke Anstieg des Heizwärmebedarfs für die RH beim Übergang von der Baualtersklasse 1995-2001 auf die Baualtersklasse 2002-2006 lässt sich mit dem Wechsel von einem zweiseitig angebauten Typvertreter mit unbeheiztem Keller zu einem einseitig angebauten Typvertreter mit teilweise beheiztem Keller zumindest erklären. (IWU (2005))

In Abbildung III.5.8 ist der im Teilmodell Wohngebäude berechnete spezifische Heizwärmebedarf für das Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetypen (ohne Sonderbauten in den neuen Bundesländern) und Baualtersklassen dargestellt. Prinzipiell sinkt der Heizwärmebedarf jedes Gebäudetyps mit zunehmender Baualtersklasse. Im Gegensatz zu den Abweichungen bei den EFH, die sich auf Unterschiede bei der Kompaktheit der zugrundegelegten Typvertreter des IWU-Modells zurückführen lassen, ist der Heizwärmebedarf der massiv gebauten MFH aufgrund einer Gebäudehülle mit niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizienten niedriger als der-

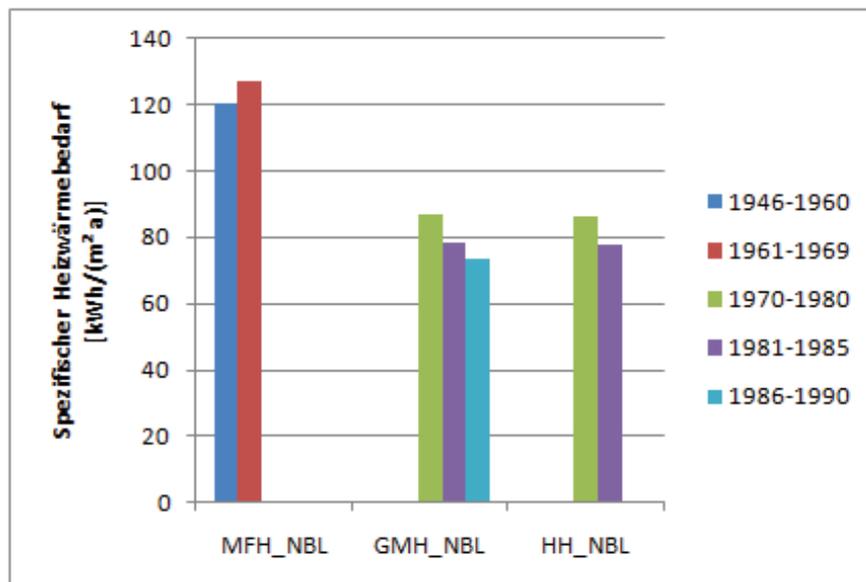


Abb. III.5.9.: Im Teilmodell Wohngebäude berechnete spezifische Heizwärmebedarfe der Sonderbauten in den neuen Bundesländern für das Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetypen und Baualtersklassen

jenige der entsprechenden Fachwerksbauten. Der Anstieg des Heizwärmebedarfs bei MFH und GMH von der Baualtersklasse vor 1918 zur Baualtersklasse 1919-1948 ist auf einen Wechsel der Anbausituation der Typvertreter der Gebäude zurückzuführen, d. h. von zweiseitig auf einseitig angebaut (GMH) bzw. freistehend (MFH). Bei einem im Szenario Basis unterstellten Sanierungszyklus von 40 Jahren für die Gebäudehülle wurde dieser von den Baualtersklassen bis 1968 zumindest teilweise bereits durchlaufen, was den im Vergleich recht hohen spezifischen Heizwärmebedarf der Baualtersklasse 1969-1978 bei den RH und EFH erklärt. Die folgenden Baualtersklassen weisen aufgrund der ersten Wärmeschutzverordnung (WSchV 78) bereits ohne Sanierung einen relativ niedrigen Heizwärmebedarf auf.

In Abbildung III.5.9 sind die im Modell berechneten spezifischen Heizwärmebedarfe der Sonderbauten in den neuen Bundesländern für das Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetypen und Baualtersklassen dargestellt. Die Sonderbauten in den neuen Bundesländern wurden zu großen Teilen bereits im Rahmen eines Sondersanierungsprogramms von 1995-2005 energetisch modernisiert (vgl. Kapitel III.2.1.5) und weisen daher einen ähnlichen spezifischen Heizwärmebedarf auf. Aufgrund der kompakteren Bauweise von GMH und HH im Vergleich zu MFH weisen letztere einen höheren Heizwärmebedarf auf.

#### **III.5.1.4. Emissionen an Luftschadstoffen und Treibhausgasen im Jahr 2006**

In Abbildung III.5.10 werden die im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten direkten verbrennungsbedingten Emissionen an Luftschadstoffen und Treibhausgasen der Wohngebäude in Deutschland im Jahr 2006 den vom Umweltbundesamt veröffentlichten Werten aus dem Emissionsinventar (Umweltbundesamt (2010)) gegenübergestellt. Da das Teilmodell Wohngebäude im Gegensatz zum Emissionsinventar 2006 keine Nebenfeuerstätten berücksichtigt, werden die Gesamtemissionen an VOC, CH<sub>4</sub>, NMVOC und PM vom Teilmodell Wohngebäude unterschätzt. Zur Plausibilisierung wurden zusätzlich die im Teilmodell Wohngebäude berechneten Emissionen zuzüglich der Emissionen aus Dauerbrandöfen, Kachelöfen, Kaminen, Kaminöfen und Pelletöfen dargestellt (Struschka u. a. (2008)). Diese werden zu einem großen Teil als Nebenfeuerstätte, teilweise allerdings auch als Hauptfeuerstätte genutzt. Während die Emissionen an CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> mit und ohne die Korrektur akzeptabel getroffen werden, liegen die Emissionen an VOC, CH<sub>4</sub>, NMVOC und PM gemäß dem Emissionsinventar des Umweltbundesamtes zumindest zwischen den im Teilmodell Wohngebäude berechneten Emissionen mit und ohne Nebenfeuerstättenkorrektur.

#### **III.5.1.5. Anteil energetisch sanierter Gebäude im Jahr 2006**

In Abbildung III.5.11 werden die im Teilmodell Wohngebäude berechneten Anteile energetisch sanierter Gebäude(hüllen) im Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetyp sowie energetisch saniertem Gebäudehüllenelement und die von Diefenbach und Enseling (2007) und Kretschmer (2006) veröffentlichten Werte gegenübergestellt. Unter energetischer Sanierung wird im Teilmodell Wohngebäude hierbei verstanden, dass nachträglich Bauteile mit besseren energetischen Eigenschaften als im Urzustand des Gebäudes verbaut wurden. Die bauteilspezifischen Daten werden hier lediglich zu einer sehr groben Plausibilisierung nichtbauteilspezifischer

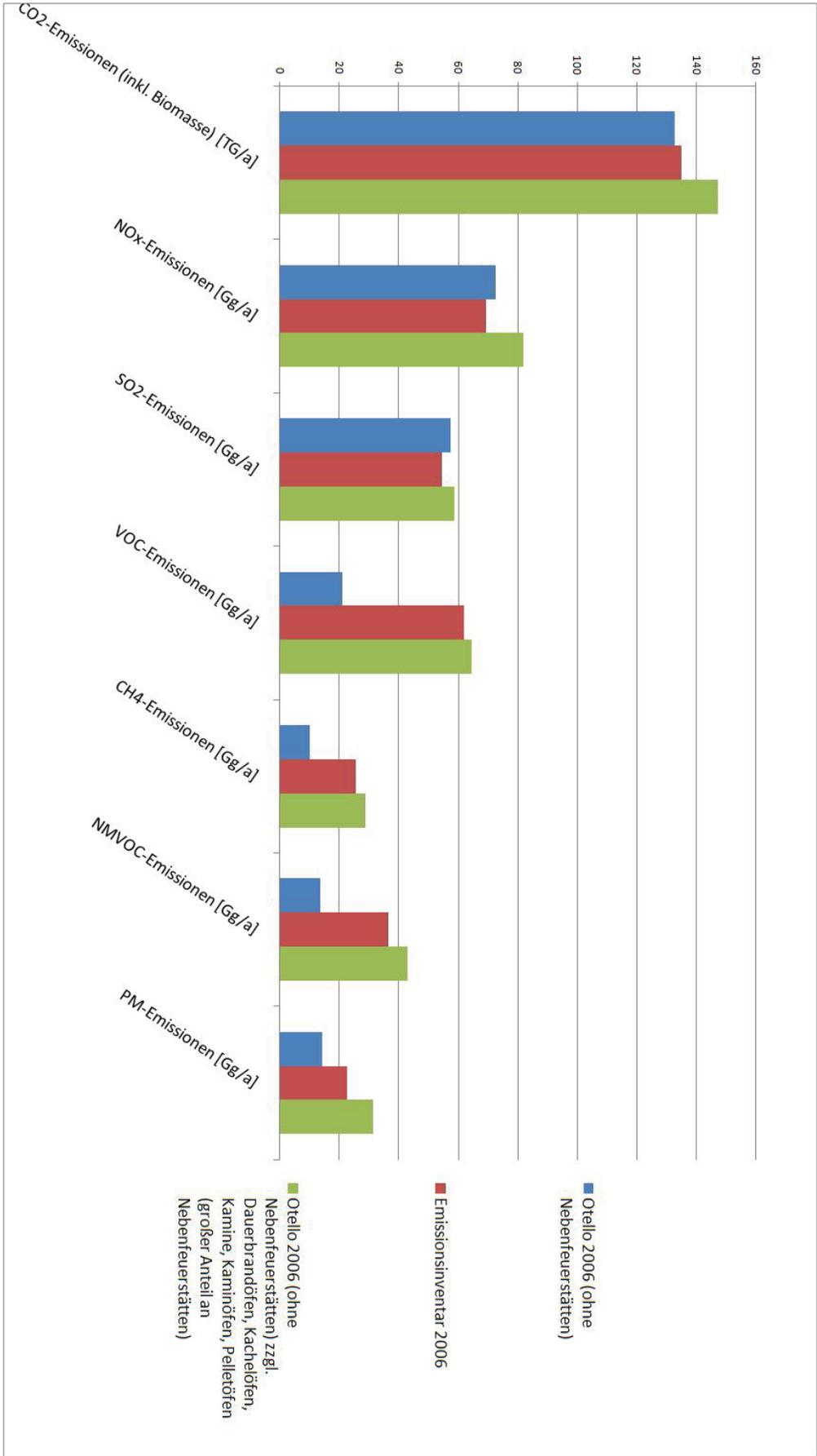


Abb. III.5.10.: Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten direkten verbrennungsbedingten Emissionen an Luftschadstoffen und Treibhausgasen der Wohngebäude in Deutschland im Jahr 2006 mit den vom Umweltbundesamt veröffentlichten Werten (Struschka u. a. (2008); Umweltbundesamt (2010))

schen aggregierten Daten gegenübergestellt. Hierzu wurden einerseits Daten zum hessischen Gebäudebestand von Diefenbach und Enseling (2007) herangezogen, bei dem ein „Wärmeschutz nach Altbau-Anforderungen der EnEV für die gesamte Gebäudehülle“ von 20% angenommen wird. Andererseits wurde für die energetisch sanierten Sonderbauten in den neuen Bundesländern von Kretschmer (2006) ein Anteil von 40% herangezogen. Die exogen gegebenen Daten bewegen sich bei allen Gebäudetypen innerhalb der Spanne zwischen den Anteilen der Gebäude mit nachträglicher Außenwanddämmung und denen mit nachträglicher Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses.

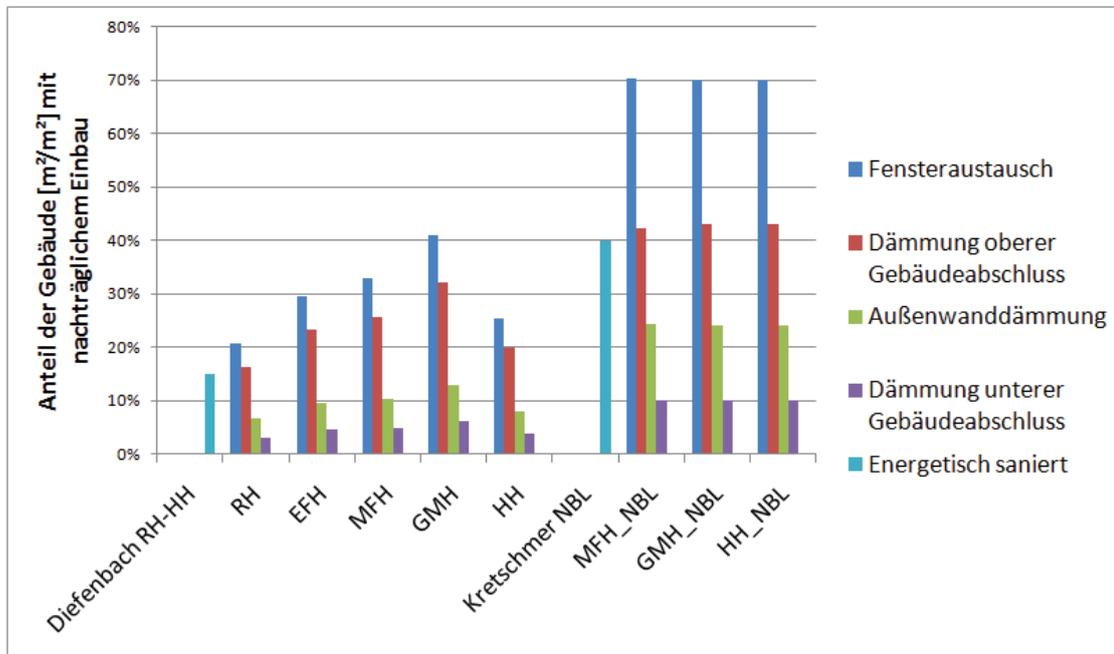


Abb. III.5.11.: Gegenüberstellung des im Teilmodell Wohngebäude berechneten Anteils energetisch sanierter Gebäude(hüllen) im Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetyp sowie energetisch saniertem Gebäudehüllenelement und der von Diefenbach und Enseling (2007) (Referenz RH-HH) und Kretschmer (2006) (Referenz NBL) veröffentlichten Werte

### III.5.2. Kalibrierung der Wohngebäudebestandsveränderung

Um die Annahmen, die für die Quantifizierung der Veränderung des Wohngebäudebestandes notwendig waren, zumindest zu plausibilisieren, werden bestimmte Größen, die aus diesen im Teilmodell Wohngebäude rechnerisch folgen, mit ander-

weitig verfügbaren Daten abgeglichen. Zu diesen Größen zählen die Entwicklung des Wohnflächenbestandes und des Endenergiebedarfs sowie die Höhe der energetischen Sanierungsraten und der jährlichen Investitionen in die Gebäudehülle und die Anlagentechnik bzw. das zugehörige Fördervolumen.

### **III.5.2.1. Entwicklung des Wohnflächenbestandes**

In Abbildung III.5.12 werden der im Teilmodell Wohngebäude prognostizierte Wohnflächenbestand, die in der Raumordnungsprognose prognostizierte Wohnflächennachfrage (BBSR (2006)) und der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesene Wohnflächenbestand (Statistisches Bundesamt (2006–2010)) gegenübergestellt. Da der Bestand auch die leerstehende Wohnfläche beinhaltet, übersteigt er die Wohnflächennachfrage, die in der Raumordnungsprognose ausgewiesen wird. Die hinsichtlich Neubau und Abriss getroffenen Annahmen führten zu einer leicht steigenden Leerstandsquote im Modell, wenn die in der Raumordnungsprognose ausgewiesene Wohnflächennachfrage unterstellt wird. Da aber im Modell über die Zeit konstante Leerstandsquoten angenommen werden, wird implizit eine höhere Wohnflächennachfrage als in der Raumordnungsprognose unterstellt. Alternativ könnte auch eine höhere Abrissrate angesetzt werden, um mit der Raumordnungsprognose in Einklang zu stehen.

### **III.5.2.2. Entwicklung des Endenergiebedarfs**

In Abbildung III.5.13 wird der im Teilmodell Wohngebäude prognostizierte Endenergiebedarf der privaten Haushalte für Raumheizung und Warmwasser in Deutschland den vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlichten Werten (Oeko-Institut u. a. (2009)) gegenübergestellt. Hierzu wurde neben dem Szenario *Basis* das Szenario *Ökoschnellmodernisierer* herangezogen, um die Bandbreite der erreichbaren Energieeinsparungen zu plausibilisieren. Die beiden UBA-Szenarios entsprechen ebenfalls einem konservativen Szenario und einem Extremszenario.

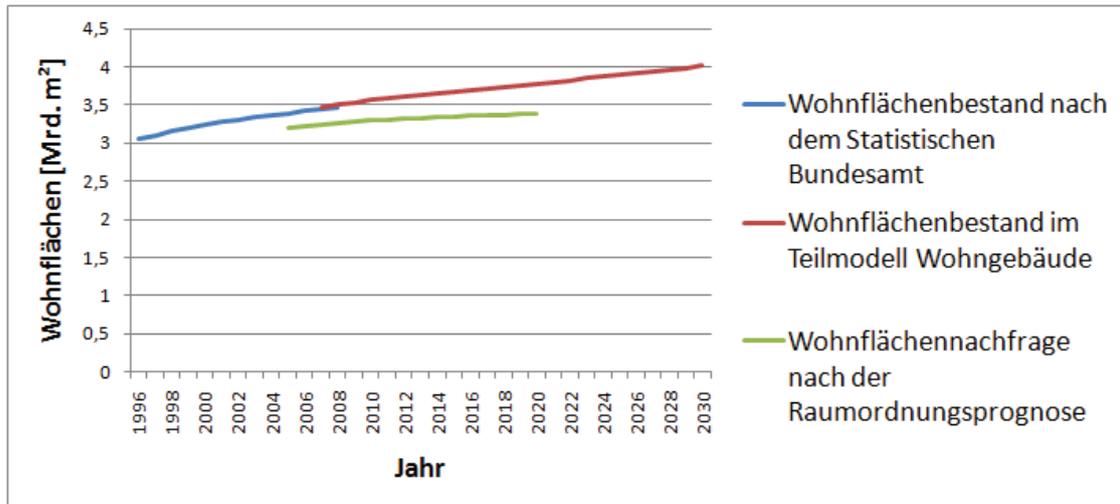


Abb. III.5.12.: Gegenüberstellung von dem im Teilmodell Wohngebäude prognostizierten Wohnflächenbestand mit der in der Raumordnungsprognose prognostizierten Wohnflächennachfrage (BBSR (2006)) und dem vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen Wohnflächenbestand (Statistisches Bundesamt (2006–2010))

### III.5.2.3. Höhe der energetischen Sanierungsrate

Im Teilmodell Wohngebäude ergibt sich für das Szenario *Basis* eine jährliche energetische Vollsanierungsrate von ca. 1% der Gesamtwohnfläche. Unter der energetischen Vollsanierungsrate wird hierbei der Anteil der Gebäude am Gesamtbestand [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ] verstanden, bei dem jährlich die Gebäudehülle und die Anlagentechnik energetisch modernisiert werden. Bei einer angenommenen Lebensdauer von 40 Jahren für die Gebäudehülle und der Annahme einer Gleichverteilung der Baualtersklassen entspräche die theoretische jährliche energetische Vollsanierungsrate 2,5%. Kleemann und Hansen (2005) nennen eine jährliche energetische Sanierungsrate von 1,3% und Diefenbach und Enseling (2007) für Hessen eine (statistische) Vollsanierungsrate von 0,75%. Auch wenn selbst die Definition der Sanierungsraten nicht vollständig vergleichbar ist, so erscheint die Sanierungsrate des Teilmodells Wohngebäude zumindest plausibel. Als Kritikpunkt bleibt hervorzuheben, dass das Verhältnis der energetischen Sanierungsrate zur theoretischen energetischen Sanierungsrate beim Teilmodell Wohngebäude auf die Anlagentechnik übertragen wird, bei der dieses tendenziell höher ist.

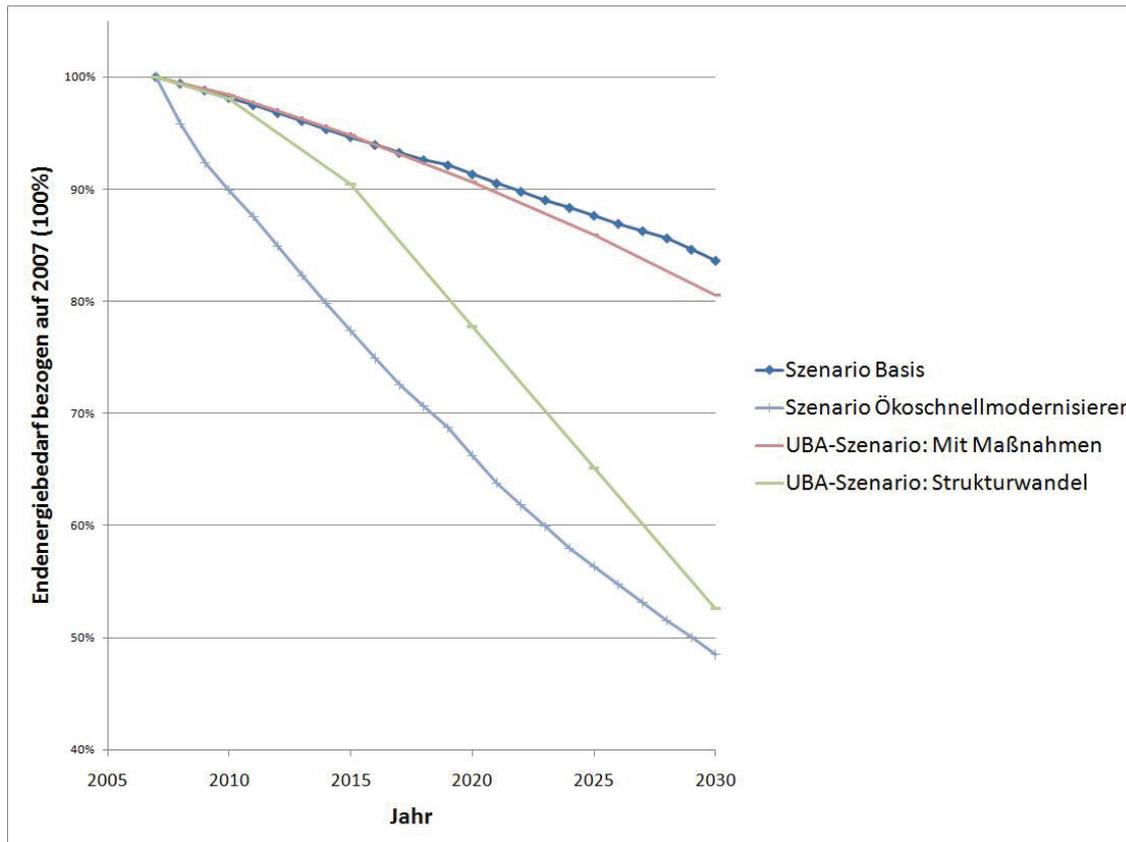


Abb. III.5.13.: Gegenüberstellung des im Teilmodell Wohngebäude prognostizierten Endenergiebedarfs der privaten Haushalte für Raumheizung und Warmwasser in Deutschland mit den vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlichten Werten (Oeko-Institut u. a. (2009))

### III.5.2.4. Jährliche Investitionen und Fördervolumina

Die jährlichen Investitionen in den Neubau umfassen gemäß dem Teilmodell Wohngebäude im Jahr 2007 insgesamt 40 Mrd. EUR, die sich aus 2 Mrd. EUR für Dämmstoffe, 3 Mrd. EUR für Fenster und Türen sowie 31 Mrd. EUR für Baustoffe zusammensetzen (u.a. Kostengruppen 330 bis 360 nach DIN 276) und 4 Mrd. EUR für Wärmeversorgungsanlagen (Kostengruppe 420). Laut dem Statistischen Bundesamt wurden im Jahr 2007 nur 27 Mrd. EUR in neue Wohngebäude investiert (Statistisches Bundesamt (2011)) und damit 33% weniger als im Modell. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anzahl der laut Statistischem Bundesamt errichteten Wohngebäude die in der Raumordnungsprognose (BBSR (2006)) prognostizierte und im Teilmodell Wohngebäude verwendete um ca. 25% unterschreitet. Der Einbruch kann auf die Finanzkrise und den Wegfall der Eigenheimzulage zurückgeführt werden.

Die jährlichen Investitionen in den Gebäudebestand umfassten im Jahr 2007 laut dem Teilmodell Wohngebäude insgesamt 12 Mrd. EUR, davon 3 Mrd. EUR für die Dämmung des oberen und des unteren Gebäudeabschlusses sowie der Außenwände, 2 Mrd. EUR für die Fenster und 7 Mrd. EUR für die Anlagentechnik. Zum Vergleich betrug das Gesamtvolumen des Modernisierungsmarktes für Wohngebäude im Jahr 2004 laut einer Marktforschungsstudie 2 Mrd. EUR für Wärmedämmungen und 8 Mrd. EUR für die Anlagentechnik (Heinze GmbH (2005)). Die jährlichen Fördervolumen (als Investitionszuschüsse) bzgl. der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden umfassen im Teilmodell Wohngebäude 0,5 Mrd. EUR für die Gebäudehülle und 0,3 Mrd. EUR für die Anlagentechnik. Die Finanzmittel des Bundes für das CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm lagen im Jahr 2007 bei 0,85 Mrd. EUR und die für das nicht auf Wohngebäude beschränkte Marktanzreizprogramm Erneuerbare Energien bei ca. 0,2 Mrd. EUR (geschätzt) (Oeko-Institut u. a. (2009)). Diese werden folglich im Modell leicht unterschätzt.



## **III.6. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion**

In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse des Teilmodells Wohngebäude diskutiert. Während die Gesamtwohnfläche in Deutschland im Teilmodell Wohngebäude von 2006 bis 2030 um 15% steigt, variieren die Zuwachsraten der einzelnen Bundesländer zwischen 2% für Sachsen und Sachsen-Anhalt und bis zu 21% bzw. 23% für Baden-Württemberg und Bayern. In Kapitel III.6.1 wird zunächst auf den aktuellen und zukünftigen Endenergiebedarf der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser eingegangen, bevor in Kapitel III.6.2 die Veränderung der Emissionen an Luftschadstoffen und Treibhausgasen näher betrachtet wird. Anteile der Gebäudehüllenvarianten bei der Sanierung werden in detaillierterer Form in Kapitel III.6.3 diskutiert, bevor abschließend ökonomische Größen wie Investitionen und Fördervolumina in Kapitel III.6.4 angegeben werden.

### **III.6.1. Aktueller Endenergiebedarf und dessen Entwicklung**

Im Folgenden wird zunächst auf die aktuelle Energieträgerverteilung hinsichtlich der Raumheizung und Warmwasserbereitung eingegangen. Diese liefert wertvolle Einsichten in Bezug auf die aktuelle Emissionssituation. Nach Abbildung III.5.3 sind Gas und Heizöl in Deutschland die dominierenden Energieträger für die Bereitstellung von Endenergie für Raumheizung und Warmwasserbereitung durch die privaten Haushalte. In Abbildung III.6.1 wird für das Jahr 2007 die räumliche Verteilung der Anteile dieser beiden Energieträger hinsichtlich der Wärmeversorgung der Wohngebäude visualisiert. Es wird ersichtlich, dass in größeren Städten der Anteil von Heizöl am Endenergiebedarf 20-30% nicht übersteigt, während der Gasanteil dort meist 40% überschreitet. Die Verwendung von Heizöl ist aber auch

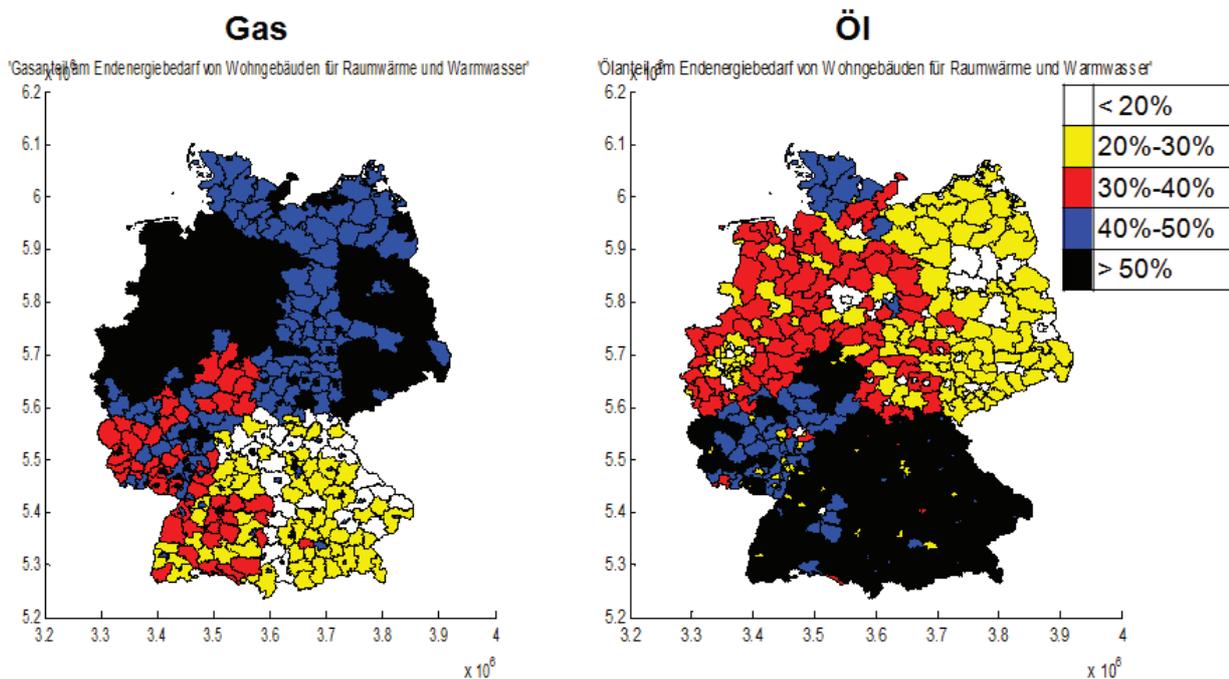


Abb. III.6.1.: Räumliche Verteilung der Anteile [kWh/kWh] von Gas und Heizöl am Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Wohngebäudebestand in Deutschland für das Jahr 2007

in größeren Städten nicht zu vernachlässigen. Allgemein ist in Abbildung III.6.1 die Konkurrenz von Gas und Heizöl gut zu erkennen. Abgesehen von den größeren Städten ist Süddeutschland mit Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz, Hessen und dem Saarland, allerdings auch Schleswig-Holstein, stark vom Heizöl und weniger stark vom Gas abhängig. Insbesondere Bayern weist in ländlicheren Gebieten Gasanteile von unter 20% auf. Als Spiegelbild zum Süden dominiert in den nördlicheren und nordöstlicheren Bundesländern die Versorgung mit Gas.

In Abbildung III.6.2 werden für das Jahr 2007 die entsprechenden Anteile von Kohle (Briketts, Braunkohle, Koks oder Steinkohle) und Fernwärme dargestellt. Man erkennt, dass die Verwendung von Kohle in den neuen Bundesländern mit überwiegend 3% bis sogar über 6% stärker als in den alten Bundesländern ins Gewicht fällt, in denen zumindest in Teilen von Nordrhein-Westfalen Anteile von 1 bis 3%, im Saarland sogar bis 6% erreicht werden. Insbesondere in den neuen Bundesländern und Hamburg ist die Fernwärmeversorgung mit über 30% am Endenergiebedarf in den größeren Städten stark ausgeprägt. Hervorzuheben sind

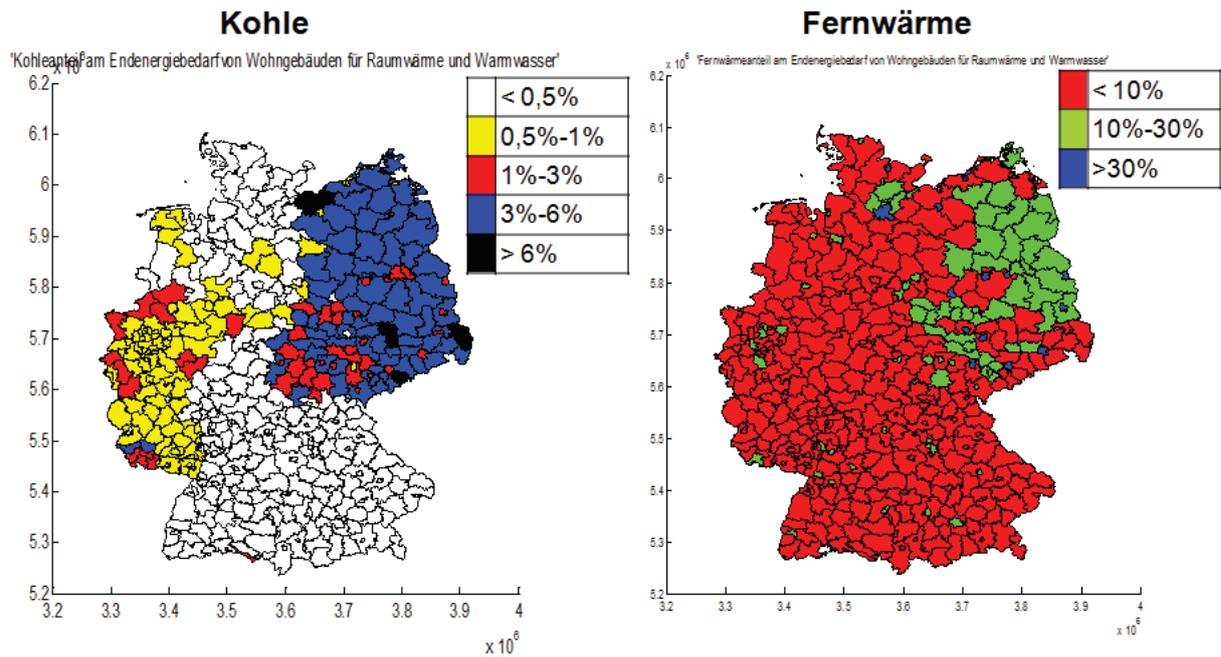


Abb. III.6.2.: Räumliche Verteilung der Anteile [kWh/kWh] von Kohle (Briketts oder Braunkohle, Koks oder Steinkohle) und Fernwärme am Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Wohngebäudebestand in Deutschland für das Jahr 2007

bezüglich der Fernwärme mit einem Anteil von 10-30% auch Teile des Ruhrgebiets sowie einzelne Städte in den alten Bundesländern wie bspw. München, Saarbrücken, Bremen, Karlsruhe und Freiburg.

Die Reduzierung des Endenergiebedarfs von 2007 bis 2030 variiert zwischen 16% im Szenario *Basis* und 50% im Szenario *Ökoschnellmodernisierer*. Die Szenarios *Ohne Förderung* und *Erhöhte Förderung* verdeutlichen mit einer Gesamt-reduktion von 16% und 17%, dass die Auswirkungen der finanziellen Förderinstrumente bei dem gewählten Modellierungsansatz gering sind. Einerseits zeigen die Szenarios *Stufenweises Recht* und *Strenges Recht*, dass eine reine Verschärfung der Mindestanforderungen an Gebäudehülle und Anlagentechnik nur zu einer Verminderung des Endenergiebedarfs um 21% bzw. 23% führen, da weiterhin viele Gebäudeeigentümer überhaupt nicht energetisch sanieren. Andererseits veranschaulicht das Szenario *Mindestmaßsanierer*, dass auch der Effekt des strikten Vollzugs der gegenwärtigen Mindestanforderungen auf eine Reduzierung von 26% beschränkt ist. Das beachtliche Minderungspotenzial einer Kombination der Verschärfung ordnungsrechtlicher Instrumente sowie deren Vollzug zeigt mit 38% das

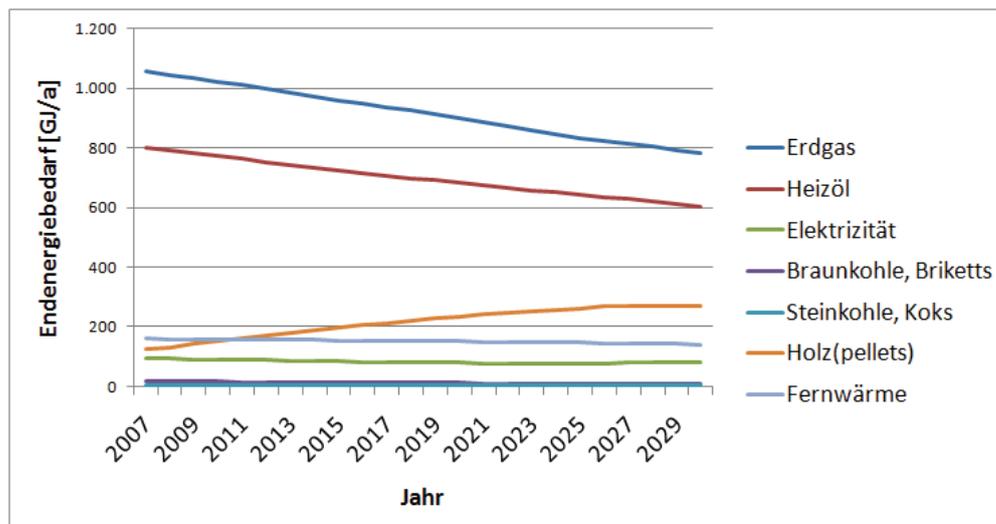


Abb. III.6.3.: Entwicklung des Endenergiebedarfs der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 differenziert nach Endenergieträgern im Szenario *Basis*

*Szenario Ambitionierter Vollzug.* Das Szenario *Ökonom* verdeutlicht, dass bei konstanten Energiepreiserwartungen zum Zeitpunkt der Sanierungsentscheidung ein wirtschaftliches Minderungspotenzial von 32% besteht. Würde zum Zeitpunkt der Sanierungsentscheidung nicht von konstanten Energiepreisen ausgegangen, so fiel dieses voraussichtlich noch höher aus. Das Extremszenario *Ökomodernisierer* bewirkt eine Reduktion um insgesamt 39% und ist von der Endenergieeinsparung mit dem Szenario *Ambitionierter Vollzug* vergleichbar. Die Verkürzung der Sanierungszyklen im Szenario *Ökoschnellmodernisierer* ermöglicht eine zusätzliche Verminderung um 12%, die ausschließlich durch eine verstärkte Sanierungsaktivität an der Gebäudehülle verursacht wird, da sämtliche Anlagentechnik bis 2030 bereits im Szenario *Ökomodernisierer* ersetzt wurde. Alles in allem zeigen die Ergebnisse, dass Informationskampagnen zur Erhöhung des Umweltbewusstseins und zur Förderung wirtschaftlichen Verhaltens hinsichtlich der Endenergiebedarfsminderung vielversprechender erscheinen als die reine Verschärfung ordnungsrechtlicher Instrumente. Die Kombination der Verschärfung ordnungsrechtlicher Instrumente mit deren Vollzug erscheint aber ebenfalls geeignet, um beachtliche Endenergiebedarfsminderungen zu erreichen.

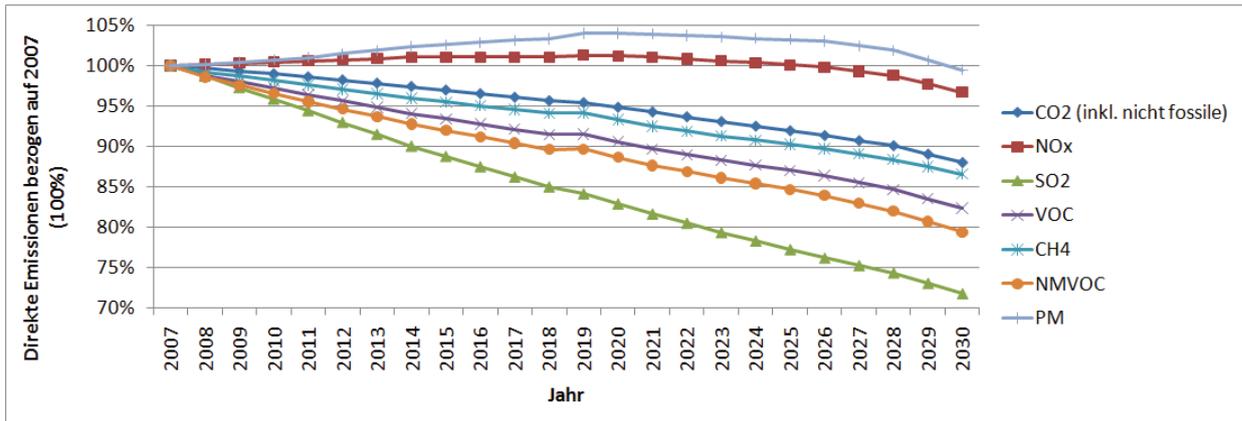


Abb. III.6.4.: Entwicklung der direkten Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 im Szenario *Basis*

In Abbildung III.6.3 ist die Entwicklung des Endenergiebedarfs der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 differenziert nach Endenergieträgern für das Szenario *Basis* dargestellt. Während der Endenergiebedarf an Fernwärme wegen der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle und der Unterstützung durch Solarthermie trotz des Neubaus leicht sinkt, sind bei Erdgas und Heizöl (und auch Kohle) stärkere Bedarfsrückgänge zu beobachten, da diese zusätzlich durch Holz(pellets) substituiert werden.

### III.6.2. Entwicklung der Emissionen

In Abbildung III.6.4 ist die Entwicklung der direkten Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 im Szenario *Basis* dargestellt. Während die Emissionen an  $\text{NO}_x$  und PM in der ersten Dekade der Modellierung zunächst ansteigen, sinken sie in der folgenden unter die entsprechenden Werte des Jahres 2007. Die zwischenzeitliche Emissionserhöhung im Vergleich zum Jahr 2007 liegt aber in beiden Fällen unter 5%. Die jährlichen Emissionen an  $\text{CO}_2$  (inkl. der Emissionen aus Holzpellets),  $\text{CH}_4$ , VOC, NMVOC und  $\text{SO}_2$  sinken von 2007 auf 2030 um 12%, 13%, 18%, 21% und 28%.

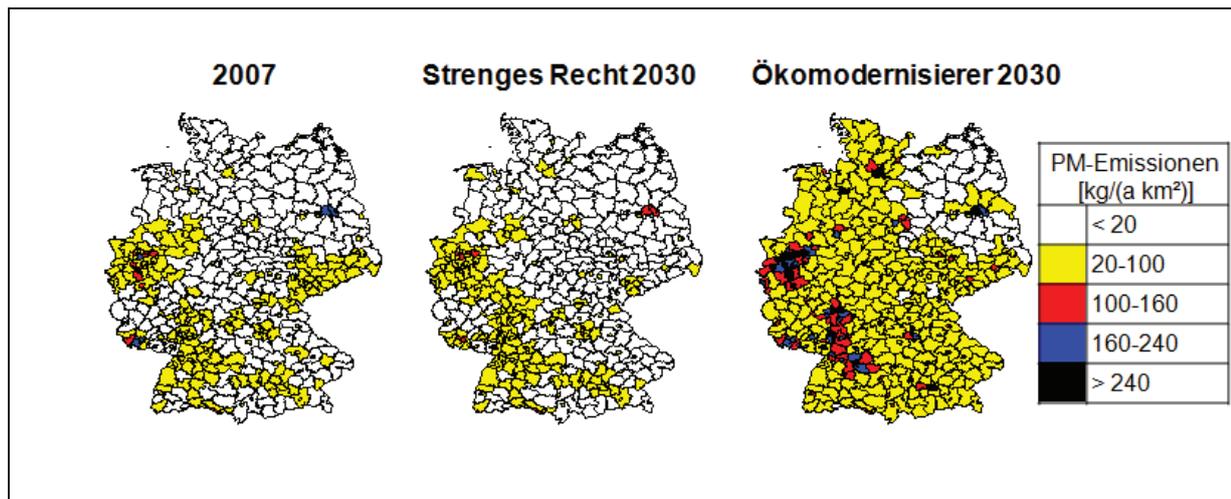


Abb. III.6.5.: Direkte gebietsflächenspezifische PM-Emissionen für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung in Wohngebäuden in Deutschland auf Kreisebene im Jahr 2007 und im Jahr 2030 für die Szenarios *Strenges Recht* und *Ökomodernisierer*

### III.6.2.1. Entwicklung der PM-Emissionen

In Abbildung III.6.5 sind die direkten gebietsflächenspezifischen PM-Emissionen für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung in Wohngebäuden auf Kreisebene für das Jahr 2007 und das Jahr 2030 für die Szenarios *Strenges Recht* und *Ökomodernisierer* dargestellt. Im Jahr 2007 sind die Emissionen im Saarland, Nordrhein-Westfalen und Berlin höher als in den übrigen Bundesländern. Dies kann teilweise durch die Bevölkerungsdichte und den mit 1% bis 6% recht hohen Anteilen von Kohle am Endenergiebedarf für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung erklärt werden.

Im Szenario *Strenges Recht* sinken die PM-Emissionen bis 2030 um ca. 14%, während im Szenario *Ökomodernisierer* ein Anstieg um 117% prognostiziert wird. Die Substitution von Kohle und die energetische Modernisierung der Gebäudehülle bewirken zwar tendenziell eine Reduzierung der PM-Emissionen, aber dieser Effekt wird durch einen drastischen Anstieg der Biomasseverbrennung im Szenario *Ökomodernisierer* überkompensiert. In manchen Landkreisen vervielfachen sich die PM-Emissionen sogar, wobei mangels Modellierung der Nebenfeuerstätten nur ca. 60% der PM-Emissionen berücksichtigt werden (vgl. Kapitel III.5.1.4). Da allerdings ca. 11% der PM-Emissionen durch die Anlagentechnik in Wohngebäuden

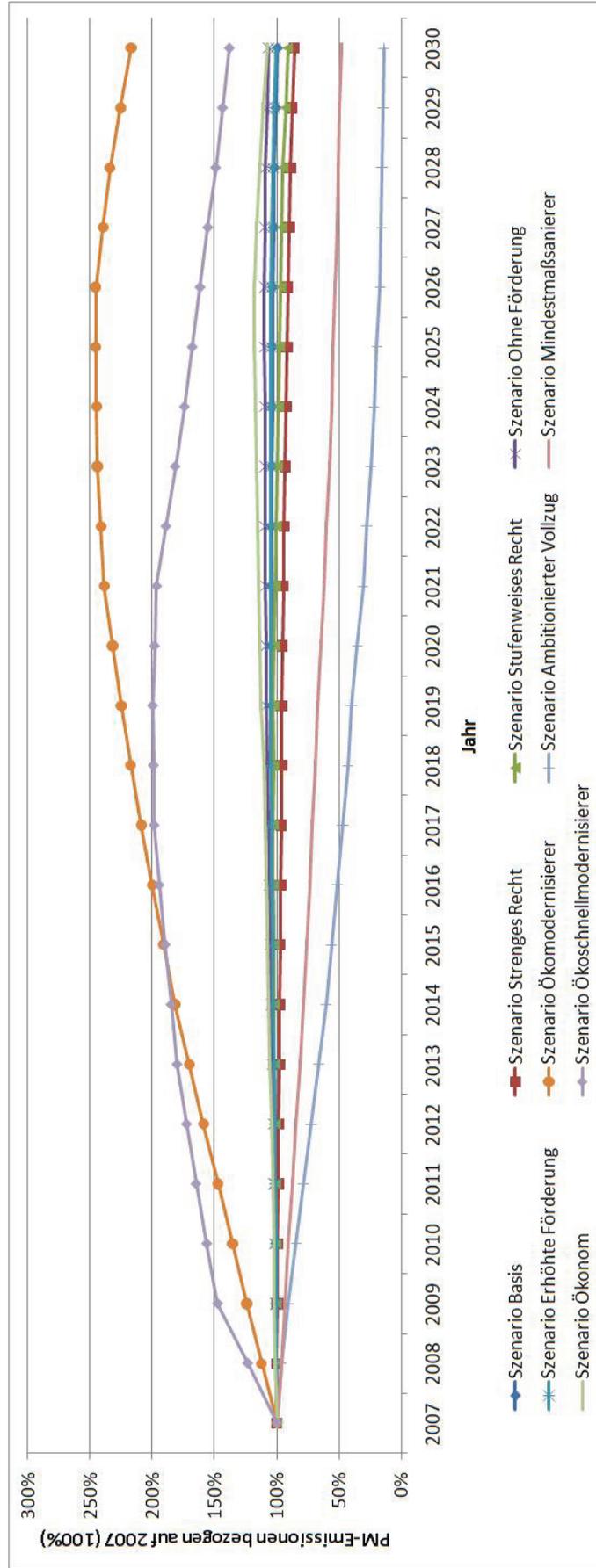


Abb. III.6.6.: Entwicklung der direkten PM-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios

emittiert werden, können durch die Vervielfachung der Emissionen beachtliche lokale Verschlechterungen auftreten.

In Abbildung III.6.6 wird die Entwicklung der direkten PM-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 für die betrachteten Szenarios verglichen. Während sich die PM-Emissionsminderung von 2007 bis 2030 für den Großteil der Szenarios in dem vom Szenario *Ökonom* mit -7% und dem Szenario *Strenges Recht* mit 14% aufgespannten Korridor bewegt, stechen die vier Szenarios *Ökomodernisierer*, *Ökoschnellmodernisierer*, *Mindestmaßsanierer* und *Ambitionierter Vollzug* heraus. Während die letztgenannten zu einer relativ gleichmäßigen Reduktion um 52% bzw. 86% führen, ist beim Szenario *Ökomodernisierer* ein Anstieg um 117% festzustellen, der von dem Maximum im Jahr 2026 jedoch noch übertroffen wird. Der Anstieg ist, wie bereits erläutert wurde, auf die vermehrte Verbrennung von Holzpellets (Hackschnitzel werden im Modell nicht berücksichtigt) zurückzuführen, wobei die Diffusion der Holzpelletanlagen schneller vonstattengeht als diejenige der energetischen Modernisierung der Gebäudehüllen, so dass ein zwischenzeitliches Maximum an PM-Emissionen entsteht. Im Szenario *Ökoschnellmodernisierer* wird dieses Maximum mit einem Anstieg um 100% durch die kürzeren Sanierungszyklen auf das Jahr 2019 vorgezogen. Die beachtlichen Reduktionen in den Szenarios *Mindestmaßsanierer* und *Ambitionierter Vollzug* sind überwiegend auf die kontinuierliche Verbesserung der Gebäudehülle und den Ersatz veralteter Festbrennstoffheizungen zurückzuführen.

### III.6.2.2. Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen

In Abbildung III.6.7 wird die Entwicklung der direkten NO<sub>x</sub>-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den Szenarios verglichen. Das Szenario *Ambitionierter Vollzug* führt mit 55% zur stärksten Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen. Die Verläufe in den Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* mit einem Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 58% bzw. 10% bis zum Jahr 2030 und einem zwischenzeitlichen Maximum von

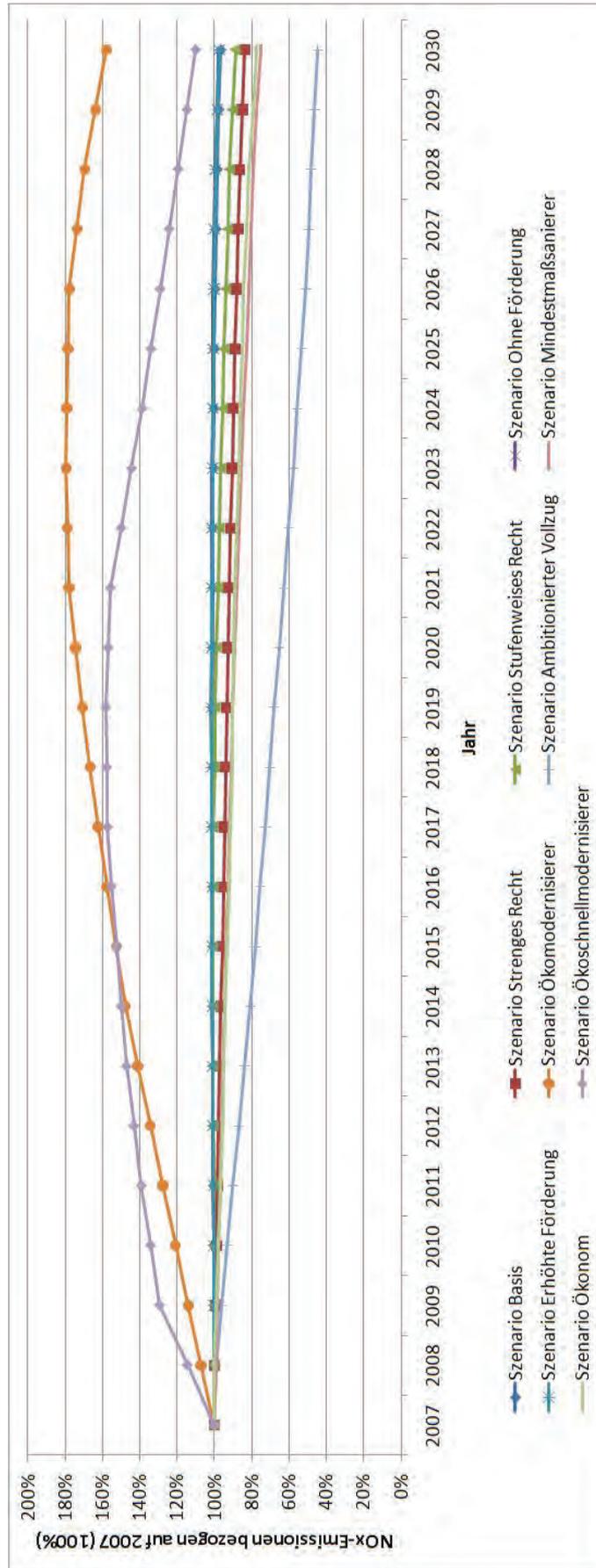


Abb. III.6.7.: Entwicklung der direkten NO<sub>x</sub>-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios

180% im Jahr 2023 bzw. 158% im Jahr 2018 sind wiederum auf die verstärkte Holzpelletverbrennung und die unterschiedliche Länge der Sanierungszyklen von Gebäudehülle und Anlagentechnik zurückzuführen. Die Reduktion in den übrigen Szenarios ist einerseits auf die energetische Modernisierung der Gebäudehüllen, aber auch auf die niedrigeren Emissionsfaktoren von auf Gas basierenden Niedertemperatur- und insbesondere Brennwertkesseln im Vergleich zu der ersetzen auf Kohle, Öl, aber auch Gas basierenden Anlagentechnik zurückzuführen (vgl. Tabelle III.2.13 und Tabelle III.2.19). Im Gegensatz zum Szenario *Basis* mit einer Reduktion um 3% führen die Szenarios *Stufenweises Recht*, *Strenges Recht* und *Ökonom* zu um 11%, 16% und 23% reduzierten NO<sub>x</sub>-Emissionen im Jahr 2030 bezogen auf das Jahr 2007.

### III.6.2.3. Entwicklung der SO<sub>2</sub>-Emissionen

In Abbildung III.6.8 wird die Entwicklung der direkten SO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den Szenarios dargestellt. In sämtlichen Szenarios sinken diese Emissionen kontinuierlich, wobei die Minderungsspanne von 28% in den Szenarios *Ohne Förderung*, *Basis* und *Erhöhte Förderung* über die Reduktionshöhe 32% bis 35% in den Szenarios *Stufenweises Recht*, *Strenges Recht* und *Mindestmaßsanierer* sowie 46% bis 47% in den Szenarios *Ökonom* und *Ambitionierter Vollzug* bis hin zu 86% bis 88% in den Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* reicht. Neben der Reduktion des Endenergiebedarfs, die sich positiv auf alle betrachteten Emissionen auswirkt, ist für die Verläufe die Energieträgersubstitution von Kohle und Öl (die Verwendung von schwefelarmem Heizöl wird hier nicht berücksichtigt) durch Gas und Holzpellets maßgeblich. Bei den Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* werden zunächst drastische Reduktionen durch die Energieträgerwechsel erreicht, die 2026 bzw. 2021 abgeschlossen sind. Anschließend sinken die Emissionen, die sich bereits auf niedrigem Niveau befinden, entsprechend der Modernisierung der noch nicht sanierten Gebäudehüllen.

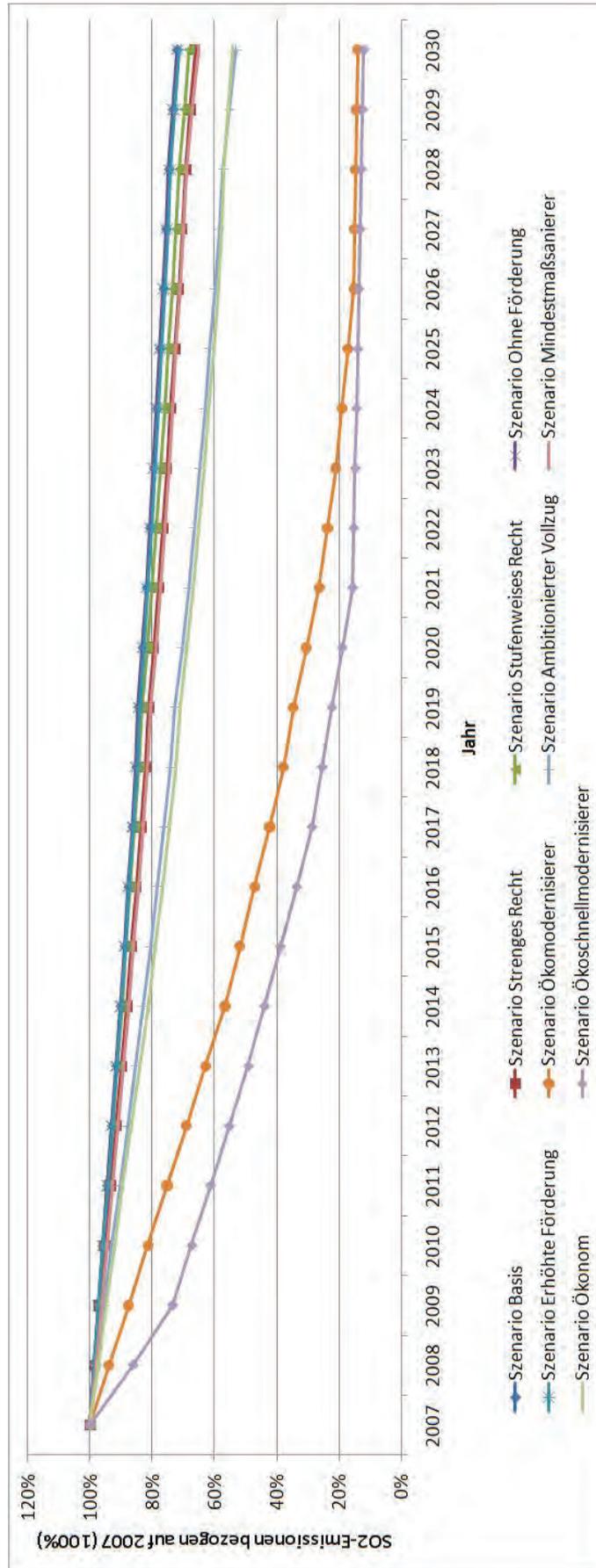


Abb. III.6.8.: Entwicklung der direkten SO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios

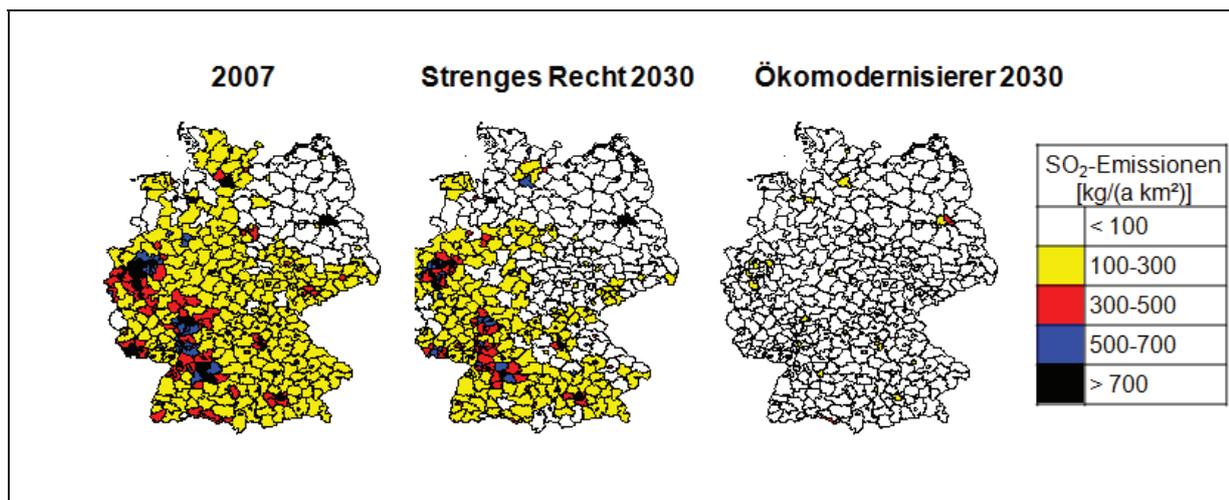


Abb. III.6.9.: Gebietsflächenspezifische SO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland auf Kreisebene im Jahr 2007 und im Jahr 2030 für die Szenarios *Strenges Recht* und *Ökomodernisierer*

In Abbildung III.6.9 sind die direkten gebietsflächenspezifischen SO<sub>2</sub>-Emissionen für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung in Wohngebäuden auf Kreisebene für das Jahr 2007 und das Jahr 2030 für die Szenarios *Strenges Recht* und *Ökomodernisierer* dargestellt. Die SO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2007 korrelieren in erster Ordnung mit dem Anteil des Energieträgers Öl am Gesamtenergiebedarf, aber auch mit den Anteilen von Braunkohle, Briketts, Steinkohle und Koks, die zwar einen höheren Schwefelgehalt aufweisen als leichtes Heizöl, jedoch deutlich geringere Anteile am Gesamtenergieverbrauch. Während sich die Emissionen im Szenario *Strenges Recht* bis 2030 in einigen Kreisen auf hohem Niveau halten, ist im Szenario *Ökomodernisierer* auch in Großstädten wie Berlin und München eine starke Reduktion zu erkennen.

#### III.6.2.4. Entwicklung der NMVOC-Emissionen

In Abbildung III.6.10 wird die Entwicklung der direkten NMVOC-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den Szenarios dargestellt. Die Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* führen wie bei PM und NO<sub>x</sub> zu einer Erhöhung der VOC-Emissionen um 50% bzw. 2% bis 2030. Die Szenarios *Mindestmaßsanierer* und *Ambitionierter*

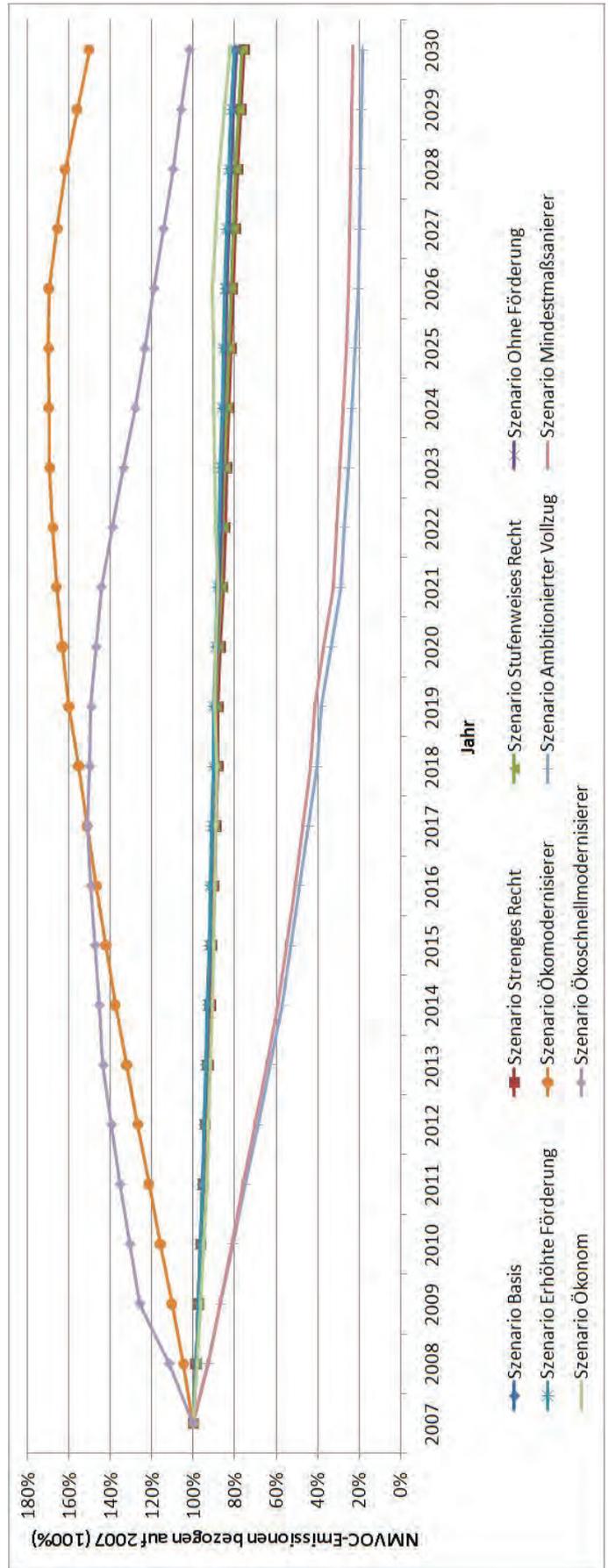


Abb. III.6.10.: Entwicklung der direkten NMVOC-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios

*Vollzug* gehen mit einer starken Reduktion um 77% und 82% einher, die weit über der von 18% bis 25% reichenden Spannbreite der übrigen Szenarios liegt. Die starke Reduktion in den Szenarios *Mindestmaßsanierer* und *Ambitionierter Vollzug* liegt darin begründet, dass einerseits jede zur Sanierung anstehende Gebäudehülle energetisch saniert wird und andererseits Holzpellets nur in geringen Maßen eingesetzt werden. Während ersteres ebenfalls bei den Szenarios *Ökomodernisierer*, *Ökoschnellmodernisierer* und *Ökonom* zutrifft, führt die starke Verwendung von Holzpellets in diesen Szenarios zu deutlich höheren VOC-Emissionen im Vergleich zu den übrigen Szenarios.

### III.6.2.5. Entwicklung der CH<sub>4</sub>-Emissionen

In Abbildung III.6.11 wird die Entwicklung der direkten CH<sub>4</sub>-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den Szenarios dargestellt. Lediglich das Szenario *Mindestmaßsanierer* führt mit einer Reduktion um 75% zu einer starken Minderung der CH<sub>4</sub>-Emissionen im Jahr 2030. Über die höchsten Emissionsfaktoren beim Ersatz der Anlagentechnik (vgl. Tabelle III.2.19) verfügen Holzpelletkessel und auch Gasbrennwertkessel, die in diesem Szenario beide nicht bzw. kaum verbaut werden. Zugleich werden alle zur Sanierung anstehenden Gebäude energetisch modernisiert, wenn auch auf niedrigem Niveau, und die bestehende Anlagentechnik mit hohen CH<sub>4</sub>-Emissionsfaktoren, d. h. auf Kohle und Holz basierende Varianten (vgl. Tabelle III.2.13), vollständig ersetzt. In den Szenarios *Ökonom* und *Strenges Recht* übersteigen die Emissionszunahmen durch Holzpelletkessel und Brennwertkessel die durch die Verbesserung der Gebäudehülle und durch die Abnahme des Anteils der auf Kohle basierenden Anlagentechnikvarianten erzielten Reduktionen. Während im Szenario *Ökomodernisierer* die Emissionen aufgrund der Holzpelletkessel bis zum Jahr 2030 um 29% steigen, wird im Szenario *Ökoschnellmodernisierer* allein aufgrund des kürzeren Sanierungszyklus der Gebäudehülle bereits eine Reduktion um 7% bezogen auf 2007 erreicht. Die übrigen Szenarios führen zu Einsparungen zwischen 7% und

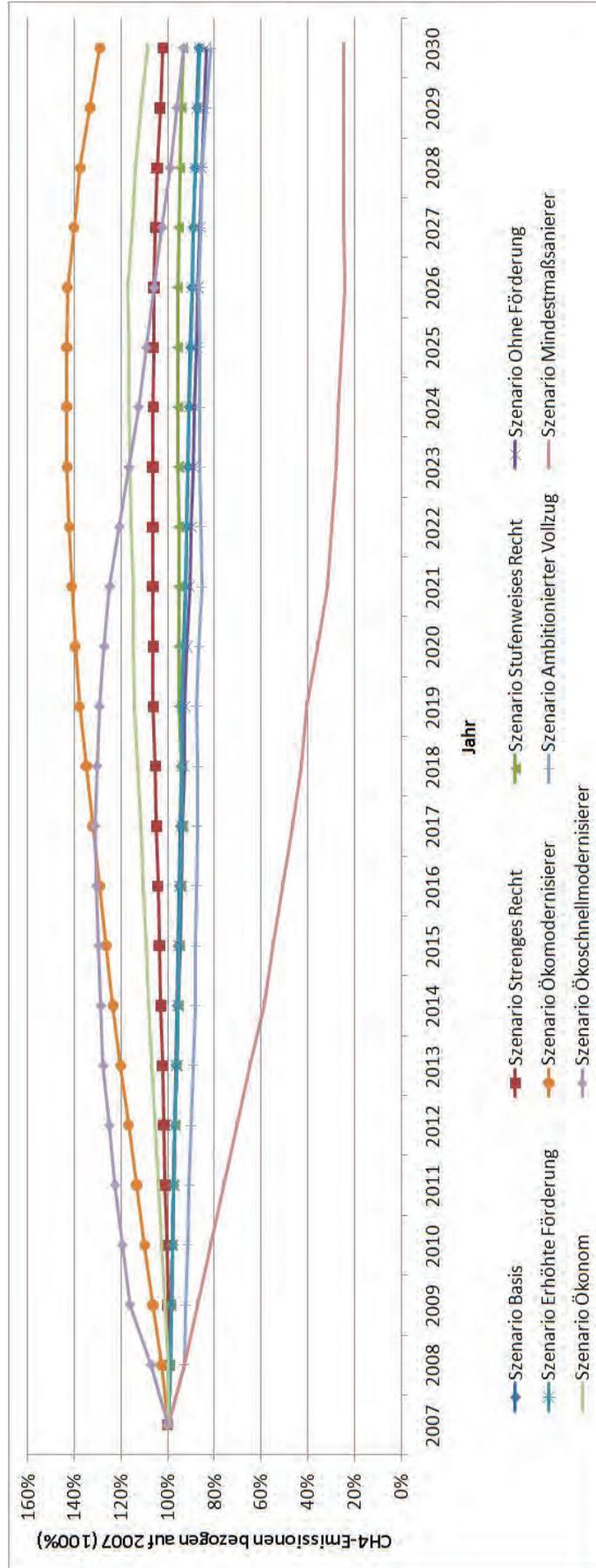


Abb. III.6.1.1.: Entwicklung der direkten CH<sub>4</sub>-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios

19%, wobei letztere zum Szenario *Ambitionierter Vollzug* gehörende Reduktion wegen des vermehrten Einsatzes von Brennwertkesseln derart beschränkt bleibt.

### III.6.2.6. Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

In Abbildung III.6.12 wird die Entwicklung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen (inkl. der Emissionen durch die Verbrennung von Biomasse) der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den Szenarios dargestellt. Die Reduktionen für das Jahr 2030 bezogen auf 2007 liegen im Bereich von 7% im Szenario *Ökomodernisierer* bis 40% im Szenario *Ambitionierter Vollzug*. Die Werte der Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* enthalten jedoch ausschließlich direkte Emissionen aus Holzpelletkesseln, da in diesem Fall der gesamte Gebäudebestand im Jahr 2030 durch eine Mischung aus letzteren sowie Fernwärme und elektrisch betriebenen Wärmepumpen (jeweils auch mit solarthermischer Unterstützung) beheizt wird. Während die Szenarios *Basis*, *Ohne Förderung* und *Erhöhte Förderung* zu einer Reduktion um 12% führen, können bei den Szenarios *Stufenweises Recht* und *Strenges Recht* mit 17% und 19% weitere Reduktionen erreicht werden. Die Szenarios *Ökonom*, *Mindestmaßsanierer* und *Ökoschnellmodernisierer* führen zu Emissionsreduktionen von 24%, 27% und 30%. Allgemein gilt es zu beachten, dass ein höherer Anteil an Holzpellets aufgrund geringer Jahresnutzungsgrade und hoher Emissionsfaktoren zu tendenziell höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen führt (vgl. Tabelle III.2.15 und Tabelle III.2.21). Dadurch können die trotz stärkster Dämmung höchsten Emissionen im Szenario *Ökomodernisierer* erklärt werden. Weiterhin plausibilisiert dies auch die starke Emissionsreduktion im Szenario *Ambitionierter Vollzug*, da in diesem Holzpellets nur maßvoll eingesetzt werden.

### III.6.3. Anteile der Gebäudehüllenvarianten

In Abbildung III.6.13 sind die Anteile der unterschiedlichen Gebäudehüllenvarianten (m<sup>2</sup> Wohnfläche/m<sup>2</sup> Wohnfläche) an allen seit 2007 sanierten Hüllen von 2007

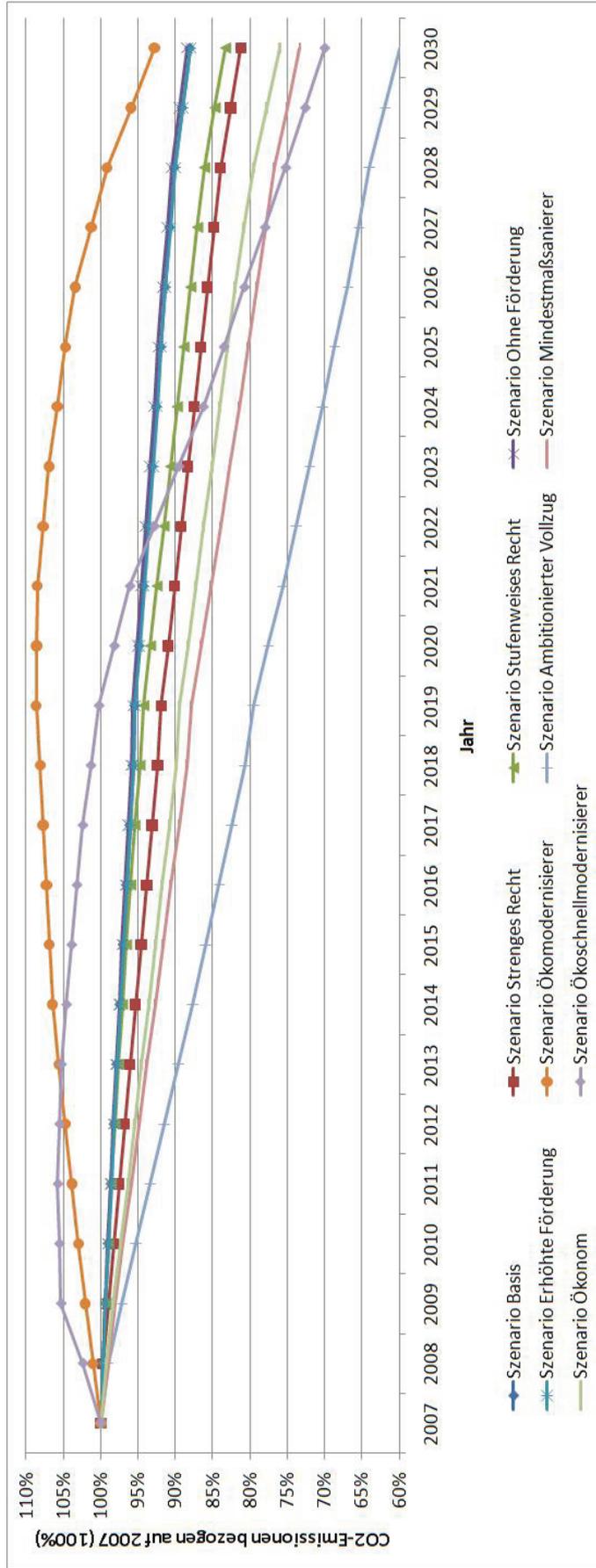


Abb. III.6.12.: Entwicklung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen (inkl. Emissionen durch die Verbrennung von Biomasse) der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios

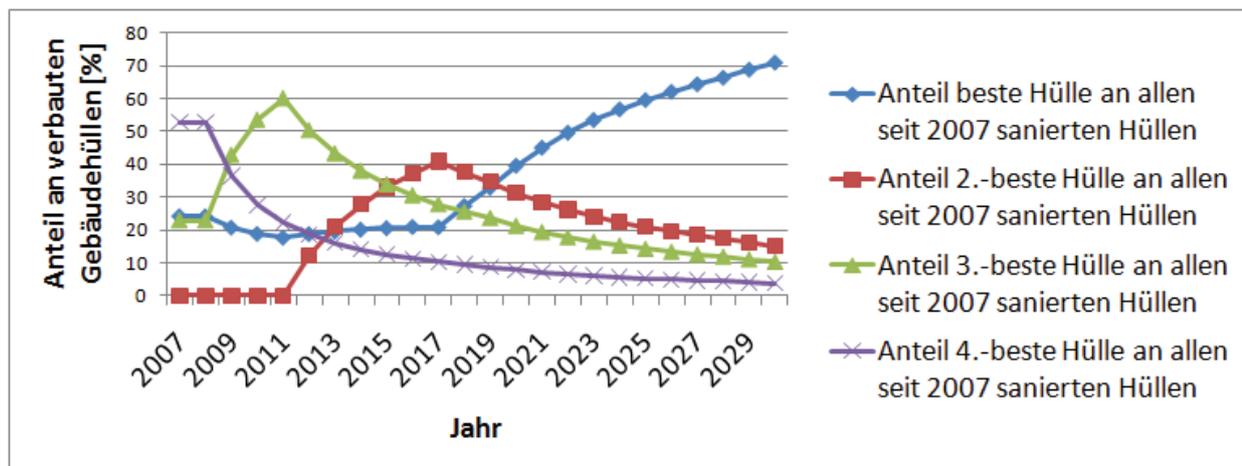


Abb. III.6.13.: Anteile der verschiedenen Gebäudehüllenvarianten ( $m^2$  Wohnfläche/ $m^2$  Wohnfläche) an allen seit 2007 sanierten Hüllen von 2007 bis 2030 im Szenario *Stufenweises Recht*

bis 2030 im Szenario *Stufenweises Recht* dargestellt. In den Jahren 2007 bis 2008 sind aus ordnungsrechtlicher Sicht alle Gebäudehüllen möglich. 53% der Sanierungen werden entsprechend der Mindestanforderung durchgeführt. Während die restlichen 47% zu nahezu gleichen Teilen als beste und drittbeste Hüllenvariante ausgeführt werden, wird die zweitbeste Hüllenvariante zunächst nicht verbaut. Die beste Hülle wird von den Entscheidertypen *Öko* und *Ökonom* (sowie bei den entsprechenden Bewirtschaftungsstrategien) und die drittbeste Hülle ausschließlich vom Entscheidertyp *Ökonom* gewählt. Ab 2009 darf die viertbeste Hülle nicht mehr verbaut werden, sodass der entsprechende Anteil bis 2030 kontinuierlich sinkt. Stattdessen nimmt der Anteil der zur neuen Mindestanforderung gehörenden Hülle bis zur nächsten Verschärfung des Ordnungsrechts im Jahr 2012 zu. Ab 2018 darf schließlich nur noch die beste Hülle verbaut werden, deren Anteil dann bis 2030 auf 71% steigt.

#### III.6.4. Ökonomische Kenngrößen

In Abbildung III.6.14 sind die kumulierten Auszahlungen von 2007 bis 2030 für Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie Energie differenziert nach den betrachteten Szenarios dargestellt. In den kumulierten Auszahlungen sind die Restnutzung bzw. die

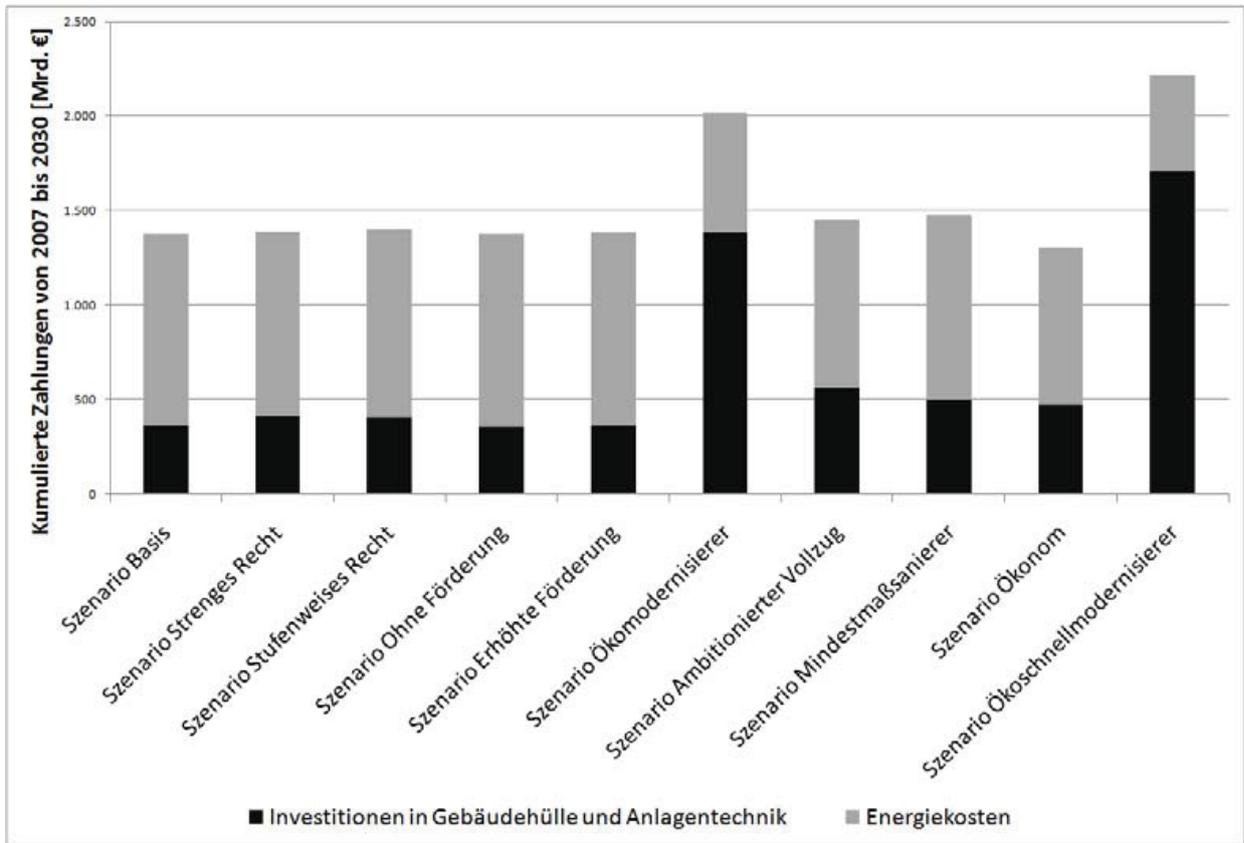


Abb. III.6.14.: Kumulierte Auszahlungen von 2007 bis 2030 für Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie Energie differenziert nach den betrachteten Szenarios

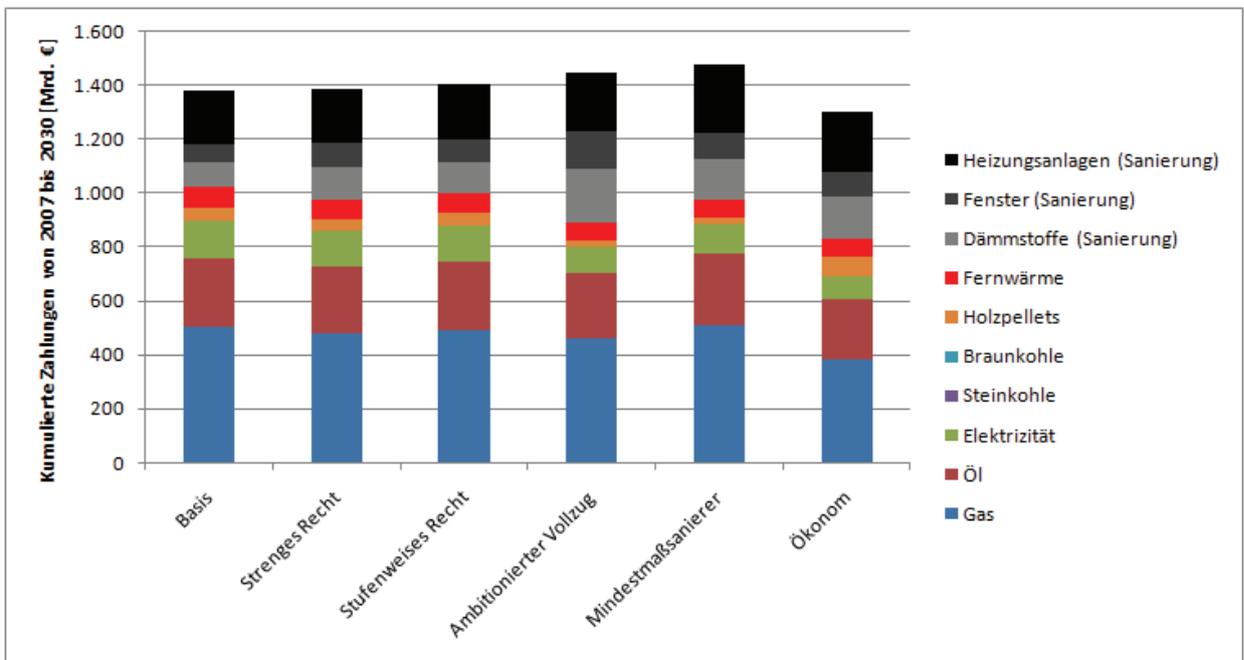


Abb. III.6.15.: Kumulierte Auszahlungen von 2007 bis 2030 für Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie Energie differenziert nach Investitionsbestandteilen, Energieträgern und den betrachteten Szenarios

Restwerte der bis zum Jahre 2030 getätigten Investitionen nicht berücksichtigt. Im Szenario *Basis* belaufen sich die kumulierten Auszahlungen auf 360 Mrd. EUR für die Investitionen in die Gebäudehülle und 1.021 Mrd. EUR für die Energie. Die kumulierten Auszahlungen in den Extremszenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* überschreiten die Auszahlungen im Szenario *Basis* um 46% bzw. 60%. Während die Auszahlungen für Energie um 38% bzw. 50% unterschritten werden, übersteigen die Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und die Anlagentechnik diejenigen des Szenarios *Basis* allerdings um 284%. Die Auszahlungen im Szenario *Ökonom* unterschreiten diejenigen des Basisszenarios um 6%, d. h. um 76 Mrd. EUR. Im Gegensatz zu den Extremszenarios führt das Szenario *Ambitionierter Vollzug* lediglich zu um 5% erhöhten Auszahlungen. Auch wenn die Wirtschaftlichkeit der in den jeweiligen Szenarios getätigten Auszahlungen durch diese Größen nicht direkt widerspiegelt wird, so zeigen sie doch den Bedarf an finanziellen Mitteln in den jeweiligen Szenarios auf. Dieser ist in den Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* in Relation derart hoch, dass diese im Folgenden von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Ebenso werden die Szenarios *Ohne Förderung* und *Erhöhte Förderung* aufgrund ihrer allgemein geringen Abweichungen vom Szenario *Basis* im Folgenden nicht weiter betrachtet.

In Abbildung III.6.15 sind die kumulierten Auszahlungen von 2007 bis 2030 für Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie Energie differenziert nach Investitionsbestandteilen, Energieträgern und den betrachteten Szenarios dargestellt. Die Gesamtinvestitionen der Szenarios variieren von 360 Mrd. EUR im Szenario *Basis* bis 559 Mrd. EUR im Szenario *Ambitionierter Vollzug*. Im Szenario *Ambitionierter Vollzug* wird mit 200 Mrd. EUR für Dämmstoffe und 141 Mrd. EUR für Fenster der größte Betrag in die Gebäudehülle investiert, wobei im Szenario *Mindestmaßsanierer* die Investition in die Anlagentechnik mit 253 Mrd. EUR am höchsten ausfällt. Letzteres kann durch Energieträgerwechselkosten erklärt werden. Die geringsten Gesamtausgaben werden im Szenario *Ökonom* erreicht, da zwar die Investitionen um 31% höher, aber die Energiekosten um 19% geringer sind als im Szenario *Basis*.

### III.6.5. Einschränkungen

Die Verwendung eines „Bottom-up“-Modells erfordert, wie in Kapitel III.1.1 erläutert wurde, zahlreiche Annahmen. Insbesondere die hohe räumliche Auflösung und die Annahmen hinsichtlich des Verhaltens der Entscheidungsträger bringen große Unsicherheiten in das Modell ein. Da jede zusätzliche Annahme weitere Unsicherheiten in das Modell einbringt, lässt sich der gewählte Modellierungsansatz letztendlich nur rechtfertigen, wenn die Ergebnisse auf detaillierter Ebene analysiert werden. Dies wurde bisher nicht in hinreichender Weise getan. Allgemein bietet der gewählte Ansatz viele Erweiterungsmöglichkeiten, die zukünftig sukzessive in das Teilmodell Raumwärme eingearbeitet werden. Obwohl bspw. Nebenfeuerstätten für einen großen Teil der Emissionen an CH<sub>4</sub>, NMVOC und PM verantwortlich sind, wurden sie bisher nicht in das Modell integriert. Weiterhin wurden bei Sanierungen bisher weder Wärmepumpen noch der Wechsel zu Fern- oder Nahwärme berücksichtigt. Teilweise wurden auch Parameter wie die Wohnflächenentwicklung, die starken Einfluss auf die Modellergebnisse haben, noch nicht in den Szenarios variiert.



## III.7. Zusammenfassung und Ausblick zu Teil III

### III.7.1. Zusammenfassung

Die Szenarios *Ökomodernisierer* und *Ökoschnellmodernisierer* zeigen als Extremszenarios zwar in Bezug auf den Endenergiebedarf und die SO<sub>2</sub>-Emissionen die stärksten Reduktionen, verursachen jedoch trotz Partikelabscheider (vgl. Tabelle III.2.17) eine Erhöhung der Emissionen an PM, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC und CO<sub>2</sub> (inkl. der „grünen“ CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Biomasse). Zudem ist der Investitionsbedarf derart erhöht, dass deren Umsetzung höchst fraglich ist. Während das Szenario *Basis* zu einer mäßigen Endenergiebedarfsreduktion um 16% im Jahr 2030 führt, sinken auch alle betrachteten Luftschadstoffe und Treibhausgase, wenn auch teilweise nur leicht. Die Auswirkungen der finanziellen Förderung sind bei dem gewählten Modellierungsansatz gering, sodass dieser in Zukunft angepasst werden sollte. Die reine Verschärfung der ordnungspolitischen Instrumente, ohne deren Umsetzung vollständig nach Ablauf der jeweiligen technischen Lebensdauer durchzusetzen, zeigt eine auf 21% bis 23% limitierte Endenergiebedarfsreduktion, während im Vergleich zum Szenario *Basis* die Emissionen an PM, NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> leicht reduziert, die Investitionen leicht erhöht und die Emissionen an SO<sub>2</sub>, NMVOC und CH<sub>4</sub> näherungsweise identisch sind. In den Szenarios *Mindestmaßsanierer* und *Ökonom* ist die Endenergiebedarfsreduktion auf 26% bzw. 32% beschränkt. Der weitere Vergleich dieser beiden Szenarios zeigt, dass neben der erhöhten Endenergiebedarfsreduktion die kumulierten Auszahlungen im Szenario *Ökonom* um 13% geringer, aber abgesehen von den SO<sub>2</sub>- und den NO<sub>x</sub>-Emissionen alle betrachteten Emissionen zumindest mäßig erhöht sind. Hervorzuheben

ist das Szenario *Ambitionierter Vollzug*, in dem durch eine Verschärfung der ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und deren Vollzug im Vergleich zum Szenario *Basis* bei einer um 56% erhöhten Investition, aber nur um 5% erhöhten kumulierten Gesamtausgaben, eine Endenergiebedarfsreduktion um 38% sowie Emissionsreduktionen von PM um 86%, NO<sub>x</sub> um 55%, SO<sub>2</sub> um 47%, NMVOC um 82%, CH<sub>4</sub> um 19% und CO<sub>2</sub> um 40% erreicht werden.

### III.7.2. Schlussfolgerungen

Das Szenario *Basis* führt zu Reduktionen von Emissionen und Endenergiebedarf, die in den Szenarios *Stufenweises Recht* und *Strenges Recht* hinsichtlich des Endenergiebedarfs und einiger Emissionsarten mäßig gesteigert werden können. Hierfür müssten lediglich die ordnungspolitischen Instrumente entsprechend verschärft werden. Für eine stärkere und wirtschaftliche Reduktion des Endenergiebedarfs bietet sich das Szenario *Ökonom* an, wobei hierfür teilweise Emissionserhöhungen in Kauf genommen werden müssen. Zur realen Umsetzung wären allerdings u. a. Informationskampagnen und Ähnliches, ein besserer Umgang mit dem Nutzer-Investor-Dilemma sowie die Kreditversorgung potentieller Investoren mit finanziellen Restriktionen notwendig. Hinsichtlich des Nutzer-Investor-Dilemmas wird von der Bundesregierung derzeit der Begriff „umlegbare Modernisierungskosten“ diskutiert, um Vermietern auch unter wirtschaftlichen Aspekten Anreize für einen Beitrag zum Klimaschutz zu geben. So könnten künftig nicht nur rein energetische Sanierungsmaßnahmen, sondern alle Maßnahmen, die dem Klimaschutz dienen, wie z.B. die Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Dach, die Möglichkeit zu einer Anpassung des Mietpreises geben. Für drastische Reduktionen aller betrachteten Emissionen und des Endenergiebedarfs wären im Szenario *Ambitionierter Vollzug* stark erhöhte Investitionen notwendig, die aber nur zu leicht erhöhten kumulierten Gesamtausgaben führten. Dies könnte durch eine gleichzeitige Verschärfung der ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und deren Vollzug erfolgen, die aber in der Realität durch entsprechende Kredite und Förderun-

gen unterstützt werden müssten. Die finanziellen Förderinstrumente werden vom Teilmodell Wohngebäude in der derzeitigen Kalibrierung vermutlich nicht adäquat erfasst und sollten ebenfalls beibehalten werden. Die Szenarios *Ökonom* und *Ambitionierter Vollzug* ergänzen sich gegenseitig, so dass eine Kombination dieser angestrebt werden könnte.

### III.7.3. Ausblick

Insgesamt erlaubt das entwickelte Modell des deutschen Wohngebäudebestands eine Basis zur Identifizierung von Engpässen auf dem Weg zu einer energieeffizienten und emissionsärmeren Zukunft des Wohngebäudesektors, indem Barrieren wie das Umgehen der Energieeinsparverordnung und finanzielle Bürden für Haushalte mit niedrigem Einkommen berücksichtigt werden. Um die volle Stärke des Modells ausnutzen zu können, sollen Daten über das Entscheidungsverhalten der Entscheidungsträger eingearbeitet, die hochaufgelösten Ergebnisse in räumlicher Form analysiert und die sozialen Auswirkungen der Sanierungstätigkeit quantifiziert werden. Hierfür scheint die gewählte Modellstruktur geeignet. Weiterhin erscheinen diverse Erweiterungen und Detaillierungen nützlich wie bspw. die Berücksichtigung des technologischen Fortschritts, die Einarbeitung weiterer Technologien, die gesonderte Berücksichtigung leitungsgebundener Energieträger hinsichtlich der räumlichen Nähe von Gebäuden sowie die detaillierte Betrachtung der Wechselwirkungen mit dem Elektrizitätssektor.



### III.8. Literatur zu Teil III

- [AGEB 2010] AGEB: *Energiebilanz 2006*. Berlin : Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 2010
- [Aydinalp u. a. 2002] AYDINALP, M. ; UGURSAL, V. ; FUNG, A.: Modeling of the appliance, lighting, and space-cooling energy consumptions in the residential sector using neural networks. In: *Applied Energy* 71 (2002), S. 87–110
- [Aydinalp u. a. 2004] AYDINALP, M. ; UGURSAL, V. ; FUNG, A.: Modeling of the space and domestic hot-water heating energy-consumption in the residential sector using neural networks. In: *Applied Energy* 79 (2004), S. 159–178
- [BBSR 2006] BBSR: *CD-ROM Raumordnungsprognose 2020/2050*. Bonn : Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung, 2006
- [BKI 2008] BKI: *BKI KOSTENplaner 11*. Stuttgart : Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2008
- [BKI 2010] BKI: *BKI Baukosten 2010*. Stuttgart : Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2010. – ISBN 978-3-941679-10-8
- [BVBW 2001] BVBW: *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. Bundesministerium für Verkehr, Bau-, und Wohnungswesen, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2001
- [BWP 2010] BWP: *Kompetenz für Nachhaltigkeit im Wärmemarkt / Bundesverband Wärmepumpe e.V.* Berlin, 2010. – Imagebroschüre

- [CO2Online gGmbH 2010] CO2ONLINE GMBH: *Heizatlas*. 2010. – URL [www.heizatlas.de](http://www.heizatlas.de)
- [Diefenbach und Enseling 2007] DIEFENBACH, N. ; ENSELING, A.: *Potentiale zur Reduzierung der CO2-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden in Hessen bis 2012*. Darmstadt : Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2007
- [DIN 276 ] DIN 276: *DIN 276*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN 4701 ] DIN 4701: *Normenreihe DIN 4701 - Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V.
- [Heinze GmbH 2005] HEINZE GMBH: *Modernisierungsmarkt 2005*. Celle, 2005
- [IWU 2005] IWU: *Deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze*. Darmstadt : Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2005
- [IWU 2007] IWU: *Deutsche Gebäudetypologie - Häufigkeiten von Gebäuden unterschiedlichen Baualters*. Darmstadt : Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2007
- [Kavgiv u. a. 2010] KAVGIV, M. ; MUMOVIC, A. ; STEVANOVIC, Z.: A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. In: *Building and Environment* 45 (2010), S. 1683–1697
- [Kleemann und Hansen 2005] KLEEMANN, M. ; HANSEN, P.: *Reihe Umwelt/Environment*. Bd. 60: *Evaluierung der CO2-Minderungsmaßnahmen im Gebäudebereich*. Forschungszentrum Jülich GmbH, 2005. – ISBN 3-89336-419-6
- [Kretschmer 2006] KRETSCHMER, C.: *Klimaschutz mit der KfW Förderbank*. Berlin : KfW Niederlassung Berlin, 19.Oktober 2006

- [Loga und Imkeller-Benjes 1997] LOGA, T. ; IMKELLER-BENJES, U.: *Energiepass Heizung/Warmwasser - Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem*. Darmstadt : Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 1997
- [Lowe 2007] LOWE, R.: Technical options and strategies for decarbonizing UK housing. In: *Building Research & Information* 35 (2007), S. 412–425
- [Markewitz und Stein 2003] MARKEWITZ, P. (Hrsg.) ; STEIN, G. (Hrsg.): *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland*. Jülich : Forschungszentrum Jülich GmbH, 2003. – 153–188 S. – ISBN 3-89336-333-5
- [Oeko-Institut u. a. 2009] OEKO-INSTITUT ; FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH ; DIW BERLIN ; FRAUNHOFER INSTITUT SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ; ZIESING, H.-J.: *Politiksznarien für den Umweltschutz V - auf dem Weg zum Strukturwandel - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2009. – 87–124 S. ISSN 1862-4359
- [Pfeiffer u. a. 2000] PFEIFFER U. A.: *Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher*. Berlin : Umweltbundesamt, 2000
- [Pistohl 2000] PISTOHL, W.: *Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, Heizung/Lüftung/Energiesparen*. 3. Auflage. Düsseldorf : Werner Verlag, 2000
- [Prognos AG und Oeko-Institut 2009] PROGNOSES AG ; OEKO-INSTITUT: *Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050 - Vom Ziel her denken*. Berlin : WWF Deutschland, 2009
- [Sartori u. a. 2008] SARTORI, I. ; BERGSDAL, H. ; MUELLER, H.: Towards modelling of construction, renovation and demolition activities: Norway's dwelling stock, 1900-2100. In: *Building Research & Information* 36 (2008), S. 412–425

- [Sopha u. a. 2011] SOPHA, B. ; KLOECKNER, C. ; HERTWICH, E.: Exploring policy options for a transition to sustainable heating system diffusion using an agent-based simulation. In: *Energy Policy* 39 (2011), S. 2722–2729
- [Statistisches Bundesamt 2006–2010] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Fachserie 5*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2006-2010
- [Statistisches Bundesamt 2008a] STATISTISCHES BUNDESAMT: *DVD Statistik lokal*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2008
- [Statistisches Bundesamt 2008b] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Mikrozensus 2006 - Scientific-Use-File*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2008
- [Statistisches Bundesamt 2010] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Indikatorenbericht 2010*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2010
- [Statistisches Bundesamt 2011] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Ausgewählte Zahlen für die Bauwirtschaft*. Wiesbaden, Deutschland : Statistisches Bundesamt, 2011
- [Struschka u. a. 2008] STRUSCHKA, M. ; KILGUS, D. ; SPRINGMANN, M. ; BAUMBACH, G.: *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2008 ISSN 1862-4804
- [Swan und Ugursal 2009] SWAN, L. ; UGURSAL, V.: Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009), S. 1819–1835
- [Umweltbundesamt 2010] UMWELTBUNDESAMT: *Emission inventory (UN ECE-CLRTAP)*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2010
- [VBV 2006] VBV: *Kosten technischer Gebäudeausrüstung*. Stuttgart : Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden Württemberg, Finanzministerium Baden-Württemberg, 2006

[Wagner u. a. 2010] WAGNER U. A.: *Technische Information - Zumik®on-Partikelabscheider*. 2010

[Weiß und Dunkelberg 2010] WEISS, J. ; DUNKELBERG, E.: *Erschließbare Energieeinsparpotenziale im Ein- und Zweifamilienhausbestand*. 2010

[Wittmann 2008] WITTMANN, T.: *Agent-based Models of Energy Investment Decisions*. Heidelberg : Physica-Verlag, 2008. – 31–66 S. – ISBN 978-3-7908-2003-4



**Teil IV.**

**Verkehr**

**(C. Doll, M. Krail)**



## IV.1. Einführung

Die Umwelt- und Klimabelastung durch Transport und Mobilität macht, je nach betrachtetem Schadstoff, bis zu 50 % der Gesamtemissionen in Deutschland aus. Der überwiegende Teil hiervon entfällt auf den motorisierten Straßenverkehr mit Pkw und Lastkraftwagen. Dabei haben sich sowohl die absolute Höhe, als auch die Anteile an der Gesamtbelastung und die Zusammensetzung der Schadstoffemissionen in den letzten Jahren grundlegend gewandelt. Triebfedern hierfür sind die Entwicklung der Verkehrsmärkte, die technische Entwicklung von Fahrzeugen und Kraftstoffen, sowie das vom politischen und ökonomischen Umfeld getriebene Verhalten der Nutzer.

Vor der Darstellung der eigentlichen Modellierung und der Ergebnisse der Luftschadstoffemissionen des Verkehrs zeigt dieser Berichtsteil zunächst die Entwicklungen von Verkehrsaufkommen und Emissionen der letzten Jahre auf. Im zweiten Kapitel geht der Berichtsteil auf den grundlegenden Prozess der Szenarienbildung und Modellierung ein und beschreibt im dritten Kapitel die Entwicklung technologischer Optionen der Emissionsminderung. Den Kern der Darstellung bilden die nachfolgenden Kapitel vier und fünf, in denen die integrierte Gesamtmodellierung und deren Ergebnisse im Detail vorgestellt werden. Das abschließende Kapitel liefert schließlich eine kurze Interpretation und einen Ausblick auf folgende Forschungsarbeiten.



## **IV.2. Schadstoffemissionen im Verkehr**

Zur Einordnung des Bereichs Verkehr und dessen Dynamik in das Gesamtbild aus Energieversorgung, Industrie und Haushalte gibt dieses Kapitel eine kurze Einführung in grundlegende verkehrliche Kennziffern und die daraus erwachsenden Schadstoffemissionen. Aufgrund der zentralen Bedeutung preispolitischer Instrumente zur Internalisierung der externen Kosten des Verkehrs in der nationalen und europäischen Verkehrspolitik führt das Kapitel schließlich auch in die Thematik der externen Kosten des Verkehrs ein.

### **IV.2.1. Die Entwicklung von Verkehrsaufkommen und Emissionen in Deutschland**

Zwischen den frühen 1960er bis zu den späten 1980er Jahren brachte der wirtschaftliche Aufbau Deutschlands und die Entwicklung der Europäischen Gemeinschaft ein rasantes Wachstum der Verkehrsinfrastruktur sowie der Verkehrsnachfrage mit sich. Trotz der Regulierung von Transportlizenzen und der Frachtraten im Straßengüterverkehr durch den Reichs-Kraftwagen-Tarif (RKT), welcher erst 1993 aufgehoben wurde, profitierte hiervon vor allem der Lkw-Fernverkehr. Die Liberalisierung der Transportmärkte 1993, der Fall des Eisernen Vorhangs und nicht zuletzt die Stilllegung von Gleisanschlüssen durch die neu gegründete Deutsche Bahn AG förderten den Trend hin zum Straßengüterverkehr bis in dieses Jahrzehnt. Erst in jüngster Zeit zeichnet sich eine Stabilisierung des Modal Split im Güterfernverkehr ab, was zu einem großen Teil auf die wachsende Bedeutung des überwiegend bahnaffinen internationalen Seeverkehrs zurückgeführt werden kann.

Im Personenverkehr ergibt sich ein ähnliches Bild. Durch den rasanten Ausbau der Straßeninfrastruktur, und hier insbesondere durch die Verdichtung des Autobahnnetzes und die regionale Erschließung nach dem Prinzip der Gleichwertigkeit der Verkehrsverhältnisse, sowie durch real etwa konstante Kraftstoffpreise wuchs der Straßenpersonenverkehr weitaus rasanter als die Nachfrage für Bahnfahrten. Lediglich der Luftverkehr, bedingt durch die Befreiung von Mineralöl- und Mehrwertsteuer und die Intensivierung internationaler Geschäftsbeziehungen, zeigte noch höhere Wachstumsraten. In der jüngsten Vergangenheit hat sich dieses Bild noch verschärft, da der landgebundene Personenverkehr, bedingt durch die Vorboten des demographischen Wandels in Europa, heute nahezu stagniert, während der internationale Luftverkehr weiter kräftige jährliche Zuwachsraten zeigt.

Auf Grundlage der statistischen Erhebungen nach Verkehr in Zahlen (BMVBW (2010)) stellt sich die Leistung im Personen- und Güterverkehr, gemessen an den beförderten Personen bzw. transportierten Tonnen und deren Distanz, entsprechend Abbildung IV.2.1 dar.

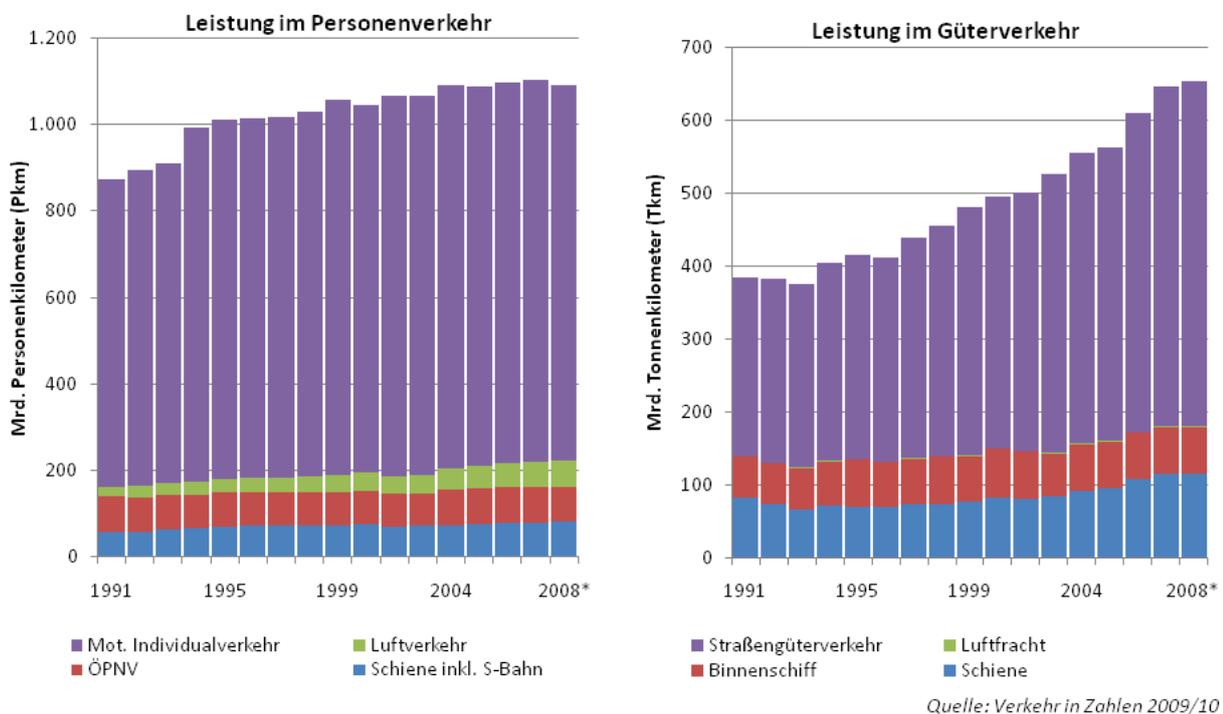


Abb. IV.2.1.: Entwicklung der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr in Deutschland 1991 bis 2008 nach Verkehrsträgern

Die Zahlen verdeutlichen die beschriebene Stagnation im Personenverkehr, sowie das anhaltende Wachstum im Güterverkehr sehr deutlich. In diesem Zeitraum stand ein Wachstum im Personenverkehr von lediglich 25 % einem Anstieg des Güterverkehrs um 70 % gegenüber. Während der motorisierte Individualverkehr mit 22 % unterdurchschnittlich stieg, bewegte sich der Lkw-Verkehr mit 93 % Wachstum deutlich über dem Anstieg des Güterverkehrs.

Bis in die späten 1980er Jahre blieben die ökologischen Folgen dieser Entwicklung weitgehend unbeachtet bzw. spielten in den politischen Entscheidungen kaum eine Rolle. Erst mit Aufkeimen der Umweltbewegung, mit Gründung und Einzug der „Grünen“ in Landtage und den deutschen Bundestag, und den sichtbaren Folgen von saurem Regen und Waldsterben gewannen ökologische Belange an politischem Gewicht. Als Konsequenz hieraus wurde Mitte der 1980er Jahre der bleifreie Kraftstoff und der Katalysator für Ottomotoren verbindlich eingeführt, sowie 1991 auf europäischer Ebene die ersten Emissionsnormen für alle Straßenfahrzeuge (Euro-I-Standard) erlassen. Zunächst konzentrierten sich diese Maßnahmen auf die Reduktion von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Blei. Später traten, bedingt durch die Reduktion dieser Schadstoffe sowie durch neue epidemiologische Erkenntnisse, Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Feinstaub (PM) in das Zentrum der wissenschaftlichen Aufmerksamkeit.

Abbildung IV.2.2 vergleicht Struktur und Höhe der Schadstoffemissionen im Jahr 2007 mit dem Jahr 1997. Hiernach lassen sich mehrere Gruppen von Emissionen entsprechend deren Reduktionsmuster unterscheiden:

Verkehrlich hochrelevante Substanzen mit jedoch großem Reduktionspotenzial: Hierzu zählen vor allem Stickstoffoxide (NO), Kohlenmonoxid (CO) und mit Abstrichen flüchtige organische Verbindungen (VOC). Durch Filtertechnologien, Katalysatoren und die Optimierung innermotorischer Verbrennungsprozesse lassen sich diese Substanzen relativ gut aus dem Abgasstrom absorbieren. Trotz des stark gestiegenen Verkehrsaufkommens, insbesondere der Lkw, ließen sich so in den letzten 10 Jahren etwa 50 % der absoluten Emissionsmenge reduzieren.

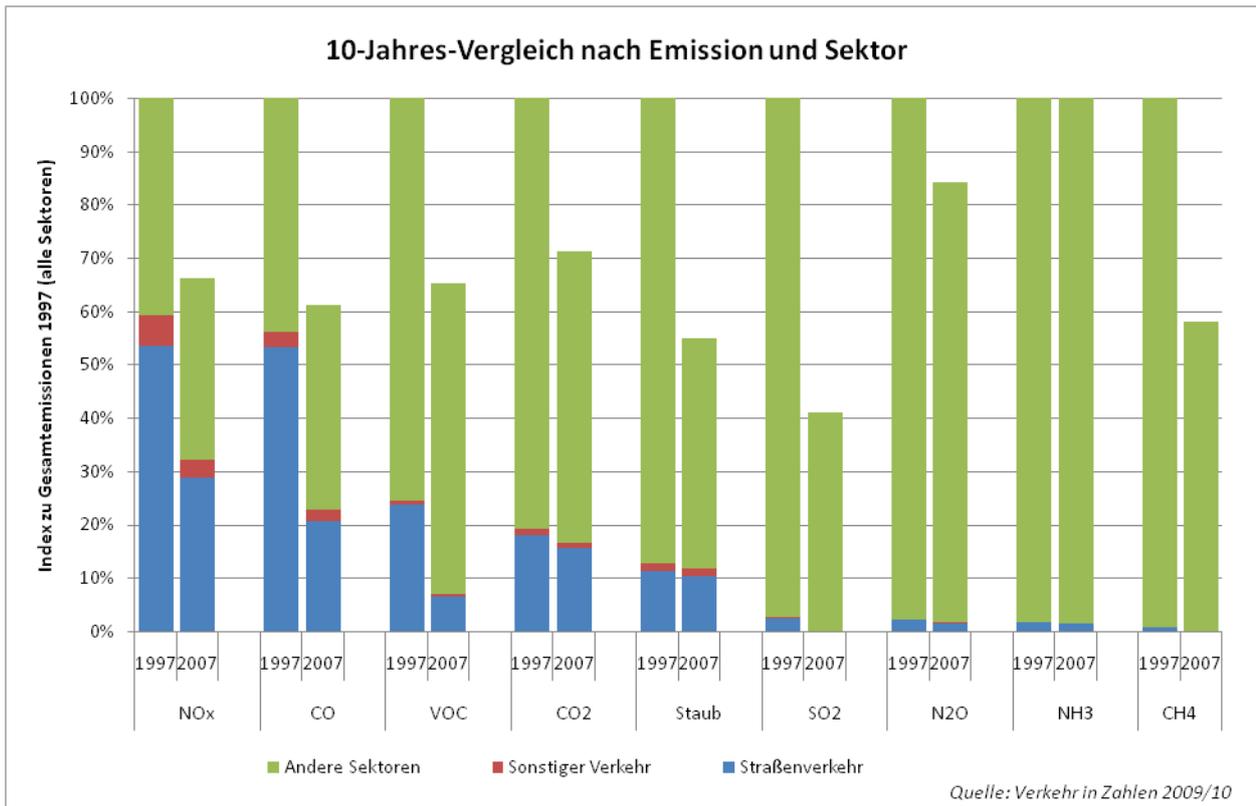


Abb. IV.2.2.: Reduktion der Schadstoffklassen nach Wirtschaftssectoren 2007 im Vergleich zu 1997

Verkehrlich durchschnittlich bedeutsame, aber schlecht zu reduzierende Substanzen: Hierzu zählen vor allem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Feinstaub. Diese sind entweder direkt mit der verbrauchten Energie gekoppelt oder entstehen durch Prozesse außerhalb des Antriebssystems, wie etwa Reifenabrieb, Bremsen oder die Wiederaufwirbelung von Bodenstaub.

Verkehrlich wenig bedeutsame Stoffe mit unterschiedlichem Reduktionspotenzial: Hierzu zählen schließlich Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Distickstoffmonoxid (N<sub>x</sub>O), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>).

Analysen zu den Umwelteffekten des Verkehrs werden unter anderem durch die Modelle ASTRA des Fraunhofer-ISI und TREMOD des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) im Auftrag des Umweltbundesamtes (Knörr u. a. (2010)) durchgeführt.

## IV.2.2. Bewertung der externen Effekte des Verkehrs

### IV.2.2.1. Einführung

Bereits frühe wissenschaftliche Arbeiten zu den externen Effekten des Verkehrs (Consult (1990), Mauch und Rothengatter (1994), Friedrich und Bickel (1995) oder Huckestein und Verron (1996)) quantifizierten die sozialen Kosten insbesondere des Straßenverkehrs durch Luftschadstoffe, Klimagasemissionen, Unfälle, Lärm und andere unerwünschte Effekte. Weitere Studien auf internationaler Ebene wie das ExternE-Projekt im Auftrag der Europäischen Kommission und dessen Nachfolgeaktivitäten (IER (2004), UNITE (Nash (2003)), Maibach und Rothengatter (2000), Maibach u. a. (2008)) verfeinerten die Methoden, lieferten tiefere ökonomische Bewertungsansätze und verfolgten den Vergleich der Verkehrsträger über die vergangenen eineinhalb Jahrzehnte. Methodisch hat sich dabei der „Impact Pathway Approach“ durchgesetzt, welcher die Entstehung der Emissionen, deren Ausbreitung und Umwandlung in der Atmosphäre bis zum Eintrag bei Mensch und Natur abbildet. Während sich die Entstehung der Schadstoffe über digitalisierte Verkehrsnetze mit Verkehrsbelastungsdaten und Flottenemissionsfaktoren recht gut abbilden lässt, bereitet die Ausbreitungs- und Umwandlungsmodellierung größere Schwierigkeiten. Hier sind wetterabhängige chemische Prozesse in der Atmosphäre, Windgeschehen und die Lage potenziell betroffener Siedlungen zu beachten. Modelle zur Beschreibung dieser Effekte sind das Ecosense-Modell des IER, Chimer oder der Vorschlag von Gühneemann (1998) zur Neuorientierung der Bundesverkehrswegeplanung. Die ökonomische Bewertung greift schließlich auf medizinisch-statistische Funktionen von Morbidität und Mortalität durch Schadstoffeinträge zurück, und bewertet diese über die „Years of Life Lost“ (YOLL) und den statistischen Wert eines menschlichen Lebens, welcher sich nach aktuellem Konsens um 1,6 Mio. Euro bewegt.

Die Umweltfreundlichkeit, Klimaverträglichkeit und Sicherheit der Verkehrssysteme hängt von vielen Einflussfaktoren ab:

- Verkehrsmittel unterscheiden sich in ihren spezifischen Wirkungen erheblich. Während Sicherheits- und Klimawirkung den Straßenverkehr prägen, sind dies Lärm und Vorketteneffekte bei der Bahn sowie Klimaemissionen und Lärm im Luftverkehr.
- Regionales Umfeld: In der Regel steigen die negativen Wirkungen des Verkehrs deutlich mit höherer Bevölkerungsdichte, da hier mehr Menschen von Lärm und Abgasen betroffen sind. Dies gilt jedoch nicht für Klimateffekte, welche global wirken und die ärmeren Regionen der Welt besonders treffen.
- Antriebstechnologie: Die Antriebstechnologie ist entscheidend für die Emissionen, Lärmwirkungen oder die Sicherheit der eingesetzten Fahrzeuge. So lassen sich z. B. durch den Einsatz von E-Fahrzeugen mit Strom aus erneuerbaren Quellen die Hälfte der Umwelt- und Klimawirkungen reduzieren.
- Fahrzeug- und Kraftstoffproduktion: Insbesondere bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Autos, Züge) spielt die Vorkette durch Produktion von Kraftstoff, Elektrizität, Fahrzeugen oder Batterien eine entscheidende Rolle. Hierzu zählen die Umweltbelastungen bei der Gewinnung von Metallen oder Öl sowie die langfristigen Risiken der nuklearen Stromerzeugung.
- Reiseweite: Insbesondere im Flugverkehr, bei dem ein Großteil von Unfällen, Lärm und Luftschadstoffen während der Start- und Landephase entstehen, nimmt die Umwelteffizienz mit zunehmender Distanz deutlich zu. Bis etwa 800 km bietet die Bahn deutliche Vorteile gegenüber dem Luftverkehr.
- Besetzungsgrad: Für alle Verkehrsträger gilt, je besser Fahrzeuge ausgelastet sind, desto besser stellt sich deren Umweltbilanz je gefahrenem Personen- oder Tonnenkilometer dar. Hierin besteht ein Systemnachteil für die Bahn, da sich diese, um eine Grundversorgung mit Mobilitätsleistungen zu gewährleisten, an Fahrplanknoten orientiert und entsprechend auch schwach ausgelastete Züge fährt.

Durch die strengen Euro-Emissionsnormen im Straßenverkehr, die umweltorientierte Staffelnung der Lkw-Autobahnmaut, Gurtpflicht und Sicherheitstechnologien in Fahrzeugen, Schallschutzwände und leisere Fahrzeuge haben sich die Umwelt- und Lärmwirkungen sowie die Sicherheit insbesondere im Straßenverkehr in den letzten Jahrzehnten deutlich verbessert. Dies gilt jedoch weit weniger für den Ausstoß von Klimagasen, welcher viel stärker an den Energiebedarf der Verkehrsmittel gekoppelt ist. Optionen für die Zukunft bestehen in der Verwendung alternativer Antriebssysteme auf der Basis regenerativer Energien, wie Elektro oder Wasserstoff, nicht zuletzt aber auch in der Reduktion des Verkehrsaufkommens durch intelligente Raum- und Siedlungsplanung.

Luftschadstoffe und Klimagase spielen eine wichtige Rolle bei der Diskussion der Nutzen und Kosten der Mobilität. Während die Nutzenseite unbestritten ist, existieren aber noch andere Schädwirkungen des Verkehrs, die allerdings regional und nach Verkehrsträgern sehr unterschiedlich zu Tage treten. Am bedeutendsten hieraus sind volkswirtschaftliche Schäden und individuelles Leid durch Getötete und Verletzte im Verkehr, was vor allem im Straßenverkehr eine dominante Rolle einnimmt. Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und gesundheitliche Schäden durch dauerhaft hohe Lärmpegel sind dagegen ein spezifisches Problem des Bahnverkehrs nachts und in der Nähe von Siedlungen. Die rechnerisch höchsten Kosten entstehen jedoch durch Verkehrsstaus, welche letztendlich jedoch extern für den einzelnen Verkehrsteilnehmer, jedoch intern für den jeweiligen Verkehrsbereich verbleiben.

Die folgende Abbildung IV.2.3 zeigt schematisch die Größenordnungen und Bandbreiten ausgewählter Effekte jeweils nach relevanten Größen wie Fahrzeugtyp (Emissionen), Ortslage oder Tageszeit (Lärm und Stau).

Die Daten sind dem Handbuch für die Ermittlung externer Kosten der EU (Mairbach u. a. (2008)) entnommen und spiegeln den aktuellen Wissensstand und die statistischen Gegebenheiten des Jahres 2008 wieder. Bei einer weiteren Reduktion der Unfallraten auf deutschen Straßen und der Einführung weiterer Euro-Emissionsnormen für Pkw und Lkw kann sich dieses Bild jedoch für den Zielhorizont 2020 verschieben.

Externe Kosten pro Pkw-Kilometer nach Verkehrssituation

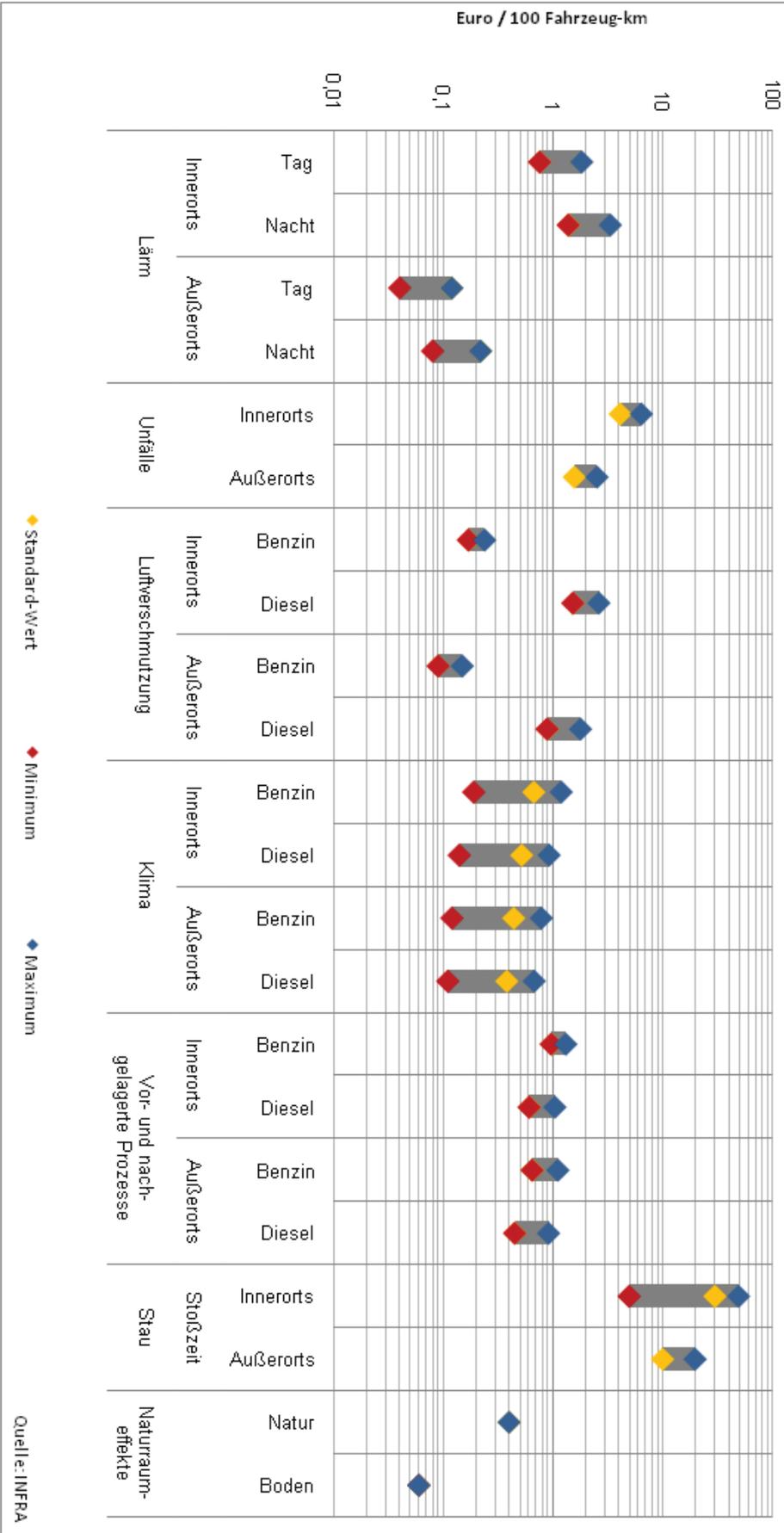


Abb. IV.2.3.: Variation externer Kosten des Straßenverkehrs nach zentralen Einflussgrößen

Quelle: INFRA

Die folgenden Graphiken aus Schreyer u. a. (2007) ziehen den Vergleich zwischen den Kostenkategorien und den Verkehrsträgern im Personenverkehr (Abbildung IV.2.4) und im Güterverkehr (Abbildung IV.2.5).

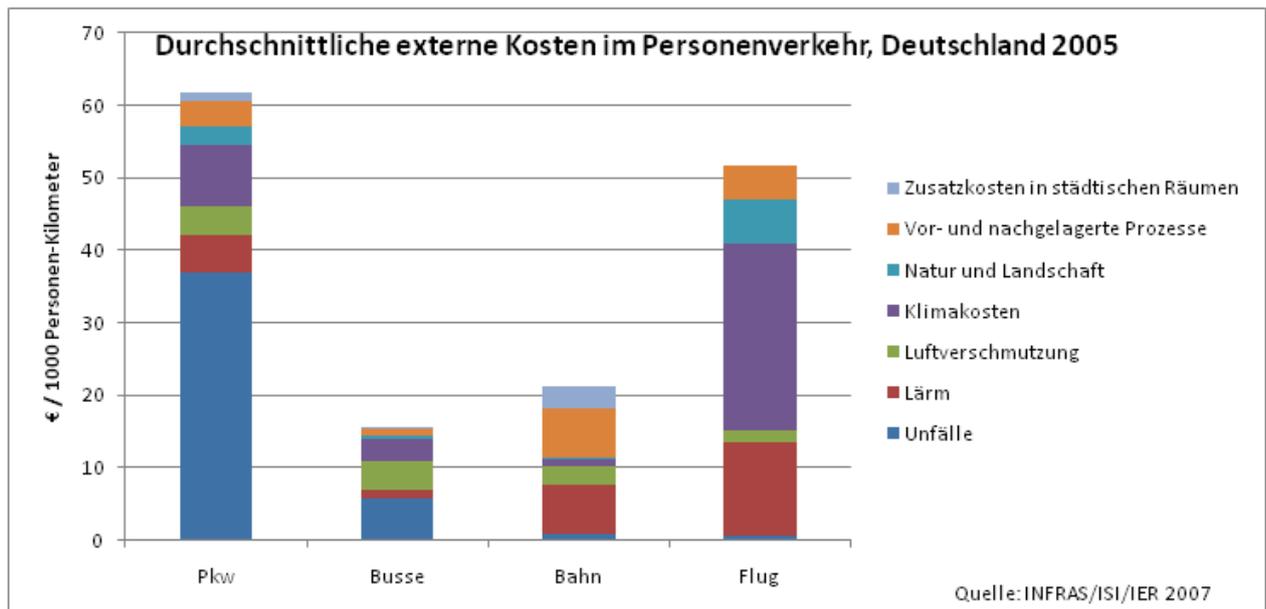


Abb. IV.2.4.: Vergleich durchschnittlicher externer Kosten im Personenverkehr

Die Zahlen zeigen, dass im motorisierten Individualverkehr (Pkw), Luftverschmutzung und Klimagasemissionen zwar eine wichtige, jedoch nicht die entscheidende Rolle bei der Bewertung des Verkehrs spielen. Relevant sind hier vor allem Unfälle, während der Schienenverkehr am stärksten von Lärm sowie Vor- und Nachlaufeffekten betroffen ist. Letztere beinhalten unter anderem Umwelt- und Klimaeffekte des Kraftwerksparks für die Erzeugung von Bahnstrom und damit doch einen wesentlichen Anteil an den hier untersuchten Emissionen. Im Luftverkehr spielen hingegen Klimaemissionen eine wesentliche Rolle, während die Luftschadstoffe bei Start und Landung kaum von einer nennenswerten Größenordnung sind. Die starke Klimabedeutung hängt jedoch teilweise mit der Systemabgrenzung zusammen, welche hier alle internationalen Flüge von und nach Deutschland umfasst.

Im Güterverkehr, und hier vornehmlich per Lkw, spielt das Thema Luftschadstoffe noch eine wesentlich größere Rolle als in Personenverkehr. Luftschadstoffe

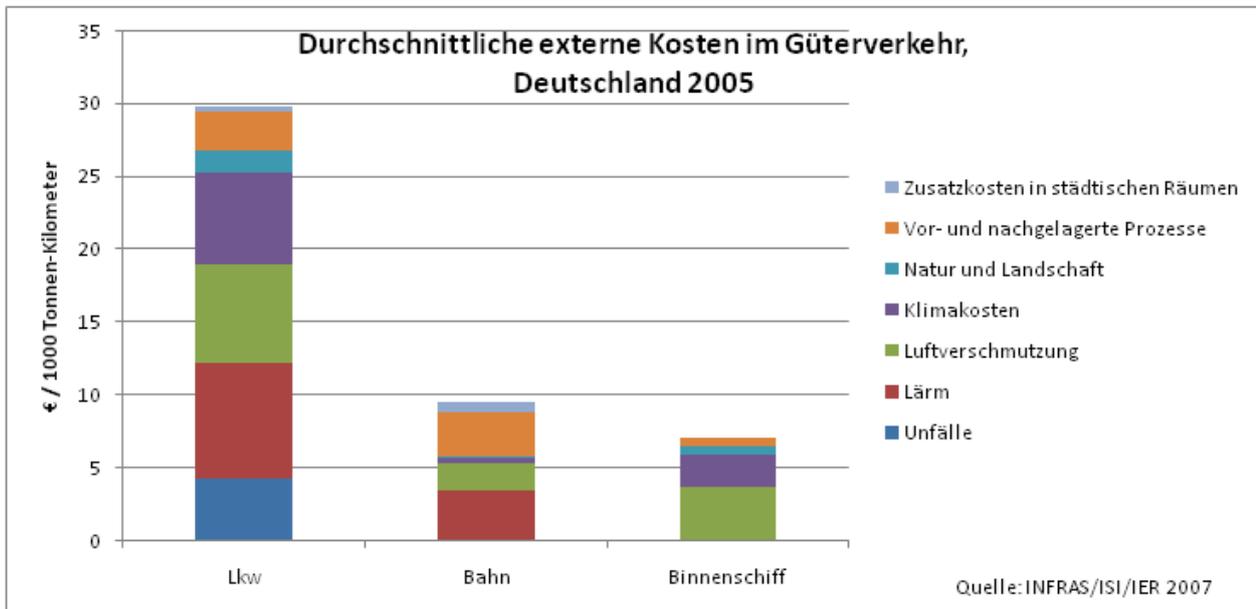


Abb. IV.2.5.: Vergleich durchschnittlicher externer Kosten im Güterverkehr

und Klimagase stellen mehr als 50% der externen Kosten des Straßengüterverkehrs in Deutschland und dominieren den Frachtverkehr per Binnenschiff.

#### IV.2.2.2. Kosten durch die Emission von Treibhausgasen

Für die Bewegung von Gütern und Personen benötigen wir Energie. Diese kann durch Muskelkraft, Brennstoffe oder elektrische Energie erzeugt werden. Brennstoffe und Strom lassen sich wieder in verschiedene Formen untergliedern, von welchen jede einen spezifischen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweist.

Die Menge an benötigter Energie hängt von der Beschaffenheit des Weges, der zu bewegenden Masse und vom Wirkungsgrad von Energiespeicherung und Antrieb ab. Zu berücksichtigen sind CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Produktion von Fahrzeugen und Kraftstoffen, sowie die Emissionen während der Fahrt.

Um die Erderwärmung in diesem Jahrhundert nicht über 2°C ansteigen zu lassen, ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Sektoren um 80% bis 2050 nötig. Allein im Verkehrsbereich peilt die EU eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 60% an.

Durch eine Kombination aus Technologie, politischen Maßnahmen und Verhaltensänderungen in der Gesellschaft bieten sich durchaus Potenziale, das 80% -Ziel im Verkehr zu erreichen. Im Bereich von Verkehr und Mobilität werden diskutiert:

- **Effizientere Motoren:** Dies betrifft alle Bereiche des motorisierten Verkehrs. Eine Herausforderung stellt dabei die gleichzeitige Steigerung von Energieeffizienz und die Reduktion des Schadstoffausstoßes dar.
- **Einsatz alternativer Energieträger wie Biodiesel, Bioethanol, Wasserstoff oder Strom:** Diese müssen jedoch regenerativ erzeugt werden, um tatsächlich einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion zu leisten.
- **Fahrzeugtechnik, wie Leichtbau und Aerodynamik:** Insbesondere der Wechsel zu kleineren, leichteren Fahrzeugen könnte den Trend zu einem immer größeren Energieverbrauch insbesondere der Pkw umkehren.
- **Beeinflussung des Mobilitätsverhaltens von Personen und logistischer Konzepte durch Information sowie durch die Bereitstellung geeigneter Infrastrukturen:** Hier ist insbesondere die Förderung von ÖPNV, Fuß- und Radverkehr sowie die Unterstützung lokaler Wirtschaftskreisläufe zu nennen.
- **Regulierung und Anreizsysteme, wie die Einrichtung urbaner Umweltzonen, Parkraumbewirtschaftung, Treibhausgasabhängige Fahrzeugsteuern, Gebühren und Mauten** können neue Antriebs- und Fahrzeugkonzepte effizient fördern, sowie das Mobilitätsverhalten von Personen und Unternehmen beeinflussen.

Letztendlich verbleibt ein großer Teil der Reduktionspotenziale bei der CO<sub>2</sub>-Effizienz der Stromerzeugung. Diese ist entscheidend für die Klimafreundlichkeit der Elektromobilität, der Fahrzeugproduktion und des öffentlichen Verkehrs.

Die Bewertung von Treibhausgasemissionen ist komplex. Eine Option besteht in der Erfassung der globalen Schäden durch die Klimaänderung. Dies ist wegen deren vielschichtigen Wirkungen äußerst schwierig. Einfacher ist die Schätzung der

Kosten von Reduktionsmaßnahmen, welche jedoch von der Wahl der Zielvorhaben dominiert wird.

### IV.2.2.3. Kosten der Luftverschmutzung

Im Straßenverkehr entstehen direkte Luftschadstoffemissionen durch die Verbrennung von Kraftstoffen, Brems- und Reifenabrieb sowie Aufwirbelung von Staub. Auch während der vorgelagerten Prozesse zur Bereitstellung des Kraftstoffs für Verbrennungsfahrzeuge bzw. des Stroms für Elektroautos werden Luftschadstoffe freigesetzt. Des Weiteren fallen während der Produktion der Fahrzeuge Luftschadstoffemissionen an.

Außer dem Verkehr gibt es noch andere Emissionsquellen von Luftschadstoffen. Dazu zählen vor allem die Industrie, die Landwirtschaft und private Haushalte. Da in der Luft chemische Umwandlungsprozesse stattfinden, beeinflusst die gesamte Luftzusammensetzung jedoch die durch den Verkehr erzeugte Schädigung.

Seit Anfang der 1980er Jahre wurde ein deutlicher Rückgang bei den Emissionen des Straßenverkehrs verzeichnet. Dies betrifft vor allem die in den Abgasen enthaltenen Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), flüchtige Kohlenwasserstoffe ohne Methan (NMVOC), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Feinstaub ( $\text{PM}_{10}$ ). Trotzdem besitzen die verkehrsbedingten Luftschadstoffe noch immer einen großen Anteil an den Gesamtemissionen.

Adverse Gesundheitseffekte entstehen vor allem durch Feinstaub ( $\text{PM}_{10}$ ). Dieser verursacht ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko sowie respiratorische und kardiovaskuläre Erkrankungen. Seit 2005 wird die EG-Luftqualitätsrahmenrichtlinie in der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) umgesetzt. Diese schreibt für  $\text{PM}_{10}$  einen Immissionsjahresgrenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und einen Tagesgrenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zum Schutz der Gesundheit vor. Verkehrsnahe Messungen haben jedoch gezeigt, dass die Tagesgrenzwerte häufig überschritten werden.

Die als Lungenreizgase eingestuften Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) können die Infektionsanfälligkeit steigern und Lungenfunktionsstörungen auslösen. Außerdem gehört  $\text{NO}_x$

gemeinsam mit den flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) zu den Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon. Ozon ist ein sehr starkes Reizgas, das selbst in geringen Konzentrationen die Schleimhäute der Augen und den gesamten Atemtrakt angreift.

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit schreibt die 22. BImSchV seit 2010 auch für  $NO_2$ -Immissionen einen zulässigen Grenzwert von  $40 \mu g/m^3$  im Jahresmittel vor. Es wird aber nicht erwartet, dass dieser europaweit geltende Grenzwert ohne weitere Reduktionsmaßnahmen eingehalten werden kann. Besonders in verkehrsreichen Gegenden in Großstädten werden immer wieder höchste Konzentrationen an  $NO_x$  gemessen.

### IV.2.3. Optionen zur Schadstoffreduktion

Die Reduktion von Klimagasen und Umweltschadstoffen im motorisierten Individualverkehr (Pkw, Lkw, Busse, Zweiräder, etc.) lassen sich motorseitig, durch bessere Kraftstoffe oder durch eine angepasste Fahrzeugtechnik erreichen. Eine Gesamtbewertung der Reduktionspotenziale bis 2050 unter der Maßgabe verschiedener Optionen wurde durch das EU-finanzierte Forschungsprojekt GHG-TranspoRD (Akkermans u. a. (2010)) vorgenommen. Im Ergebnis ergibt sich eine Minderung des  $CO_2$ -Ausstoßes von Pkw bis 2030 um 40 % und bei Lkw um knapp 30 % durch technische Maßnahmen an Motor und Fahrzeugen. Zusätzliche Reduktionspotenziale in ähnlicher Größenordnung ergeben sich noch durch nationale und regionale politische Anreize. Zu beachten ist dabei jedoch, dass sich Technologie und Politik nicht einfach addieren lassen, da Kernbestandteil politischer Strategien auch die Förderung oder Regulierung bestimmter Technologien sein kann. Weitere Hinweise zur Emissionsminderung von Klimagasen im Verkehr liefern King (2007), McKinsey (2008), TNO u. a. (2008) oder die Forschungsvorhaben im Rahmen des Integrierten Energie- und Klimapakets (IEKP) (Fraunhofer-ISI u. a. (2008)) oder der Reihe *Politikszenerarien für den Klimaschutz* (Matthes u. a. (2009)) im Auftrag von BMU und UBA.

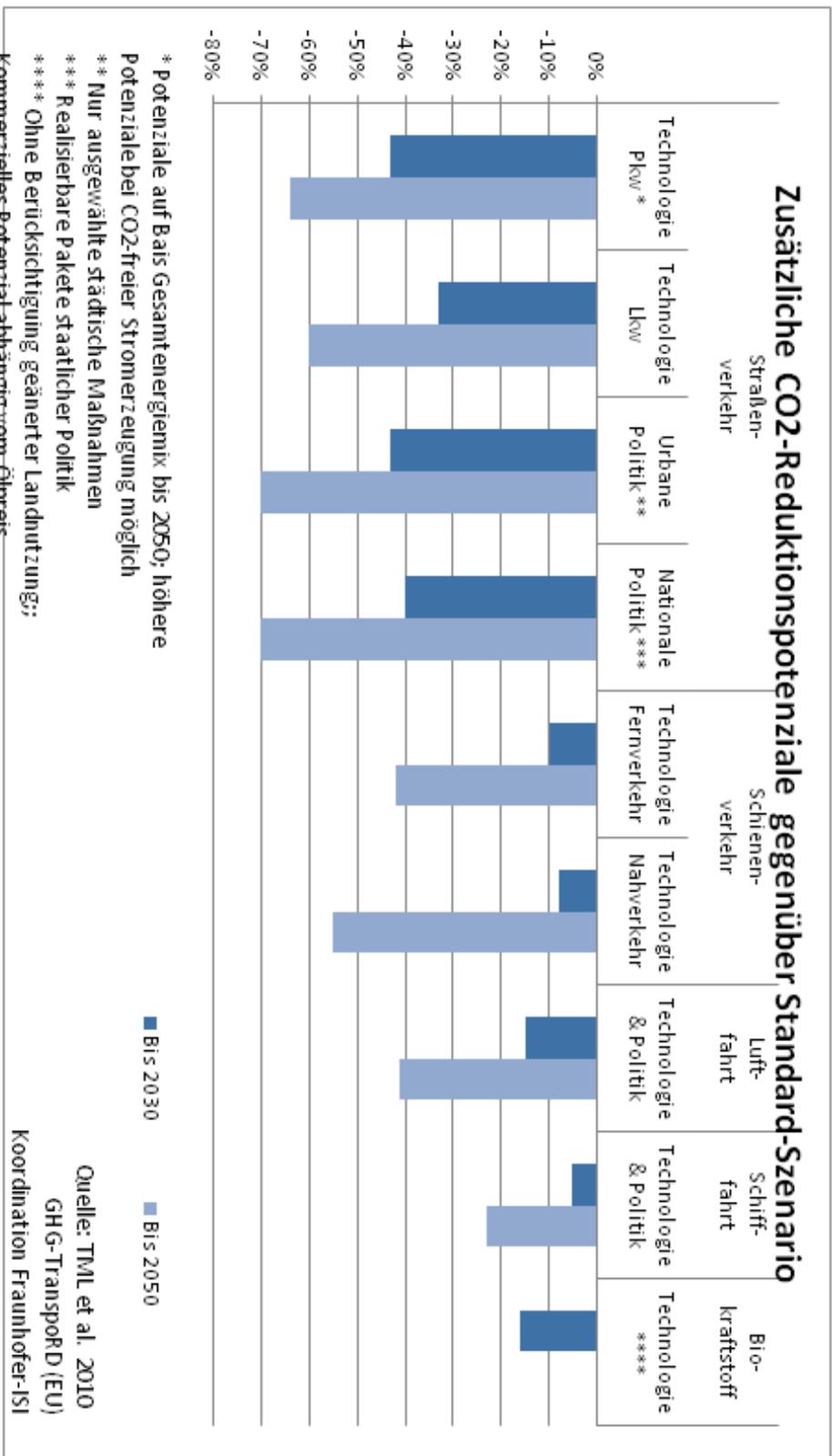


Abb. IV.2.6.: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale der Verkehrsträger

Tab. IV.2.1.: Schadstoff-Emissionsfaktoren für Lkw

Tier	Einführung	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	CO <sub>2</sub> <sup>1</sup>
<b>Lkw-Emissionsstandard (g/kWh)</b>						
Euro-I	Okt. 1992	4,5	1,1	8	0,36	
Euro-II	Okt. 1996	4	1,1	7	0,25	
Euro-III	Okt. 2000	2,1	0,66	5	0,1	
Euro-IV	Okt. 2005	1,5	0,46	3,5	0,02	
Euro-V	Okt. 2008	1,5	0,46	2	0,02	
Euro-VI	Jan. 2013	1,5	0,13	0,4	0,01	
<b>Relative Emissionen zu 2010</b>						
2020 / 2010	Euro-VI / Euro-V	100%	28%	20%	50%	90%
2030 / 2010	2020 - 25%	75%	21%	15%	38%	75%
<b>Emissionen Bahn</b>						
2020 / 2010 <sup>2</sup>		70%	70%	70%	70%	90%
2030 / 2010 <sup>2</sup>		40%	40%	40%	40%	80%

<sup>1</sup> Keine Emissionsstandards; Annahmen zur Reduktion bis 2020 / 2030 nach Akkermans u. a. (2010).

<sup>2</sup> Eigene Schätzung unter der Maßgabe der Abschaltung älterer AKW.

Für die übrigen Verkehrsträger (Schiene, Luftfahrt, Schifffahrt) ermittelt die Studie nur sehr viel geringere Reduktionspotenziale für den Ausstoß von Klimagasen. Diese bewegen sich bis 2030 im Bereich von 8% bis 15%. Lediglich langfristig ist danach eine Reduktion bis 40% gegenüber heute zu erwarten. Die Ergebnisse der Studie sind in Abbildung IV.2.6 dargestellt.

Prognosewerte für die Entwicklung der Emission einzelner Luftschadstoffe und Klimagase im Straßenverkehr liefert das Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) für den Straßenverkehr (HBEFA (2010)). Auf der Grundlage von Emissionsmessungen im Kalt- und Warmbetrieb der Fahrzeuge und der Entwicklung der Emissionsklassen im Straßenbild liefert das Handbuch Emissionswerte nach Fahrzeugtyp und Verkehrssituation bis 2030. Exemplarisch für den Lkw-Verkehr sind in Tabelle IV.2.1 die Emissionsklassen, deren vorgeschriebene Grenzwerte und Prognosen bis 2030 angegeben. Ähnliche Aufstellungen existieren auch für den Pkw-Bereich, jedoch nicht für Bahn, Luftfahrt und Schifffahrt.

Bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen greift das HBEFA auf Messwerte standardisierter Fahrzyklen zurück. Im Ergebnis ergibt sich der oben angesprochene ansteigende Verlauf von Spritverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei weiterer Marktdurchdringung schadstoffarmer Lkw. Abbildung IV.2.7 gibt diesen wieder.

Ausgehend von diesen Prognosen wird in den folgenden Abschnitten untersucht, welche weiteren Potenziale technischer und nicht-technischer Natur existieren, um die Schadstoffemissionen des Verkehrs weiter zu senken. Hierzu wird eine Technologiedatenbank erstellt und das systemdynamische Verkehrs- und Wirtschaftsmodell ASTRA des Fraunhofer ISI angepasst. Vorgehensweise und Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Zunächst wird jedoch auf die Szenarien, welche den konkreten Maßnahmen zu Grunde liegen, eingegangen.

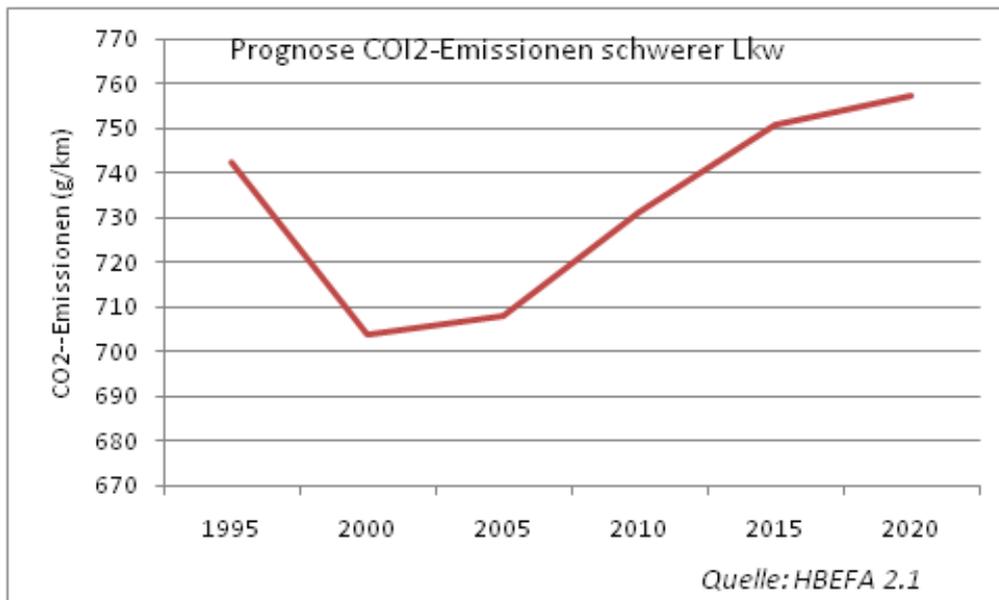


Abb. IV.2.7.: Prognose der CO<sub>2</sub>-Emissionen schwerer Lkw bis 2020

### **IV.3. Szenarien zur Emissionsminderung**

Im vorangehenden Kapitel wurden die Mechanismen zur Minderung von Schadstoff- und Klimagasemissionen im Verkehr benannt. Dies sind: Technische Verbesserung an Fahrzeugen und Anlagen der Energieerzeugung, Verhaltensänderungen der Verkehrsteilnehmer, sowie Politische Anreiz- und Regulierungsmaßnahmen zur Stimulierung von technischer Entwicklung und Nutzerverhalten.

Technische Reduktionspotenziale werden in Form von Lernkurven und Parametern des technischen Fortschritts im Analysemodell ASTRA (siehe folgende Abschnitte) betrachtet. Hierzu wurde eine unterstützende Technologiendatenbank für alle Verkehrsträger implementiert, welche im Folgenden in einem separaten Abschnitt vorgestellt wird. Wie technologische Maßnahmen bilden auch Verhaltensmuster der Nutzer, welche anhand statistischer Daten des Mobilitäts- und Konsumverhaltens geschätzt wurden, einen integralen Bestandteil des ASTRA-Modells. Für beide Fälle werden entsprechend keine gesonderten Szenarien definiert; vielmehr werden politische Größen wie Regulierung, Marktmechanismen (Preispolitik) und weitere Anreizsysteme zu deren Stimulation durch mehrere Szenarien untersucht.

Die Szenarien werden in jeweils zwei Varianten oder Implementierungstiefen untersucht. In einer moderaten Implementierung wird eine zielgerichtete Fortsetzung des aktuell diskutierten oder bereits geplanten verkehrspolitischen Kurses unterstellt. In dieser Variante werden EU-Abgasnormen entsprechend der Planungen fortgeführt, moderate Tempobeschränkungen auf BAB eingeführt oder die Förderungen im Bereich des Mobilitätsmanagements moderat angehoben.

Gruppen von Instrumenten	Modellierbarkeit		Parameter	Moderat		Stringent	
	Straße	Andere		Straße	Andere	Straße	Andere
Regulatorische Instrumente							
Emissionsstandards	++	+	Abgasnormen / Flottengrenzwerte	→	→	↗	↗
Tempolimit	++	++	Generelle Begrenzung	Euro6 2014 ↗ Nur BAB	Stagella/B ↗ Schiff 22 Km.	Euro6+CO2-Limit ↗ Alle Straßen	Flug, Schiff ↗ Schiff 20 km.
Zugangsregulierung	+	+	Umweltzonen, sensible Gebiete, Häfen und Flugh. nach Em. Klasse	↗ Ausgew. Gebiete	→ Standardisierung	↗ Großflächig	↗ Strenge Grenzsw.
Marktmechanismen							
Preisinstrumente	++	++	Straßen-/Citymaut, Trassenpreis, Lande- u. Hafengebühren	↗ FSstr., ausg. Städte	↗ Int. Flugh.	↗ Alle Fz. u. Str.	↗ Bahn, alle Flugh.
CO2-Emissionshandel	0	0	Luft-/Schifffahrt, Straße	↗ Upstream	↗ Großz. Konting.	↗ Downstream	↗ Restr. Konting.
Fiskal- / Steuerpolitik	++	++	Subventionsabbau, Kerosinsteuer	→ mod. Reform	↗ norm. MWSt.	↗ konseq. Reform	↗ Kerosinsteuer
Anreizpolitik							
Forschungsförderung	+	+	Fahrzeuge, Antriebe	→	→	↗	↗
Mobilitätsmanagement	0	0	Koop. integrierte Systeme, Qualität, Information, ...	↗ Mittel ausweiten	↗ Mittel ausw.	↗ gr. Feldversuche	↗ gr. Feldversuche
Investitionspolitik	+	+	Straßenrückbau, Schienen- / Hafenausbau	↗ Mob. Zentralen ↗ Stadumbau	↗ ausg. Projekte ↗ mod. Inv.	↗ ÖV-Ausbau ↗ Fstr.-Rückbau	↗ Flächendeckend ↗ massiv Bahn

Abb. IV.3.1.: Überblick über die Szenarien im Bereich Verkehr

In einer verschärften oder “stringenten“ Variante werden hingegen deutliche verkehrspolitische Akzente gesetzt. Dies beinhaltet unter anderem eine drastische Absenkung von Höchstgeschwindigkeiten auf allen Netzen, die vollständige Internalisierung der externen Kosten in allen Verkehrsträgern sowie ein integriertes und intermodales Mobilitäts- und Investitionsmanagement. Eine Übersicht über die implementierten Szenarien gibt Abbildung IV.3.1.

Die getroffenen Annahmen in den Szenarien werden in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt. Weitere Details zur konkreten Implementierung in ASTRA und den daraus resultierenden Ergebnissen sind den entsprechenden Abschnitten unten zu entnehmen.

### **IV.3.1. Vorstellung der verschiedenen Maßnahmengruppen (Technik, Regulierung, Pricing)**

#### **IV.3.1.1. Regulatorische Maßnahmen**

**a) Emissionen** Staatliche Maßnahmen der Marktregulierung werden auf den Bereichen Schadstoff-Emissionsstandards, Geschwindigkeitsbeschränkungen und Zufahrtsregeln für sensible Innenstadtbereiche und Naturräume betrachtet. Die geplanten Emissionslimitierungen sind exemplarisch für Lkw in Tabelle IV.2.1 dargestellt. Für Pkw mit Otto- und Dieselantrieb werden diese entsprechend der derzeitigen Planung angenommen.

In der moderaten Variante wird unterstellt, dass der Euro-6-Standard ohne zusätzliche CO<sub>2</sub>-Regulierung 2014 verbindlich eingeführt wird. Im stringenten Fall wird zusätzlich eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Pkw auf 97 g/km bis 2020 unterstellt.

Im Bahn- und Schiffsverkehr werden die Emissionen im Rahmen der Richtlinie zu Non Road Mobile Machinery NRMM 2004/26/EC (EU (2004)) geregelt. Mit den aktuell gültigen Standards Stage-III-A und III-B werden Kohlenmonoxid (CO), die Summe aus Kohlenwasserstoffen (HC) und Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) sowie Partikel und Staub (PM) reguliert. Eine Zwischenbilanz der EU zu

Tab. IV.3.1.: Euro-Emissionsstandards für Pkw (g/km)

Standard		CO	HC	NMHC <sup>1</sup>	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	Staub
<b>Diesel-Pkw</b>							
Euro 1	Jul 1992	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	0,14 (0,18)
Euro 2	Jan 1996	1,0	-	-	-	0,7	0,08
Euro 3	Jan 2000	0,64	-	-	0,50	0,56	0,05
Euro 4	Jan 2005	0,50	-	-	0,25	0,30	0,025
Euro 5	Sep 2009	0,500	-	-	0,1810	0,230	0,005
Euro 6	Sep 2014	0,500	-	-	0,080	0,170	0,0025
<b>Otto-Pkw</b>							
Euro 1	Jul 1992	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	0,14 (0,18)
Euro 2	Jan 1996	2,2	-	-	-	0,05	
Euro 3	Jan 2000	2,3	0,20	-	0,15	-	
Euro 4	Jan 2005	1,0	0,10	-	0,08	-	
Euro 5	Sep 2009	1,000	0,100	0,068	0,060	-	0,005 <sup>2</sup>
Euro 6	Sep 2014	1,000	0,100	0,068	0,060	-	0,005 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Entspricht im Wesentlichen VOC (flüchtige organische Verbindungen).

<sup>2</sup> Nur für Fahrzeuge mit Direkteinspritzung; Quelle: www.wikipedia.org.

der NRMM-Regulierung (EU / IES (2008)) empfiehlt eine Flexibilisierung und Vereinfachung der Regeln insbesondere für Anlagen in Lokomotiven und Triebfahrzeugen der Bahn (zu Grundlagen der Dieselemissionen im Bahnverkehr vgl. UIC / CER (2006)). Die Minderungspotenziale werden, unter Maßgabe der Laufzeit von Dieselaggregaten in Schiffen und Lokomotiven zwischen 20 und 30 Jahren implizit in den Technologiefunktionen des ASTRA-Modells berücksichtigt. Im Flugverkehr werden Emissionsgrenzwerte durch Anhang 16 des Vertrages von Chicago über Regulierungen der internationalen Luftfahrt geregelt (ICAO (2006)).

Im moderaten Szenario werden die Emissionsverläufe im Bahn-, Flug- und Schiffsverkehr auf der Grundlage einfacher Flottenbetrachtungen wie vorgesehen implementiert. In der schärferen Szenariendefinition wird eine zusätzliche Absenkung von Partikel- und SO<sub>2</sub>-Emissionen für neue Aggregate für Schiffe und Flugzeuge angenommen.

**b) Tempolimit** Gegenwärtig sind wesentliche Teile des Bundesautobahnnetzes permanent oder temporär geschwindigkeitsbegrenzt. Diese verkehrsregulierende Maßnahme wird im moderaten Szenario zu einem generellen Tempolimit von 130 km/h auf BAB konkretisiert. Ferner wird im Schiffsverkehr, nicht zuletzt getrieben

durch angenommene steigende Energiepreise, eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeiten um 25 % unterstellt.

Im stringenten Szenario wird zusätzlich von erheblichen Tempobeschränkungen auf allen Straßen sowie von einer generellen Absenkung der Reisegeschwindigkeiten von Seeschiffen im Umkreis von 20 km um die Küstengebiete ausgegangen. Eine Regulierung im Bahnbereich wird nicht unterstellt.

**c) Zugangsregulierung** Das Maßnahmenbündel “Zugangsbeschränkung“ setzt sich aus der Ausweitung von Umweltzonen um Stadtkerne, die Zugangskontrolle zu ökologisch sensiblen Gebieten durch den motorisierten Individualverkehr sowie aus minimalen Emissionsstandards für die Benutzung wichtiger See-, Binnen- und Flughäfen zusammen. Da eine geographisch exakte Bestimmung dieser Zugänglichkeiten mittels des ASTRA-Modells nicht realisiert werden kann, wird hier von einer grundsätzlichen Kostenzunahme nach Emissionsstandards und Entfernungsband ausgegangen.

### IV.3.1.2. Marktmechanismen

Marktmechanismen setzen sich aus direkten preislichen Anreizen, etwa Straßenbenutzungsgebühren, Emissionshandelssystemen und allgemeinen Steuern zusammen. Über die Kosten für den Transport wirken diese nur mittelbar über Konsum- und Verkehrsverhaltensmodelle auf die Verkehrsmenge und die Zusammensetzung von Flotten.

**a) Preisinstrumente** Selbst im moderaten Fall wird eine Bepreisung aller Straßenfahrzeuge auf allen Fernstraßen angenommen. Stadtgebiete sind hiervon jedoch noch ausgenommen. Lediglich im stringenten Fall wird zusätzlich die flächendeckende Einführung von City-Maut-Systemen in allen größeren Städten unterstellt.

Während in der moderaten Variante nur eine leichte Anhebung von Start- und Landegebühren an größeren Flughäfen unterstellt wird, werden im stringenten Fall

emissionsabhängige Trassenpreise im Bahnverkehr sowie emissionsabhängige Start- und Landegebühren an allen deutschen Flughäfen vorausgesetzt. Diese Maßnahmen entsprechen den Grundgedanken der Europäischen Union zur vollständigen Internalisierung externer Umweltkosten in allen Verkehrsbereichen (EU (2011)). Die Höhe möglicher Gebühren ergeben sich in Anlehnung an Maibach u. a. (2008).

**b) CO<sub>2</sub>-Emissionshandel** Im moderaten Szenario wird die Implementierung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen für den Straßenverkehr im Upstream-Verfahren, also durch Einbindung der Mineralölkonzerne in das Europäische EHS, unterstellt. Für Bahn, Schifffahrt und Luftverkehr werden großzügige Kontingente an Emissionszertifikaten angenommen, so dass die zusätzliche Kostenbelastung der Verkehrsträger noch begrenzt bleibt.

Um jedoch das 60 %-Reduktionsziel bis 2050 zu erreichen, sind im stringenten Szenario sehr viel ambitioniertere Maßnahmen notwendig. Zentrales Element ist hier vor allem die Umstellung des Emissionshandels auf die Downstream-Ebene, also den einzelnen Nutzer. Hierdurch soll eine direktere Sichtbarkeit der Reduktionsziele für die letztendlich entscheidenden Wirtschaftssubjekte erreicht werden. Ferner werden die Kontingente für Zertifikate in den übrigen Verkehrsträgern drastisch reduziert werden.

**c) Fiskal- und Steuerpolitik** Grundgedanke ist hier der Abbau umweltschädlicher Subventionen. In Anlehnung an Boss und Rosenschon (2008), Greenpeace (2008) und UBA (2008) werden die wichtigsten Subventionen wie die Pendlerpauschale sowie die Mineralöl- und Mehrwertsteuerbefreiung des Flugverkehrs zurückgefahren. Je nach betrachteter Szenarien-Variante geschieht dies in unterschiedlicher Ausprägung.

### IV.3.1.3. Anreizpolitik

Hinter der Terminologie “Anreizpolitik“ subsumieren sich allgemeinere verkehrspolitische Leitlinien, wie die Förderung von Forschung und Entwicklung in neuen Technologien für Verkehr und Mobilität, die Unterstützung eines breiten Mobilitätsmanagements und nicht zuletzt die Investitionspolitik von EU, Bund, Ländern und Kommunen.

**a) Forschungsförderung** Bestandteil dieses Maßnahmenteils sind die Subventionierung alternativer Antriebs- und Kraftstoffkonzepte im Zuge der Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (BMVBS (2004)) oder der nationalen Plattform Elektromobilität und Brennstoffzelle (BMVBS (2009)). Unterschieden wird eine breitflächige Anhebung der Fördersummen für alle Verkehrsträger im moderaten Szenario, sowie eine gezielte Förderung von Anwendungsprojekten und Pilotstudien im ambitionierten oder stringenten Fall. Im Ergebnis werden hierdurch die Lernkurven für den Marktdurchsatz neuer Technologien im Umfeld Verkehr und Mobilität verschoben.

**b) Mobilitätsmanagement** Durch eine gezielte Förderung intermodaler Wege und des Fuß- und Radverkehrs, ist in allen Entfernungsbereichen mit einer Zunahme der umweltfreundlichen Verkehrsträger Schiene und Schiff zu rechnen. Kernbestandteil der Strategie ist die Bereitstellung von Informationen über Optionen und Vorteile ressourcenschonender Mobilitätsstile. Im moderaten Szenario werden Mobilitätszentralen in den Individualverkehr eingreifen, während für die übrigen Verkehrsträger die Förderung entsprechender Angebote unterstellt wird. Im stringenten Fall wird dies durch infrastrukturelle Maßnahmen wie dem Ausbau der ÖV-Angebote und der massiven Förderung von Mobilitätsangeboten des öffentlichen Verkehrs gestützt.

**c) Infrastrukturpolitik** Die Bereitstellung der Verkehrswege gibt wesentliche Impulse für das Mobilitätsverhalten der Nutzer. Durch eine gezielte Steuerung von

Aus- oder auch Rückbaumaßnahmen lassen sich deutliche verkehrspolitische Akzente setzen. Im moderaten Maßnahmenfall wird von einer Forcierung des ökologischen Stadtumbaus und einer begrenzten Steigerung der Investitionen in das Schienennetz ausgegangen. Im stringenten Fall stehen Rückbaumaßnahmen im Fernstraßenbereich massiven Investitionen in der Schiene gegenüber, so dass hier von infrastrukturellen Push- und Pull-Maßnahmen gesprochen werden kann.

### **IV.3.2. Interdependenzen zwischen und innerhalb der Maßnahmengruppen**

Wie eingangs bereits angesprochen, müssen bei der Implementierung der Szenarien Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Zu nennen sind hier zunächst die Stimulierung technologischer und verhaltensspezifischer Entwicklungen durch Politik und Marktumfeld. Entsprechend wurde hier der Ansatz gewählt, die betrachteten Szenarien lediglich um die Verkehrspolitik zu definieren. Jedoch auch zwischen Nutzerverhalten und Technologieentwicklung sowie innerhalb der Verkehrspolitik lassen sich diese Wechselbeziehungen feststellen. Innerhalb der betrachteten neun politischen Fälle sind folgende Interdependenzen zu vermuten:

Emissionsstandards und (umweltorientierte) Zugangsbeschränkungen zu Stadtgebieten, Häfen oder Flughäfen: Bei ambitionierten Emissionsstandards werden umweltgetriebene Restriktionen mit der Zeit überflüssig. Dieser Prozess verläuft umso schneller, je kurzlebiger die Fahrzeuge oder Aggregate sind. So trifft das Einfahrtsverbot für ältere Diesel-Pkw in Umweltzonen auf immer weniger Fahrzeuge zu. Die Kombination der Instrumente wird jedoch einen noch schnelleren Flottenumsatz befördern.

Emissionsregulierung und Preise: Bei der stringenten Preissetzung nach dem Schadstoffausstoß (etwa durch die Anlastung von Grenzkosten der Klima- und Umweltbelastung) tritt ein ähnlicher Effekt wie im Bereich der Regulierung zu Tage. So sinken die Umweltpreise bei zunehmend sauberen Flotten. Die positiven Umweltwirkungen der deutschen Lkw-Maut zeigen jedoch, dass ein

ausgeklügeltes Preissystem in Verbindung mit strengen Regulierungen sehr erfolgreich sein kann.

Preise, Steuern und - je nach Implementierung - Emissionshandelssysteme haben einen sehr ähnlichen Effekt auf den Nutzer. Staatliche Eingriffe kommen hier in der Regel als Kostensteigerungen an. Im Sinne klarer verkehrspolitischer Signale ist hier zu prüfen, ob nicht ein einziges Preissignal sinnvoller ist als die ggf. wenig transparente Überlagerung mehrerer Instrumente. Mobilitätsförderung und Investitionspolitik können sich, wie oben angesprochen, ergänzen oder einander entgegen wirken. Ferner können investive Maßnahmen Bestandteil im Aufbau eines Mobilitätsmanagementsystems sein. Eine abgestimmte Politik ist deshalb unbedingt notwendig.

Weitere Interdependenzen existieren, sollen an dieser Stelle jedoch nicht vertieft werden. Um Fehler beim Ausweis von Emissions-Reduktionspotenzialen zu vermeiden, werden die Ergebnisse der 9 Szenarien-Ausprägungen mit ihren jeweils zwei Implementierungstiefen im anschließenden Kapitel separat ausgewiesen. Dort findet auch eine eingehendere Diskussion der Szenarien-Annahmen und der gewählten Parameter statt.

### **IV.3.3. Einführung in die quantitative Umsetzung**

Die Analyse der beschriebenen drei verkehrspolitischen Szenarien mit ihren jeweils drei Unterkategorien und zwei Implementierungstiefen findet mittels des systemdynamischen Verkehrs- und Wirtschaftsmodells ASTRA statt. Dieses erlaubt die Abbildung von gesamtwirtschaftlichen Zusammenhängen, Interdependenzen innerhalb des Verkehrs und zwischen Verkehr und übriger Wirtschaft, sowie von Rückkopplungen innerhalb der einzelnen Sektoren. Das Modell wurde in den vergangenen 10 Jahren im Auftrag von EU und nationalen Stellen auf- und ausgebaut und umfasst in seiner derzeitigen Implementierung die Staaten der Europäischen Union. Für diese lassen sich Prognosen des Verkehrsgeschehens, der Wirtschaft und sozialer Kenngrößen bis zum Jahr 2050 ermitteln. Eine detaillierte Beschrei-

bung des ASTRA-Modells und der mit diesem ermittelten Ergebnisse findet sich in Kapitel IV.5.

Vorgelagert zur ASTRA-Anwendung wurde im Rahmen des otello-Projektes eine Technologiedatenbank entwickelt. Diese stellt die gängigen Technologien zur Reduktion von Energieverbrauch, CO<sub>2</sub> und Luftschadstoffen mit Prognosen bis in das Jahr 2020 zusammen. Aufgrund der Verfügbarkeit und Güte der Informationen spielt hierin die Reduktion von Klimagasemissionen die bei weitem größte Rolle. Die Ergebnisse der Datenbank fließen in die Definition von Technologie-Lernkurven des ASTRA-Modells ein. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel IV.4 sowie in Doll u. a. (2010).

Durch die genannten Analyseebenen aus Verkehrspolitik, individuellen Verhaltensmustern und technologischen Optionen weist der Bereich Verkehr eine systeminterne Komplexität auf, welche die Integration in das otello-Gesamtmodell verhindert. Durch die zahlreichen systemimmanenten Feedback-Loops des ASTRA-Modells ist ferner die Bereitstellung eines vereinfachten Modells nur mit erheblichem Aufwand und mit Abstrichen bei der Ergebnisqualität möglich. Aus diesen Gründen ist der Verkehrsbereich, abweichend von den Bereichen Energieversorgung, Industrie und Haushalte, nur über den Transfer von Parametern und Ergebnissen, mit dem otello-Gesamtmodell verknüpft. Abbildung IV.3.2 zeigt das Schema der Kopplung.

Die Auswahl politischer Instrumente und zentraler exogener Parameter wie Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, Energiepreise, etc. greift auf einen gemeinsamen Szenarienprozess und eine abgestimmte Datenbasis von ASTRA und dem otello-Gesamtmodell zurück. In diesem Bereich erfolgte eine einmalige Abstimmung in den otello-Workshops. Die Multi-Kriterien-Analyse des otello-Modells entspricht in ASTRA der internen Struktur aus gesamtwirtschaftlichem Input-Output-Modell, makroökonomischen Modulen, statistisch geschätzten Verhaltensmodellen, Technologieparametern und Funktionen zu externen Wirkungen und Wohlfahrtseffekten des Verkehrs. Die Bewertung im Verkehrsmodul erfolgt unabhängig vom otello-Gesamtmodell, ist jedoch mit diesem abgestimmt.

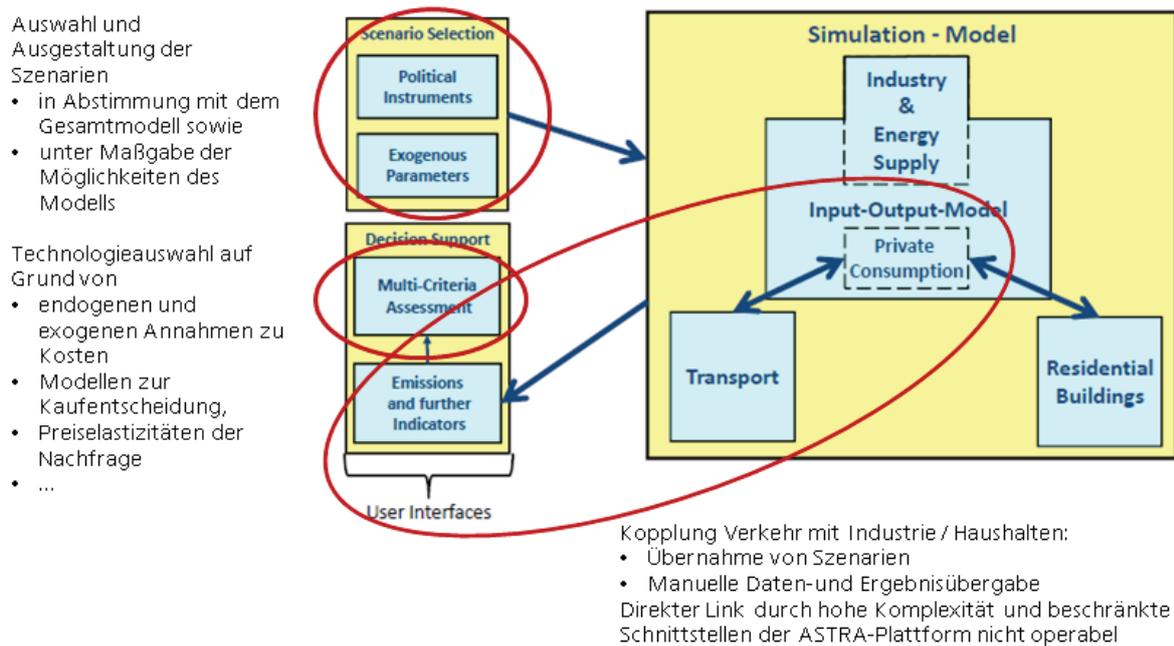


Abb. IV.3.2.: Schema der Einpassung des Verkehrsbereichs in das otello-Gesamtmodell

Die Kopplung von ASTRA und dem otello-Gesamtmodell erfolgt schließlich auf zwei Ebenen: (1) Der Definition einer gemeinsamen Szenarien-Struktur und (2) der Übergabe von Ergebnissen zur Entwicklung von Nachfrage und Emissionen. Dieser Prozess ist manuell angelegt, kann aber je nach Abstimmungsgrad mehrfach im Simulationsverlauf erfolgen.

Das gewählte Verfahren ist für die Generierung erster Ergebnisse zu Potenzialen der Emissionsminderung im Verkehr im Vergleich zu anderen Bereichen durchaus gerechtfertigt. Stellt sich dabei der Bereich Verkehr als wichtige Stütze der Einhaltung der NEC-Ziele heraus, sollte in einem weiteren Schritt doch über die echte Integration des Verkehrsbereichs in ein integriertes Gesamtmodell nachgedacht werden. Dies böte die Möglichkeit, bereichsübergreifende Wechselwirkungen und Rückkopplungsmuster abzubilden. Diese Muster und deren Bedeutung ließen sich jedoch zunächst in einer Sensitivitätsanalyse innerhalb der ASTRA-Modellumgebung identifizieren. Dieser Analyseschritt wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben jedoch nicht vollzogen.



## **IV.4. Technische Potenziale zur Emissionsminderung**

Im Rahmen des otello-Projektes wurde eine Datenbank mit ausgewählten Maßnahmen zur Minderung von Energieverbrauch und Schadstoffausstoß der Verkehrsträger erstellt. Ziel der Datenbank ist es, die in ASTRA implementierten Funktionen für technische Optionen zur Effizienzsteigerung der Verkehrsmittel zu verifizieren und Anhaltspunkte zur Wirksamkeit begleitender verkehrspolitischer Maßnahmen zu sammeln. Im Folgenden wird die Datensammlung als “otello-Maßnahmen-Datenbank“ bezeichnet. Es werden deren Ansatz, Datenquellen und Ergebnisse kurz beschrieben.

### **IV.4.1. Die otello-Maßnahmen-Datenbank**

In vermutlich weiterem Maße wie die Bereiche Industrie, Energieversorgung und Privathaushalte ist der Verkehrsbereich durch die komplexe Interaktion von staatlichen Stellen, Verkehrsunternehmen, Industrie und Nutzern gekennzeichnet. In einer umfassenden Bewertung von Maßnahmen und politischen Strategien müssen diese Akteure und deren individuelle Aktions- und Reaktionsmuster Berücksichtigung finden. Diese Aufgabe wird im Rahmen des otello-Projektes durch das systemdynamische Modell ASTRA (Assessment of Transport Strategies) wahrgenommen. Das Modell und dessen Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt im Detail beschrieben.

Die hier beschriebene otello-Maßnahmen-Datenbank dient als Input für die ASTRA-Modellierung. Die Datenbank enthält für die Verkehrsträger Straße, Schiene, Luft- und Schifffahrt Einträge zu Technologien und begleitenden Maßnahmen in sechs Bereichen oder Maßnahmengruppen:

**Antriebssysteme:** Diese Kategorie enthält motorseitige Technologien oder sonstige unterstützende Antriebsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz oder zur Reduktion des Schadstoffausstoßes motorisierter Verkehrsmittel.

**Kraftstoffe** beschreiben Kennwerte alternativer Treibstoffe, welche sich nach den Einsatzmöglichkeiten in den Verkehrsträgern grundsätzlich unterscheiden können. Behandelt werden Biokraftstoffe, die Vermeidung von Schweröl im Schiffsverkehr, Gas, Wasserstoff und elektrische Energie.

**Fahrzeugtechnische Maßnahmen** beschreiben Technologien, welche die Energieeffizienz von Fahrzeugen unabhängig von Antrieb und Kraftstoffen erhöhen können. Die wichtigsten Beispiele aus dieser Kategorie sind Aerodynamik und Leichtbau.

**Betriebsführung** beschreibt das Management der Verkehrsführung, welches zu einer erhöhten Energieeffizienz einerseits und zur Vermeidung der Exposition betroffener Anwohner durch Schadstoffe beitragen kann. Prominente Beispiele sind Routenwahl, Flottenmanagement oder Maßnahmen des Verkehrsmanagements seitens der Verkehrsunternehmen.

**Infrastrukturen** tragen wesentlich zur Beeinflussung der Verkehrsnachfrage und zur Kanalisierung des Verkehrsablaufs bei. Die Maßnahmengruppe enthält entsprechend Einträge zur Verfügbarkeit (Aus- oder Rückbau) von Infrastrukturen und zu deren Dimensionierung und Bewirtschaftung.

**Verkehrspolitische Maßnahmen** beschreiben schließlich allgemeine Eingriffe der öffentlichen Hand in das Verkehrsgeschehen. Diese können regulatorischer, preispolitischer oder fördernder Natur sein, und entsprechen im Wesentlichen den in den Szenarien (s.o.) gewählten Ausprägungen.

Die technischen Maßnahmen (Antriebe, Kraftstoffe und Fahrzeugtechnik) und die betriebliche Optimierung laufen auf privatwirtschaftlicher Ebene ab. Hier hat der Gesetzgeber nur indirekten, gestaltenden Einfluss. Die Ergebnisse der Datenbank-Auswertung geben für diese Hinweise auf die Machbarkeit von Reduktionszielen. Bei letzteren Maßnahmengruppen hat die öffentliche Hand hingegen entweder direkten Einfluss (Infrastrukturen) oder beeinflusst die

Handlungsweisen der privatwirtschaftlichen Akteure im Mobilitätsumfeld indirekt (politische Maßnahmen). Entsprechend fließen erstere in die Bestimmung von Reaktionsfunktionen im ASTRA-Modell ein, während letztere zur Definition und Verifizierung der Szenarien dienen.

Die betrachteten Maßnahmen wurden in einem internen Abstimmungsprozess aus verschiedenen Datenquellen wie Literatur und Fachzeitschriften (DVZ, Deutsche Verkehrs Rundschau, Eisenbahntechnische Rundschau, Internationales Verkehrswesen, etc.), Fachgesprächen mit Verbänden und Unternehmen (Verband der Bahnindustrie, DB, MTU, VDA, BGL, Lufthansa, etc.) und existierenden Datenbanken (Energy Efficiency Database der UIC, Eurocontrol Emissionsdaten, VDI-Daten zu Pkw-Technologien, etc.) zusammengestellt. Insgesamt enthält die Datenbank 203 Einträge, von denen knapp die Hälfte (103) auf den Schienenverkehr entfällt. Straße, Schifffahrt und Luftverkehr sind mit jeweils etwa 20% der Maßnahmen einigermaßen gleichmäßig vertreten. Grund für die Dominanz der Schiene ist die Verfügbarkeit einer detaillierten Datenbank zu Energieeffizienzmaßnahmen im Schienenverkehr. Bei der Abwägung der Maßnahmen wurde jedoch auf eine ausgewogene Repräsentation der Minderungspotenziale geachtet, was durch den Abgleich mit existierenden Studien geschah.

Die Codierung der Datensätze erfolgte nach folgenden Eigenschaften: Verkehrsträger und Einsatzgebiet (Sektor (Personen / Güterverkehr) sowie Entfernungsbereich), Potenzial der Emissionsminderung für CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (als Leitindikator für Luftschadstoffe) und Partikel (Ruß oder Staub), Zeithorizont der Einführung und Erreichung des vollen Minderungspotenzials.

Eine Herausforderung stellt grundsätzlich die realistische Darstellung des Zusammenwirkens verschiedener Maßnahmen dar. So spielt die Aerodynamik bei geschwindigkeitsbegrenztem Verkehr eine geringere Rolle, oder tritt das Minderungspotenzial alternativer Kraftstoffe bei effizienten Motoren nur teilweise zu Tage. Bei der Zahl der Maßnahmen ist eine paarweise Betrachtung der Maßnahmen wenig sinnvoll und reduziert die Flexibilität der Szenarienbildung. Entsprechend wurde ein multiplikativer Ansatz gewählt, bei dem die anteilig verbleiben-

Tab. IV.4.1.: Umfang der otello-Maßnahmen-Datenbank

<b>Maßnahmengruppe</b>	<b>Bahn</b>	<b>Straße</b>	<b>Luftfahrt</b>	<b>Schifffahrt</b>	<b>Gesamt</b>
Antriebssystem	11	17	1	5	34
Kraftstoffe	3	2	2	2	9
Fahrzeugtechnik	53	16	6	12	87
Betriebsführung	15	3	5	4	27
Infrastrukturen	18	0	3	1	22
Politische Instrumente	3	2	10	9	24
<b>TOTAL</b>	<b>103</b>	<b>40</b>	<b>27</b>	<b>33</b>	<b>203</b>

den Emissionsmengen gemeinsam eingeführter Maßnahmen eines Bündels miteinander multipliziert wurden. Hierdurch können im Einzelfall Über- oder Unterschätzungen der Potenziale auftreten, insgesamt werden die ermittelten Gesamtreduktionspotenziale jedoch als ausreichend realistisch eingestuft.

Insgesamt erfüllen Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Reduktion die Rolle von Leitindikatoren auch für die Minderung von Stickoxiden und Partikeln. Dieser Ansatz gilt für alle Maßnahmen, welche den Konsum an Kraftstoffen per se reduzieren, ohne in den Verbrennungsprozess selbst einzugreifen. Namentlich sind dies die Maßnahmengruppen Fahrzeugtechnik, Betriebsführung, Infrastrukturen und Verkehrspolitik. Einschränkungen bestehen hier lediglich in den Fällen, in denen der Verkehrsfluss beeinflusst wird, und sich dadurch Fahrgeschwindigkeiten und Fahrdynamik, und damit wieder der Verbrennungsprozess ändern. Schwieriger wird die These des CO<sub>2</sub>-Leitindikators für Motortechnik und Kraftstoffe. Hier werden folgende Annahmen getroffen:

**Antriebssystem:** Hier spielt der Flottenmix eine wesentliche Rolle, welcher durch ein internes Kohortenmodell in ASTRA dynamisch abgebildet ist. Leitgrößen sind hier die Emissionsstandards im Straßen-, Bahn- und Luftverkehr. Diese wurden in der ASTRA-Methode an den aktuellen Planungsstand angeglichen.

**Kraftstoffe** und deren Emissionen sind im ASTRA-Modell detailliert hinterlegt. Hier bedarf es entsprechend keiner zusätzlichen Information durch die Maßnahmen-Datenbank.

Die Zusammensetzung der Datenbank nach Verkehrsträgern und Maßnahmen-  
gruppen ist in Tabelle IV.4.1 dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse werden in  
den folgenden Abschnitten diskutiert.

## IV.4.2. Ergebnisse nach Verkehrsträgern

Die Auswertung nach Verkehrsträgern unter Einbezug aller Maßnahmengrup-  
pen, jedoch ohne Berücksichtigung einer effizienteren Stromerzeugung im  
Bahnverkehr, zeigt nennenswerte Effizienzpotenziale. Gewichtet über alle  
Verkehrsträger und bezogen auf das aktuelle Aufkommen der Verkehrsträger liegt  
das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial bis 2020 danach bei etwa 45%. Diese Einschätzung  
beruht auf eher vorsichtigen Einschätzungen des Minderungspotenzials innerhalb  
der Verkehrsträger und der Kombinierbarkeit von Maßnahmen. Ferner basiert  
die Betrachtung auf einem statischen Bild von Verkehrsaufkommen und Modal  
Split. Während das starke Wachstum im Straßengüterverkehr und der Luftfahrt  
zu geringeren Reduktionspotenzialen der gesamten Menge an Klimagasen führen  
wird, kann eine Verlagerung der Nachfrage auf Schiene und Schiff bei einem  
klimafreundlicheren Bahnstrommix zu weiteren Effizienzgewinnen führen.

Im Vergleich der Verkehrsträger kommen dem Straßenverkehr die größten Re-  
duktionspotenziale zu. Diese betragen nahezu 50 % zwischen 2005 und 2020.  
Während sich die Bahn in einer ähnlichen Größenordnung bewegt, fallen die Er-  
gebnisse für die Luftfahrt mit etwa 20 % und die Schifffahrt mit 12 % vergleichs-  
weise gering aus. Zwar kann eine gewisse Verzerrung der Ergebnisse durch die  
Anzahl der Maßnahmen je Verkehrsträger in Verbindung mit der gewählten multi-  
plikativen Verknüpfung der Reduktionspotenziale nicht ganz ausgeschlossen wer-  
den, die Ergebnisse geben jedoch einen deutlichen Hinweis auf die Optionen, die  
sich außerhalb des Straßenverkehrs bieten. Insbesondere der allgemein umwelt-  
freundlichste Verkehrsträger Schiene könnte durch geeignete Maßnahmen zu einer  
weiteren Verbesserung der Klimabilanz des Verkehrs beitragen. Abbildung IV.4.1  
gibt einen Überblick über die ermittelten Reduktionspotenziale im Vergleich der  
Verkehrsträger.

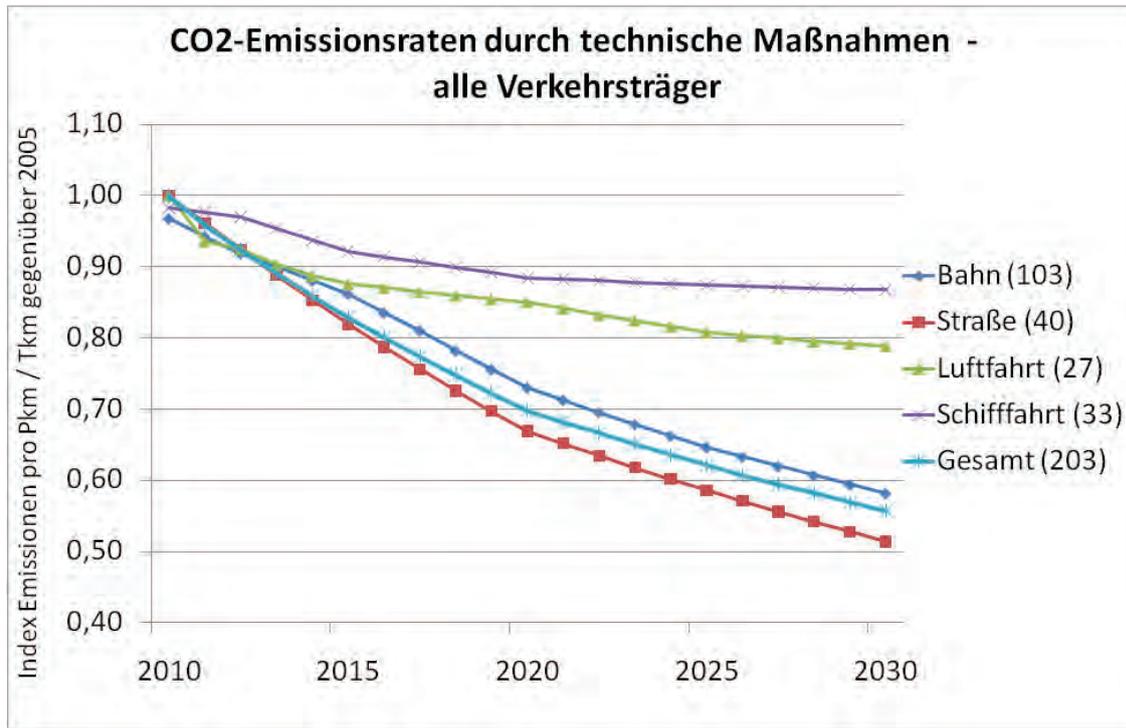


Abb. IV.4.1.: Ergebnisse der Maßnahmen-Datenbank: Reduktionspotenziale nach Verkehrsträgern

Mit annähernd 30% Energieeffizienzpotenzial wird dem Antriebsstrang die größte Bedeutung unter den straßenseitigen Maßnahmen zugesprochen. Die Relevanz der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale für andere Luftschadstoffe ist hier jedoch begrenzt. Durch den genannten Trade-Off zwischen Kraftstoffeffizienz und Schadstoffausstoß bei modernen Motoren kann sich hier sogar ein negatives Bild für Umweltschadstoffe ergeben. Da durch das Fortschreiten der Euro-Emissionsnormen der Ausstoß an Stickoxiden und Staub jedoch gedeckelt wird, muss angenommen werden, dass die genannten motorseitigen Reduktionspotenziale allenfalls die in Abbildung IV.2.7 dargestellte ansteigende Energieverbrauchskurve für Straßenfahrzeuge kompensiert. Die erzielten Nettoeffekte werden im Zuge der ASTRA-Modellanwendung ermittelt. Ferner ist zu beachten, dass durch das Zusammenwirken aus Kraftstoffen, Fahrzeugtechnik und Betriebsführung im Straßenverkehr weitere 30% an Energieeinsparung erreicht werden können.

Wichtigste Maßnahmengruppe im Bahnverkehr sind Fahrzeugtechnische Verbesserungen. Diese beinhalten optimierte Heiz- und Kühlsysteme, bordseitiges

Energiemanagement, Isolierungen oder aerodynamische Maßnahmen und Leichtbau. Durch die Kombination dieser Elemente lassen sich 2020 je Zug-km, gemittelt über den Personen- und Güterverkehr, bis zu 25 % Energie gegenüber 2005 einsparen. Außer Verbesserungen am Antriebsstrang, welche nach den vorliegenden Recherchen nur wenig zur Energieeffizienz des Bahnverkehrs beitragen können, bewegen sich die übrigen Maßnahmen im Bereich von 5% bis 10%. Für die Schadstoffemissionen am interessantesten sind hierbei Verbesserungen an Diesellokomotiven und Triebfahrzeugen. Diese haben derzeit einen Anteil von ca. 10% an den Zugkilometern, verursachen jedoch wesentliche Teile der Schadstoffemissionen. Ebenfalls interessant in diesem Zusammenhang wäre eine weitere Elektrifizierung von Nebenstrecken, um den Anteil der Dieseltraktion weiter zu reduzieren. Die Ergebnisse für den Schienenverkehr sind in Abbildung IV.4.2 dargestellt.

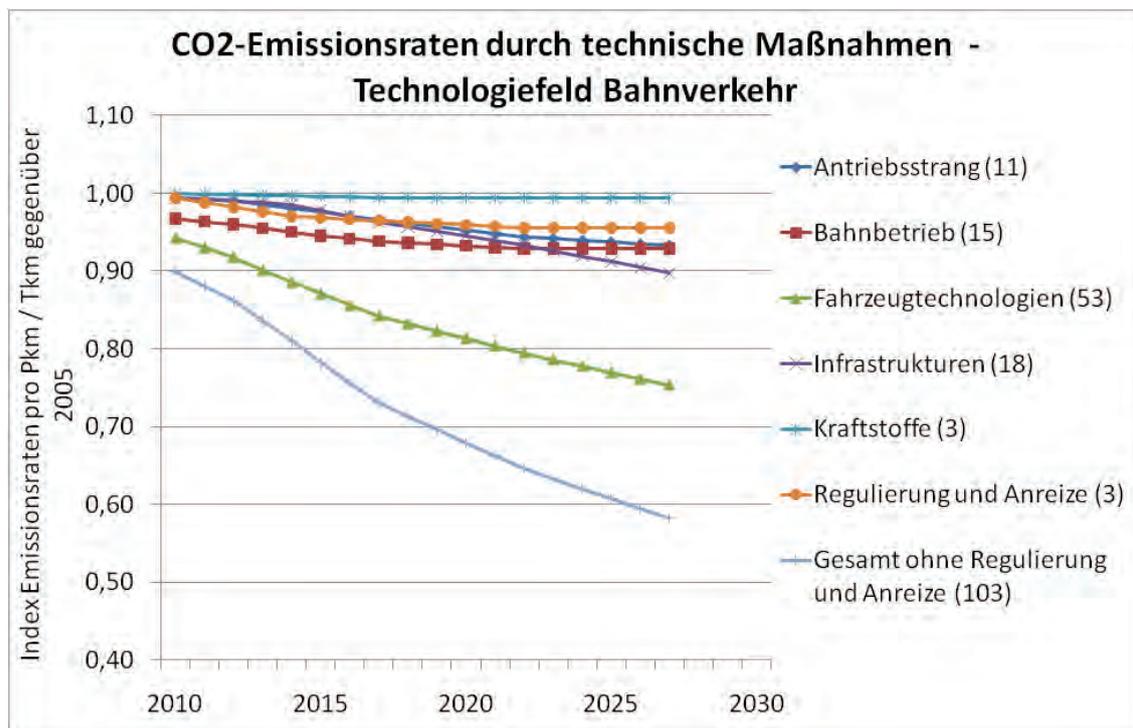


Abb. IV.4.2.: Ergebnisse der Maßnahmen-Datenbank: Reduktionspotenziale im Schienenverkehr

### IV.4.3. Interpretation der Ergebnisse

Der Vergleich der Ergebnisse der otello-Maßnahmen-Datenbank mit den Reduktionspotenzialen des EU-Forschungsprojektes GHG-TranspoRD (Akkermans u. a. (2010)) kommt zu ähnlichen Resultaten. Für den Straßenverkehr ermittelt GHG-TranspoRD technische Reduktionspotenziale für Lkw und Pkw zwischen 30% und 40%, plus etwa 15% durch Biokraftstoffe bis 2030 (Abbildung IV.2.6). Diese sind durchaus vergleichbar mit den technischen Potenzialen von 40% bis 50% bis 2020 durch diese Studie. Akkermans u. a. (2010) kommen jedoch auf wesentlich höhere Potenziale durch die urbane und nationale Verkehrspolitik. Ferner stimmen die Aussagen der Ansätze im Wesentlichen für die Luft- und Schifffahrt überein.

Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch im Schienenverkehr, welchem GHG-TranspoRD lediglich ein Potenzial von 8% bis 2030 zurechnet. Hier kann einerseits der Mengeneffekt durch die große Zahl von Maßnahmen dieser Studie zum Tragen kommen. Die Analysen geben jedoch auch einen Hinweis darauf, dass bei politischem Willen und geeigneten Förderinstrumenten und Anreizsystemen im Schienenverkehr noch erhebliche Verbesserungen realisiert werden können. Hinderlich hierfür sind unter anderem geringe Stückzahlen verbunden mit hohen Produktions- und Zulassungskosten von Schienenfahrzeugen, extrem hohe Sicherheitsanforderungen, die nationalstaatliche Organisation des Bahnverkehrs und daraus erwachsende komplexe Verwaltungs- und Entscheidungsstrukturen. Diese Faktoren lassen sich unter der Zielsetzung des otello-Projektes nicht untersuchen und kaum in ein Entscheidungsmodell integrieren.

## IV.5. Integrierte Modellierung mit ASTRA

Das ASTRA-Modell<sup>1</sup> wurde ursprünglich im Rahmen des EU-Projektes ASTRA im 4. Forschungsrahmenprogramm der europäischen Kommission entwickelt, mit dem Ziel ein Werkzeug zur strategischen Bewertung der europäischen Verkehrspolitik aufzubauen. "Strategisch" bedeutete zum Einen eine längerfristige Perspektive (30-50 Jahre Zeithorizont) zu wählen und zum Anderen eine integrierte Analyse der Wirkungen sowohl im Verkehrssystem als auch im Wirtschaftssystem und im Umweltbereich durchzuführen. Da zwischen den einzelnen Systemen eine Vielzahl von Rückkopplungen beobachtet werden kann, wurde System Dynamics als Modellierungsansatz gewählt, dessen Stärken genau in der Abbildung solcher Rückkopplungsschleifen liegen. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Systemen sowie die berücksichtigten übergeordneten Rückkopplungen in ASTRA lassen sich der Abbildung IV.5.1 entnehmen.

Im Laufe des 5. und 6. EU-Forschungsrahmenprogramms sowie tagesaktueller politischer Fragestellungen wurde das ASTRA-Modell kontinuierlich weiter entwickelt und angewendet z. B. bei der Entwicklung der Lissabon-Strategie, zur Abschätzung der Beschäftigungswirkung von Technologiepolitiken und von Politiken zur Förderung erneuerbarer Energien, zur Bewertung der Transeuropäischen Verkehrsnetze, von Verkehrsbepreisungspolitiken und von Szenarien zur Einführung neuer Technologien und Kraftstoffe im Verkehrssystem, zur Abschätzung der ökonomischen Wirkungen hoher Ölpreise auf die EU und zur Bewertung von Klimaschutzstrategien im Verkehr. Eine detaillierte Beschreibung des ASTRA-Modells findet sich in Schade (2005) mit Erweiterungen in Krail (2009).

---

<sup>1</sup>ASTRA = Assessment of Transport Strategies.

Die Version von ASTRA, die bisher in nationalen Projekten wie Politikszennarien IV (ÖI u. a. (2008)), KlimInvest (Jochem u. a. (2008)), Politikszennarien-V (Matthes u. a. (2009)), IKEP-Makro (Schade u. a. (2009)) und nun auch in dieser Studie genutzt wurde bzw. wird, umfasst 29 europäische Länder, deren Ökonomien jeweils in 25 Sektoren unterteilt sind und die untereinander verknüpft sind sowohl über den innereuropäischen Außenhandel als auch über die Verkehrsströme zwischen den einzelnen Ländern. Relevant für die Auswertung in nationalen Projekten sind die Ergebnisse für Deutschland, welches für einige politikspezifische Aspekte detaillierter implementiert wurde als die übrigen Länder.

Wesentliche Modellelemente von ASTRA sind kalibriert anhand von Zeitreihen von 1990 bis 2003/2006. Die Zeitreihen entstammen weitgehend aus europäischen Statistiken von Eurostat bzw. der UN-COMEXT Datenbanken, sowie in einzelnen Fällen auch aus Ergänzungen von nationalen Statistiken. Die Hauptcharakteristika und die Struktur des ASTRA-Modells sind in Abbildung IV.5.1 dargestellt.

ASTRA nutzt ein 1-Jahres-Kohortenmodell zur Abbildung der Bevölkerungsstruktur in den einzelnen Ländern. Dieses liefert relevante Rahmenbedingungen an andere Module, wie das Arbeitskräftepotenzial für das makroökonomische Modul oder die verkehrsverhaltensrelevanten Altersgruppen für das Verkehrsmodul. Im makroökonomischen Modul werden die Angebots- (d. h. Produktionsfaktoren und Technologie) und Nachfrageseite (d. h. Elemente der Endnachfrage) der Volkswirtschaften, die sektoralen Verflechtungen mittels Input-Output-Tabellen, die sektorale Beschäftigung und der Staatshaushalt abgebildet. Dabei lässt sich das Konzept von ASTRA nicht einer einzelnen ökonomischen Theorie zuordnen, sondern es kommen Elemente aus verschiedenen Theoriegebäuden zum Einsatz wie keynesianisch konsumgetriebenes Investitionsverhalten ergänzt durch investitionsfördernde Exporteinflüsse, neoklassische Produktionsfunktionen und endogenisierter technischer Fortschritt aus der endogenen Wachstumstheorie. Diese Einzelemente werden durch eine Vielzahl von Rückkopplungen verknüpft ggf. unter Berücksichtigung von zeitlichen Verzögerungen. Über Mikro-Makro-Brücken werden ökonomische Impulse, die sich aus der detail-

**Hauptcharakteristika:**  
 System integrierter Modelle  
 System Dynamics (Evolutorisch)  
 Zeithorizont 2030 (2050)  
 29 europäische Länder  
 76 Zonen  
 25 Wirtschaftssektoren  
 8 Transportmodi (P+G)  
 => 200.000 modale OD-Ströme

**Abkürzung der 9 Module:**

POP =	Bevölkerung
MAC =	Volkswirtschaft
REM =	Regionalwirtschaft
FOT =	Außenhandel
INF =	Infrastruktur
TRA =	Verkehr
VFT =	Fahrzeugflotten
ENV =	Umwelt
WEM =	Bewertung

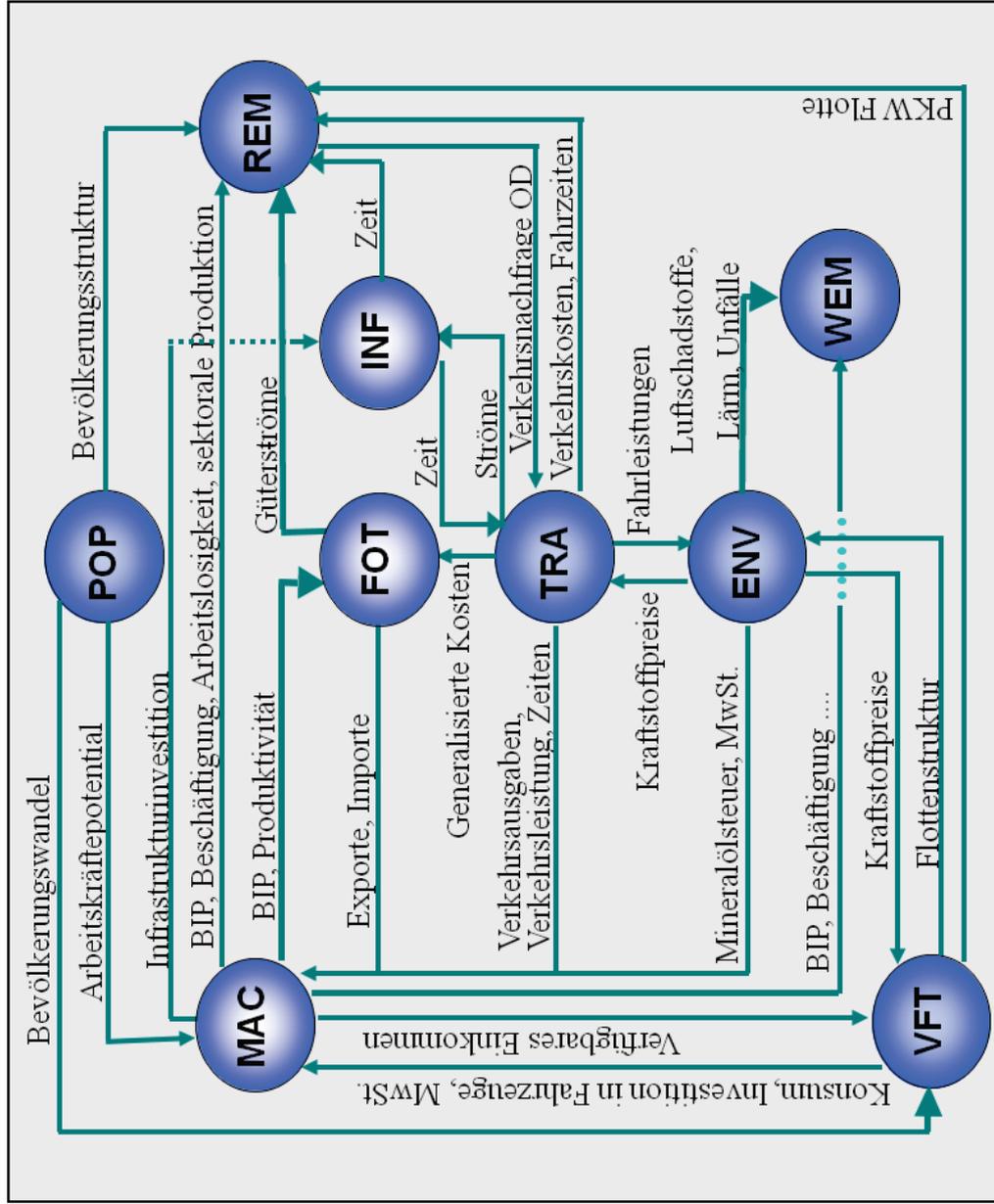


Abb. IV.5.1.: Struktur und Interaktionen des ASTRA-Modells

lierten Modellierung (bottom-up) des Verkehrs- oder Energiesystems ergeben, in das makro-ökonomische Modul eingespeist. Umgekehrt liefert ASTRA über Makro-Mikro-Brücken die ökonomischen Treiber für die Bottom-up Modelle. Die Verflechtungen zwischen den wesentlichen volkswirtschaftlichen Variablen in ASTRA sind in Abbildung IV.5.2 dargestellt.

Direkte wechselseitige Interaktionen bestehen zwischen dem makroökonomischen Modul und dem Außenhandelsmodul, wo das Wachstum der einzelnen Volkswirtschaften die Importe ankurbelt, welche wiederum auf der Exportseite der anderen Volkswirtschaften wachstumsfördernd wirken, usw. Gleichzeitig liefern die sektoralen Exportströme neben den Produktionswerten einen wichtigen Treiber für das Güterverkehrsmodell, während das Personenverkehrsmodell durch die Bevölkerungs- und Einkommensentwicklung sowie die Fahrzeugflotten getriggert wird.

### **IV.5.1. Abbildung von Politiken**

Üblicherweise werden in ASTRA Politiken gegenüber einer Referenzentwicklung anhand eines mit-/ohne-Politik Vergleiches analysiert. Die Referenzentwicklung kann bereits Politiken enthalten, die z. B. bereits entschieden aber noch nicht komplett umgesetzt wurden, so dass sie sich noch nicht in den Daten der Kalibrierperiode wiederfinden.

ASTRA ermöglicht eine flexible Gestaltung von Politiken hinsichtlich ihrer Intensität, ihrer zeitlichen Staffelung oder ihrer Kombination zu Politikpaketen. Letzteres ist bedeutsam zur Analyse von Synergien zwischen verschiedenen Politiken sowie für die Untersuchung von Politikprogrammen wie dem Klimaschutzprogramm der Bundesregierung oder einer aus mehreren Instrumenten komponierten Förderung von Erneuerbaren Energien. Außerdem wird dadurch die Analyse der Verbesserung von Maßnahmen durch flankierende Maßnahmen ermöglicht, z. B. um negative ökonomische Wirkungen einer Maßnahme zu kompensieren. Integrierte Funktionen zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen runden das Spektrum der Analysemöglichkeiten von ASTRA ab.

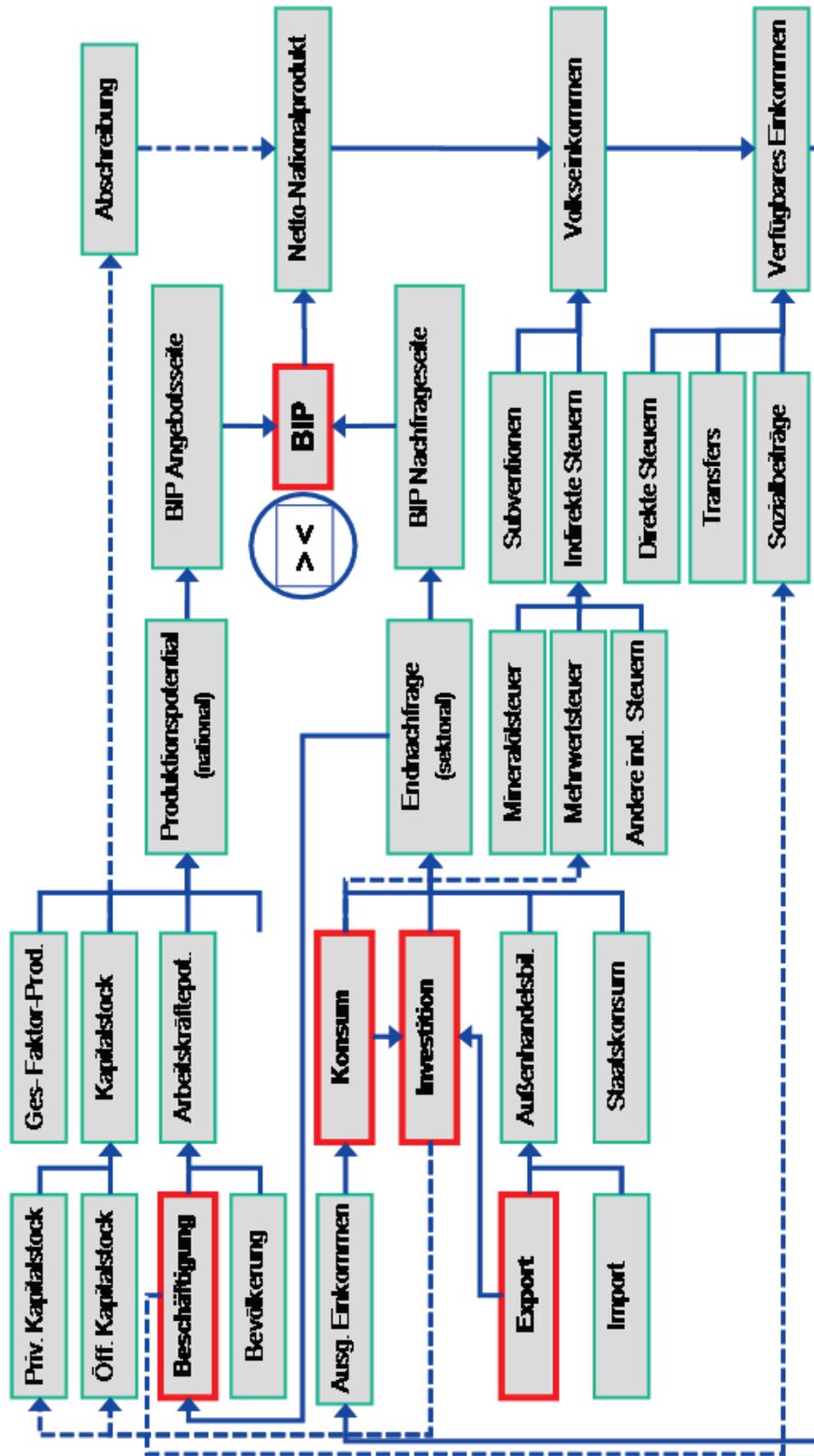


Abb. IV.5.2.: Interdependenzen im makro-ökonomischen Modul von ASTRA (MAC)

## IV.5.2. Datenbasis und Datenbestand

Exogene Inputs in ASTRA und die zur Kalibrierung notwendigen Zeitreihen-Daten kommen hauptsächlich aus den Datenbanken von Eurostat, der OECD und der UN. Daten zur Parametrisierung der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung stammen aus der Eurostat VGR. Das Arbeitsmarktmodul in ASTRA wurde mittels LFS-Daten (Labour Force Survey) kalibriert. Der Außenhandel basiert auf Daten der UN-COMTRADE Handelsstatistiken. Die Verkehrsergebnisse von ASTRA sind anhand europäischer Statistiken (EUROSTAT) bzw. von europäischen Verkehrsmodellen (z.B. SCENES, ME&P (2000)) kalibriert. Diese weichen zum Teil aufgrund von Abgrenzungsunterschieden und zum Teil durch die Nutzung unterschiedlicher Modelle zur Abschätzung der Daten von deutschen Statistiken und Modellen ab. Hier sei darauf hingewiesen, dass es für die wesentlichen Verkehrsindikatoren (Aufkommen, Verkehrsleistung, Fahrleistung) keine komplett erfassten Statistiken gibt, sondern die in Statistiken dargestellten Daten entweder aus Stichproben hochgerechnet sind oder aus Modellergebnissen von Netzwerkmodellen stammen. In beiden Fällen werden diese "Daten" anhand von statistisch erfassten Eckwerten (im wesentlichen Kraftstoffverbrauch und Fahrzeugflotten) plausibilisiert. Neben der Abgrenzungsproblematik bildet die Modellbasiertheit der "Verkehrsstatistiken" eine Ursache für Differenzen zwischen den deutschen und europäischen Statistiken und somit zwischen Abweichungen der europäischen ASTRA-Kalibrierung zu deutschen Statistiken. Im Rahmen des Projekts Politikszenerarien für den Klimaschutz V (Ökoinstitut et al. 2009) wurden die Verkehrsprojektionen mit den Ergebnissen des TREMOD Modells abgestimmt.

## IV.5.3. Modellierung

Das ASTRA Modell besteht aus ca. 8.000 Variablen. Die meisten dieser Variablen stellen Vektoren bzw. Matrizen dar, da die darin enthaltenen Gleichungen für

alle 28 Länder der EU27+2 (Belgien und Luxemburg sind dabei zu einem Land zusammengefasst) gerechnet werden. Im Falle von Matrizen werden neben den Ländern beispielsweise separate Gleichungen für alle Wirtschaftssektoren oder im Verkehrsmodul für alle Verkehrsmittel gerechnet. Somit ergeben sich insgesamt ca. 29 Millionen Gleichungen bzw. Rechenschritte, die in ASTRA zu jedem Zeitpunkt der Simulation gerechnet werden. Da ASTRA Verkehrsflüsse innerhalb der EU27+2 simuliert, ergeben sich auch Variablen, die als Matrizen fungieren und bis zu 180.000 Gleichungen beinhalten können. ASTRA besteht wie alle System Dynamics Modelle aus Bestands-, Fluss- und Hilfsvariablen. Der Großteil der Variablen ist dabei endogen. Exogene Variablen bzw. Konstanten enthalten entweder initialisierende Daten für das Startjahr der Simulation, Kalibrationsparameter oder exogene Daten aus Statistiken und deren abgeschätzter, zukünftiger Verlauf. ASTRA weist zum einen Merkmale ökonomischer Modelle auf, da die funktionelle Beziehung zwischen Variablen zum Teil empirisch geschätzt wird. Die Dynamik in ASTRA ergibt sich aus dem Zusammenspiel der zahlreichen verstärkenden, sowie dämpfenden Rückkoppelungsschleifen zwischen und innerhalb der Module. Die Kalibrierung ASTRAs wird in einer Sequenz der einzelnen Module vollzogen. Hierbei wird zur Anpassung an die historischen Zeitreihen die in der Software *Vensim<sup>TM</sup>* angebotene iterative Optimierungsmethode, verknüpft mit dem Powell-Algorithmus angewandt. Ziel ist die Minimierung der Summe der Abweichungen zwischen endogenen und statistischen Werten über den gesamten Kalibrationszeitraum.

## **IV.5.4. ASTRA Module**

### **IV.5.4.1. Bevölkerung**

ASTRA nutzt ein eigenes Kohortenmodell für jedes EU27+2 Land. Die Kalibrierung des Kohortenmodells erfolgt auf Basis von Geburtenraten, Sterberaten und Migrationsbewegungen. Als Vorlage für die Trends im Prognosezeitraum dienen Eurostat-Statistiken. Allerdings lassen sich die Prognosen auch relativ einfach an-

passen, allerdings mit Auswirkungen auf alle übrigen Modellteile, die nicht immer ex-ante vollständig qualitativ abschätzbar sind.

#### **IV.5.4.2. Makroökonomie**

**Konsum der Privaten Haushalte** Das Konsum-Modell in ASTRA simuliert den Konsum der privaten Haushalte differenziert nach 25 Wirtschaftssektoren. Die Basis dabei bildet das private verfügbare Einkommen der Haushalte. Dieses wird zunächst ausgehend vom Bruttoinlandsprodukt (BIP) anhand der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung über die Zwischenstufen Bruttonational-, Nettonational- und Volkseinkommen berechnet. Im letzten Schritt werden direkte Steuern und Sozialbeiträge subtrahiert, sowie das Transfereinkommen addiert. Die zur Berechnung des Nettonationaleinkommens nötigen Abschreibungen ergeben sich dabei aus der Berechnung des Bruttoanlagevermögens, die im nächsten Schritt benötigten indirekten Steuern ergeben sich zum Teil endogen aus der Simulation des Verkehrssystems (Mineralölsteuer), sowie aus einer Rückkoppelung aus dem Konsummodell (Mehrwertsteuer). Die Beschäftigung und die Entwicklung der Bevölkerungsstruktur werden genutzt, um direkte Steuern, Sozialbeiträge und Transfer-einkommen abzuschätzen.

Das resultierende private verfügbare Einkommen teilt sich dann in Konsum und Ersparnisse auf. Ersparnisse sind dabei eine Stellgröße zur Kalibrierung des Konsummodells. Innerhalb des Konsummodells wird zwischen Konsum für Verkehr und restlichen Konsum unterschieden. Endogen aus dem Verkehrsmodell und dem Fahrzeugflottenmodell ergeben sich die Ausgaben für Verkehrsdienstleistungen, Kraftstoffe, Fahrzeugkauf, Wartung und Kfz-Versicherungen. Die Verteilung des restlichen für Konsum zur Verfügung stehenden Einkommens basiert auf der historischen sektoralen Verteilung und verändert sich endogen über unterschiedliche Preiselastizitäten. Energiepreisentwicklungen und deren Auswirkungen auf die Produktpreise beeinflussen die Verteilung ebenfalls.

**Konsumausgaben des Staates** Die Konsumausgaben des Staates werden in ASTRA nicht nach der gängigen Klassifizierung in Individual- und Kollektivkonsum unterschieden. ASTRA unterscheidet nach Personal- und Sachkonsum. Dabei werden die Ausgaben für Personal direkt durch die Entwicklung des Arbeitsmarktes und des Staatssektors beeinflusst. Sachausgaben des Staates werden dagegen als fester Prozentsatz des BIP zugerechnet.

**Investitionen** Das Investitionsmodell in ASTRA simuliert die Investitionen auf Basis endogener und exogener Informationen. Dabei stellen die Investitionen pro Wirtschaftssektor einen weiteren Bestandteil der Endnachfrage dar. ASTRA berücksichtigt neben dem Einfluss der Investitionen auf die Endnachfrage auch die Einflüsse auf die Angebotsseite. Dabei verändern Investitionen das Bruttoanlagevermögen und gehen somit über das Produktionspotenzial ebenfalls in die Berechnung des BIP ein.

Konsum- und Außenhandelserwartungen, das Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage, sowie die mit der Staatsverschuldung verbundene Zinsentwicklung beeinflussen dabei den endogenen Anteil der Investitionen. Technologiebasierte Modelle können diesen endogenen Anteil um exogene Investitionen erweitern.

Bei der Simulation der Investitionen unterscheidet ASTRA zwischen Investitionsgütersektoren, wie z.B. Maschinenbau, Fahrzeugbau und Hoch- und Tiefbau, und übrigen Sektoren. Detaillierte sektorale Konsum- und Exportentwicklungen werden genutzt, um die Investitionen in Investitionsgütersektoren zu simulieren, wohingegen Investitionen in die übrigen Sektoren auf aggregierten Konsum und Exporte reagieren.

**Exporte** Die Entwicklung der Exporte wird in ASTRA innerhalb des Außenhandelsmoduls simuliert. Dabei unterscheidet ASTRA zwischen den Exporten zwischen den Ländern der EU27 plus Norwegen und der Schweiz (Intra-EU) und den Exporten in übrige Teile der Welt, die in 15 Regionen unterteilt sind. Die Struktur beider Modellteile ist ähnlich, da beide Modelle die

bilateralen Handelsströme für alle Länderpaare differenziert nach den in ASTRA verwendeten 25 Wirtschaftssektoren abschätzen. Das Intra-EU Handelsmodell verwendet jedoch im Gegensatz zum Rest-der-Welt Modell hauptsächlich endogene Inputs. Der einzige exogene Einflussfaktor stellt im Intra-EU Handelsmodell das Wachstum des Welt BIP dar. Zeitreihenanalysen der Entwicklung der Exporte und des Welt BIP zeigen, dass zwischen beiden Faktoren eine starke Korrelation existiert. Daneben beeinflussen Konsum und Produktionsprozesse wesentlich die Entwicklung des BIP. Daher ist das BIP Wachstum des importierenden Landes als weiterer Treiber der Exportentwicklung berücksichtigt. Wettbewerbsvorteile zwischen Wirtschaftssektoren einzelner Länder spielen ebenfalls eine Rolle bei der Entwicklung der Exporte. Der Vergleich der Veränderungen der Arbeitsproduktivität innerhalb der Sektoren zwischen den Exportpartnern wird daher als weiterer Einflussfaktor im Modell verwendet. Verbesserungen der physischen Handelswege in Form von Verkürzungen der Transportzeiten sowie Veränderungen der Transportpreise werden ebenfalls als Treiber berücksichtigt.

Im Gegensatz zum Intra-EU Handelsmodell können verkehrliche Einflüsse im Rest-der-Welt Handelsmodell nicht als Einflussfaktor integriert werden, da ASTRA nur Verkehrsströme innerhalb der EU27+2 abschätzt. Daher ist der Handel von Ländern der EU27+2 mit Ländern der Rest-der-Welt hauptsächlich von Arbeitsproduktivität und BIP-Wachstum abhängig.

**Vorleistungsverflechtung** Die Dynamiken innerhalb der Vorleistungsverflechtung zwischen den Wirtschaftssektoren eines Landes werden in ASTRA innerhalb des Input-Output-Modells simuliert. Ziel dabei ist die Abbildung der indirekten Effekte der Entwicklung der 25 Wirtschaftssektoren. Verschiebungen innerhalb des sektoralen Konsums sowie der Investitionen verändern die Input-Output-Tabellen mit der Zeit. Strukturelle Veränderungen der Input-Output-Tabellen werden in ASTRA über die Entwicklung der Endnachfrage, Energie- und Transportpreisänderungen induziert. Der Einfluss der Endnachfrage wird dabei über eine Änderung der inversen Input Koeffizienten, der sogenannten

Leontief Inversen (Leontief (1966)), abgebildet. Dabei wird von einem konstanten Verhältnis zwischen Wertschöpfung und Endnachfrage ausgegangen. Dieser Prozess wiederholt sich nach jeder Veränderung der Vorleistungsmatrix. Die Neuberechnung der Vorleistungsmatrix basiert dabei auf der Matrix der veränderten inversen Inputkoeffizienten und ist angelehnt an den im ESCOT Modell gewählten Ansatz (Schade u. a. (2002)). Das Input-Output-Modell in ASTRA ist mit harmonisierten Input-Output Tabellen von Eurostat kalibriert.

Die wichtigsten Outputs des Input-Output Modells in ASTRA sind die Bruttowertschöpfung und der Produktionswert der Volkswirtschaften. Die Bruttowertschöpfung spielt bei der Simulation des Arbeitsmarktes, der Produktionswert bei der Simulation der nationalen Güterverkehrsströme eine große Rolle.

**Arbeitsmarkt** Der Arbeitsmarkt gliedert sich in 25 Sektoren für jedes EU27+2 Land. Anhand der sektoralen Bruttowertschöpfung, die aus der I/O-Tabelle abgeleitet wird, sowie der sektoralen Arbeitsproduktivitäten wird die vollzeitäquivalente Beschäftigung bestimmt. Fahrzeugbau sowie die übrigen Verkehrssektoren werden dabei gesondert berechnet. Informationen über die Veränderungen der Verkehrsnachfrage werden dabei genutzt, um die Entwicklung der vollzeitäquivalenten Beschäftigung innerhalb der Verkehrssektoren exakter abzubilden. Beim Fahrzeugbau wird die abgeschätzte Absatzentwicklung an neuen Fahrzeugen dazu genutzt, die Beschäftigungsentwicklung zu simulieren. In einem nachfolgenden Schritt wird diese in tatsächlich vollzeitarbeitende Personen und Teilzeitbeschäftigte differenziert. Sektorspezifische Teilzeitarbeitsstrukturen fließen dabei mit ein.

Ausgehend von der Zahl der Voll- und Teilzeitbeschäftigten wird anhand der Bevölkerungsentwicklung im arbeitsfähigen Alter und der sich daraus ergebenden Erwerbstätigen Bevölkerung die Zahl der Arbeitslosen ermittelt. Fällt diese Zahl über die Zeit unter 5%, so wird von einer stärkeren Entwicklung der Arbeitsproduktivität ausgegangen.

### IV.5.4.3. Verkehrsmodellierung

ASTRA erfasst sowohl den inländischen Verkehr als auch die grenzüberschreitenden Verkehre sowohl im Güter- als auch im Personenverkehr. Die Differenzierung der Nachfrage im Verkehrssystem erfolgt für den Personenverkehr nach drei Fahrtzwecken (Geschäfts-, Privat- und Urlaubsfahrten) und für den Güterverkehr nach drei Güterkategorien (Massen-, Stück- und Container-Güter). Die Nachfrage im Personenverkehr ist nach 5 Entfernungsbändern gegliedert, in denen jeweils verschiedene Verkehrsträger zur Verfügung stehen. Im Güterverkehr werden 4 Entfernungsbänder unterschieden (siehe Abbildung IV.5.3).

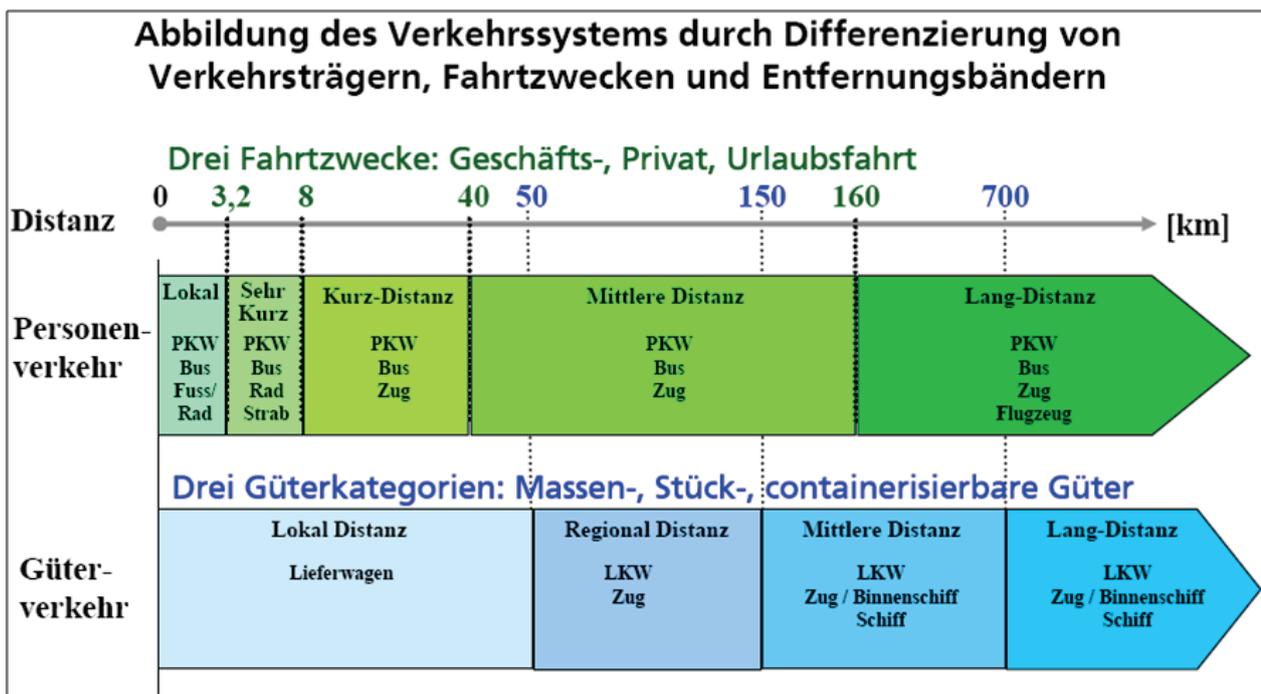


Abb. IV.5.3.: Abbildung des Verkehrssystems durch Differenzierung von Verkehrsträgern, Fahrtzwecken und Entfernungsbändern in ASTRA

Das Verkehrssystem ist mit einem modifizierten und voll integrierten 4-Stufen Verkehrsmodell implementiert. Die vier Stufen (Verkehrserzeugung, -verteilung, Modal- und Routenwahl, letztere in vereinfachter Form) des Personen- und Güterverkehrsmodells sind im regionalökonomischen Modul (REM) und im Verkehrsmodul (TRA) abgebildet (siehe Abbildung IV.5.4 für den Personenverkehr und Abbildung IV.5.5 für den Güterverkehr).

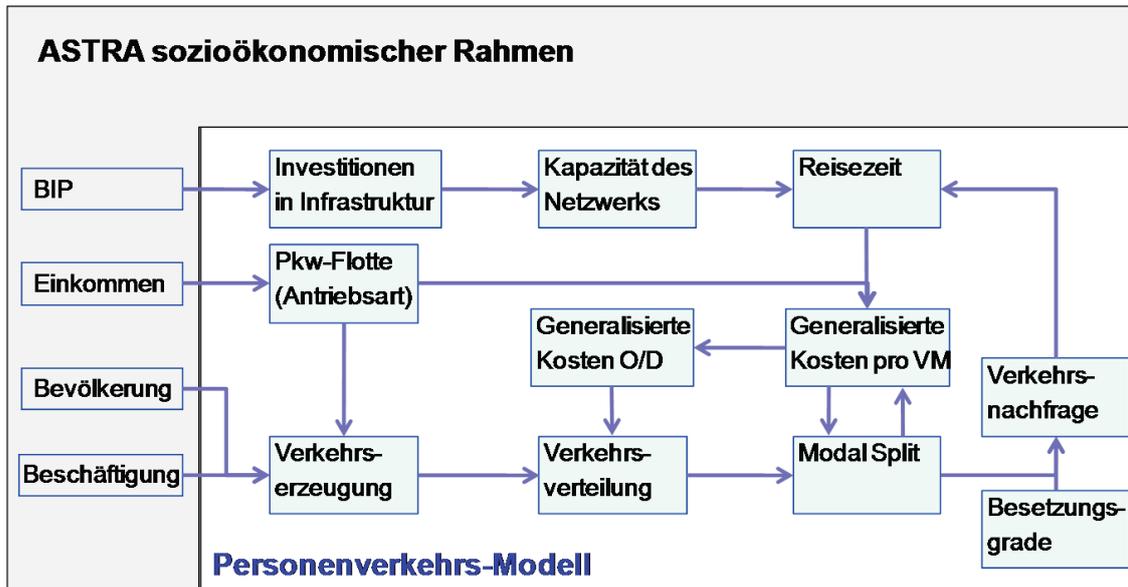


Abb. IV.5.4.: Struktur des Personenverkehrsmodells in ASTRA

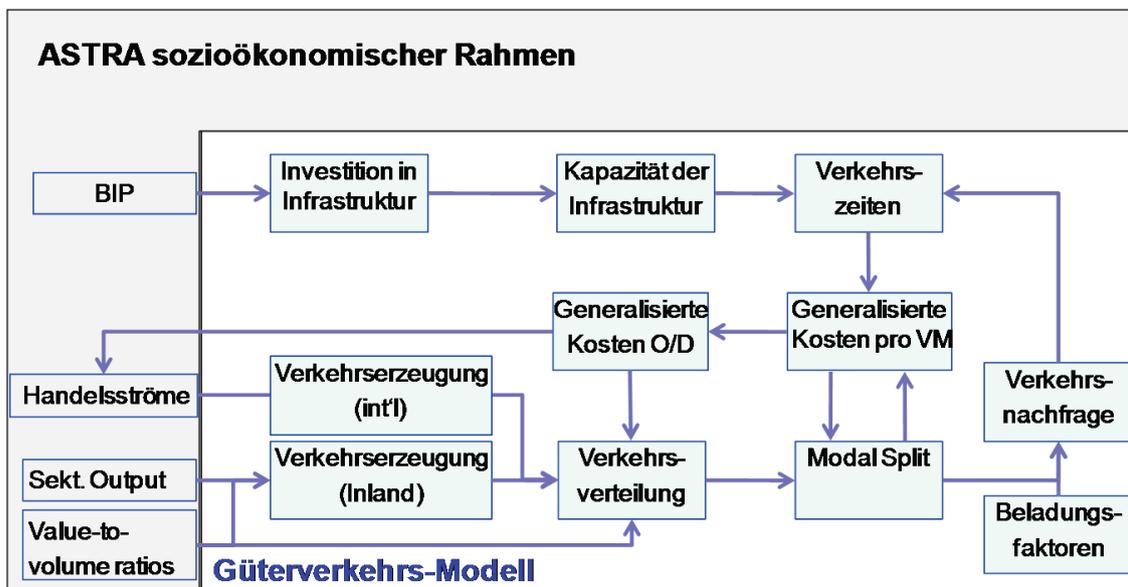


Abb. IV.5.5.: Struktur des Güterverkehrsmodells in ASTRA

In diesen beiden Modulen von ASTRA setzen die meisten verkehrspolitischen Maßnahmen an, da hier die regional- und modal-spezifischen Zeit- und Kostenkomponenten hinterlegt sind, die dann in die Entscheidungsfunktionen (Logit-Funktionen) der Verkehrsnutzer Eingang finden. Reaktionen der Verkehrsnutzer können auf allen Entscheidungsstufen gemessen werden, d. h. unterschiedliche Modalwahl, veränderte Zielwahl und damit auch veränderte Distanzen.

Der Personenverkehr wird in ASTRA angetrieben zum einen durch die sozioökonomischen Rahmenbedingungen wie BIP und Einkommen, Bevölkerungs- und Beschäftigungsentwicklung und zum anderen durch Pkw-Flotten sowie Zeit- und Kostenparameter im Verkehrsmodell (siehe Abbildung IV.5.4). Außer der Bevölkerung, die durch Migration, Geburten- und Sterberaten komplett unabhängig vom Verkehrssystem modelliert ist, kann jeder sozioökonomische Treiber bzw. jede verkehrsspezifische Zeit- und Kostenkomponente durch politische Maßnahmen (z.B. Verkehrspolitik, Klimapolitik, Biokraftstoffpolitik) verändert werden und wiederum Veränderungen bei den anderen Elementen des Verkehrssystems auslösen. Direkte Wirkungen einer Maßnahme auf das Verkehrssystem erfolgen über die Veränderung der Kraftstoffpreise (z.B. Mineralölsteuern), die Veränderung des Neuwagenkaufverhaltens und damit der Pkw-Flotte (z.B. Kfz-Steuern oder Feebates), der km-Kosten (z.B. Maut oder durch Veränderung der Pkw-Flotte) oder der Fahrzeiten (z.B. Tempolimit).

Die Treiber für den Güterverkehr sind anders gelagert als für den Personenverkehr. Die beiden wichtigsten Treiber sind die sektorale Produktion und die internationalen Handelsströme. Auch hier spielen die Flotten-, Zeit- und Kostenparameter eine Rolle bei der Abschätzung der Verkehrs- und Energienachfrage (siehe Abbildung IV.5.5). Aber sie wirken sich stärker auf die Modalwahl aus als auf die Verkehrserzeugung und verteilung, die im Wesentlichen von der wirtschaftlichen Entwicklung repräsentiert durch Produktion und Handel abhängen. Einen weiteren wichtigen Faktor stellen die Beladungsfaktoren dar, die auch durch Maßnahmen beeinflusst werden können, z.B. durch eine Verbesserung der Logistikplanung als Folge eines Verkehrskostenanstieges.

#### IV.5.4.4. Verkehrstechnologie

Die Abschätzung der Entwicklung der verkehrsbedingten Luftschadstoff- und Treibhausgasemission bedarf neben der Simulation der Verkehrsentwicklung auch die Abbildung der Technologieentwicklung innerhalb der Fahrzeugflotten. ASTRA unterscheidet dabei zwischen den Verkehrsträgern Straße und allen Übrigen. Pkw- und Busflotten, sowie die Flotten leichter und schwerer Straßennutzfahrzeuge werden dabei detailliert abgebildet. Schienenfahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge werden nur mittels einer Abschätzung der Entwicklung derer Effizienz simuliert.

Das detaillierteste Fahrzeugflottenmodell in ASTRA ist das Pkw-Modell. Das Flottenmodell ist im Kern als Kohortenmodell aufgebaut. Der Aufbau ähnelt stark dem Bevölkerungsmodell. Im Zentrum wird der Bestand der Pkw, differenziert nach Alter, Emissionsstandard und Fahrzeugtechnologie für alle Länder der EU27+2 abgebildet. Dieser verändert sich mit jedem Zeitschritt durch die altersspezifischen Verschrottungsraten und durch die Neuregistrierungen. Diese wiederum werden beeinflusst von der Zahl der verschrotteten Pkw, da stets ein gewisser Anteil durch neue Pkws ersetzt wird. Weitere Einflussfaktoren stellen die Entwicklung des durchschnittlich verfügbaren Einkommens, der Betriebskosten, der Kaufpreise, der Bevölkerung und des allgemeinen Motorisierungsniveaus dar. Die sich daraus ergebende Anzahl neuer Pkw wird abhängig vom Zeitpunkt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einem bestimmten Emissionsstandard zugeordnet.

ASTRA unterscheidet zwischen acht verschiedenen Fahrzeugtechnologien: Benzin (3 Hubraumkategorien), Diesel (2 Hubraumkategorien), Erdgas (CNG), Autogas (LPG), Hybrid-, Elektro-, Bioethanol- sowie Wasserstoff-Brennstoffzellen-Pkw. Die Wahrscheinlichkeit der Auswahl einer Technologie beim Kauf wird dabei auf Basis der Betriebskosten, der Anschaffungskosten, der Tankstelleninfrastruktur, sowie von nicht quantitativen Faktoren, wie z.B. Sicherheit, Design oder Image beeinflusst. Mittels eines Probit-Ansatzes werden diese dann berechnet und zur Differenzierung der neuen Pkws nach den Technologien verwendet (siehe Abbildung IV.5.6).

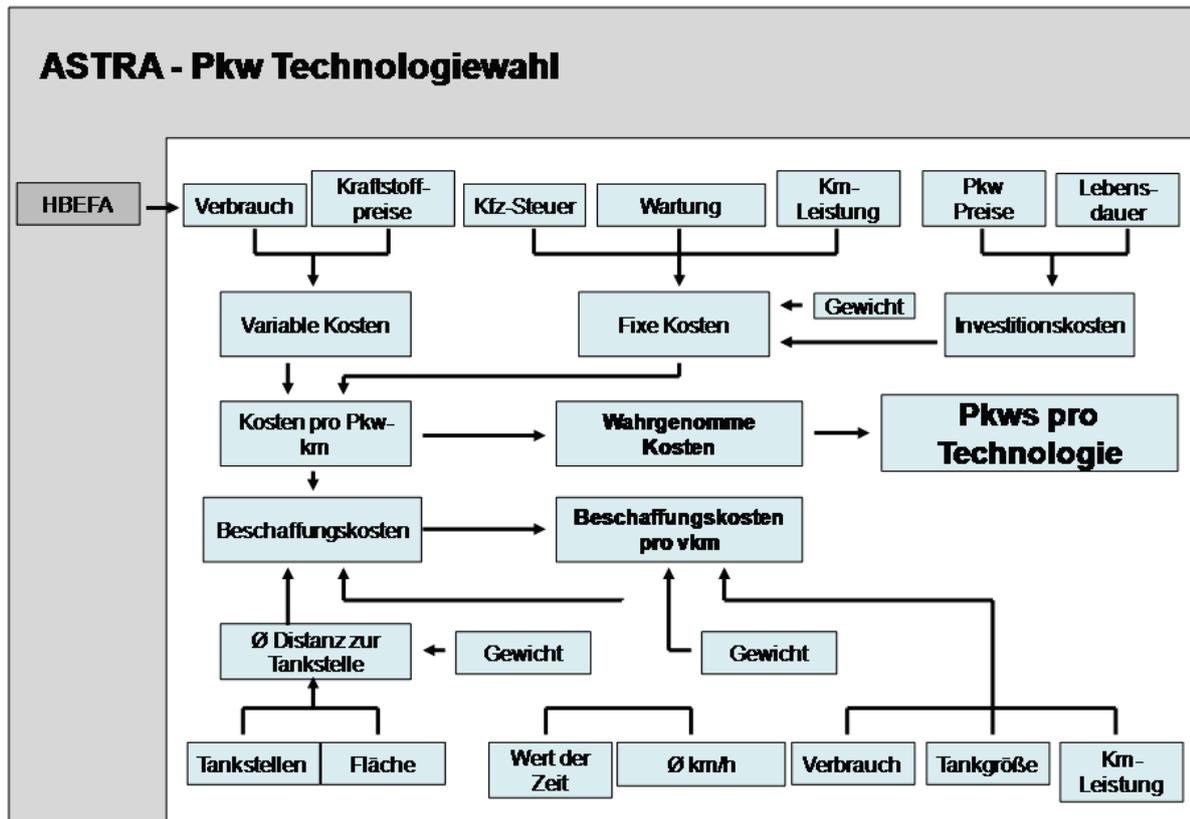


Abb. IV.5.6.: Simulation der Technologiewahl beim Pkw-Kauf in ASTRA

Die Registrierung neuer Busse, leichter und schwerer Nutzfahrzeuge wird im Gegensatz zum Pkw-Modell über die Verkehrsnachfrage abgeleitet, da die Entscheidungen im Gegensatz zum Zeitpunkt eines Pkw-Kaufs deutlich stärker ökonomisch getrieben sind. Ansonsten unterscheiden sich diese Flottenmodelle nur wenig vom Pkw-Modell. In allen Modellen werden die Bestände differenziert nach Emissionsstandards abgebildet.

#### IV.5.4.5. Modellierung der Emissionen

Die Berechnung der jährlichen Emissionen in ASTRA berücksichtigt die für den Verkehr bedeutendsten Luftschadstoffe  $\text{NO}_x$ , CO und VOC. Darüber hinaus simuliert ASTRA noch die Entwicklung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Entwicklungen bei der Belastung durch Feinstaub können im ASTRA Modell nur grob abgeschätzt werden, da ASTRA Verkehrsflüsse nicht auf die reale Verkehrsinfrastruktur in feiner geografischer Auflösung verteilt. Somit lassen sich mit ASTRA keine

exakten Aussagen über die Feinstaubbelastungen an stark befahrenen, urbanen Straßen machen. Bei der Berechnung der jährlichen Frachten von Luftschadstoffen geht das Modell ähnlich vor. Jedem Straßen-Fahrzeug, unterschieden nach Kraftstoffart und Motorgröße, werden anhand der Ergebnisse des Handbuchs der Emissionsfaktoren 3.1 (HBEFA (2010)) Emissionsfaktoren für die oben genannten Luftschadstoffe zugeordnet. Die im Fahrzeugflottenmodell errechneten Anteile der verschiedenen Fahrzeugkategorien werden dann in Kombination mit den unterschiedlichen durchschnittlichen Fahrleistungen in Anteile an den gesamt gefahrenen Fahrzeug-km pro Verkehrsmittel umgerechnet. Diese ermöglichen mit den simulierten Personen- bzw. Güterverkehrsleistungen pro Jahr die Berechnung der Luftschadstoffmengen (und CO<sub>2</sub>) pro Jahr.



## IV.6. Szenarien und Ergebnisse

ASTRA ermöglicht die Simulation zahlreicher verschiedener verkehrs- und umweltpolitischer Instrumente. Diese Instrumente lassen sich in drei Bereiche unterteilen:

- Regulatorische Maßnahmen,
- Marktmechanismen und
- Anreizpolitik.

Zu den wichtigsten und effizientesten regulatorischen Maßnahmen im Bereich Verkehr hinsichtlich der Reduktion von Luftschadstoffen gehören sicher die Festlegung von Standards (z.B. Emissionsstandards für Fahrzeuge), von Geschwindigkeitsbegrenzungen (z.B. Höchstgeschwindigkeit auf BAB), von Auflagen an die Kfz-Hersteller (z.B. CO<sub>2</sub>-Verpflichtung) und allgemeinen Zugangskontrollen (z.B. Umweltzonen). Marktmechanismen können weiter unterteilt werden in preisliche Maßnahmen (z.B. Mauteinführung und emissionsdifferenzierte Gebühren für andere Verkehrsträger), in CO<sub>2</sub>-Emissionshandel und fiskalpolitische Maßnahmen (z.B. Besteuerung von fossilen Kraftstoffen). Maßnahmen im Bereich der Anreizpolitik können Instrumente in den Bereichen Forschungsförderung, Subventionen, Mobilitätsmanagement und Investitionspolitik umfassen.

## IV.6.1. Basisszenario

### IV.6.1.1. Definition des Basisszenarios

Um die Auswirkungen der in den Emissionsreduktions-Szenarien gebündelten Instrumente darzustellen, wurde ein Basisszenario definiert, mit dem alle getesteten Szenarien verglichen werden. Das Basisszenario soll dabei nicht als Projektion der wahrscheinlichsten, wirtschaftlichen Verkehrs- und Emissionsentwicklung bis 2020 verstanden werden. Es berücksichtigt die bis Anfang 2010 von der deutschen, sowie der europäischen Politik beschlossenen Maßnahmen im Bereich Verkehr und Umwelt. Das Basisszenario orientiert sich dabei stark am Referenz-Szenario aus iTREN-2030<sup>1</sup> (Fiorello u. a. (2009)). Zusätzlich wurden die ökonomischen Auswirkungen der weltweiten Wirtschaftskrise in ASTRA implementiert.

Das Basisszenario beinhaltet einige Annahmen zur Entwicklung sozioökonomischer Indikatoren. Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung orientieren sich an der Bevölkerungsabschätzung der UN bis 2050. Ökonomisch wird keine weitere Krise bis 2020 im Basisszenario erwartet. Eine weitere wichtige Annahme betrifft den Bereich Verkehr in seiner heutigen Form besonders: die Annahme über die Entwicklung des Ölpreises. Ein Anstieg des Ölpreises leicht über die in der Spitze in 2008 erreichten Preise wird bis 2020 erwartet.

Technologisch geht das Basisszenario bereits von einer jährlichen Verbesserung der Energieeffizienz von 0,5% aus. Die im Rahmen des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität beschlossenen Maßnahmen und Auswirkungen, bei der insgesamt 500 Mio. Euro in die Forschung und Entwicklung von Elektromobilität investiert werden, sind ebenfalls Bestandteil des Basisszenarios.

Politisch berücksichtigt das Basisszenario die Straßennutzungsgebühren für schwere Lkw ohne weitere Veränderung der Kosten pro gefahrenem Kilometer. Die vorgesehene langsame Umsetzung der europäischen Korridore (TEN-T) ist ebenfalls berücksichtigt, wie die Umstellung der Kfz-Steuer auf CO<sub>2</sub>-Basis ab

---

<sup>1</sup>iTREN-2030 (Integrated transport and energy baseline until 2030): Projekt aus dem 6. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission, DG TREN.

Mitte 2009. Von Seiten der Regulierung wird keine weitere Verschärfung der Emissionsstandards für nicht straßengebundene Verkehrsmittel angenommen. Die Verpflichtung der Hersteller von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen zur Einhaltung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten bis 2020 (130 g CO<sub>2</sub> pro km bis 2012 und 95 g CO<sub>2</sub> pro km bis 2020) ist Bestandteil des Basisszenarios. Eine Einführung des Emissionsstandards Euro 6 ist schrittweise von 2012 bis 2014 für alle Straßenverkehrsmittel vorgesehen. Im Folgenden wird das Basisszenario für den Bereich Verkehr mit REF abgekürzt.

#### IV.6.1.2. Ergebnisse des Basisszenarios (REF)

Die wirtschaftliche Entwicklung im Basisszenario ist deutlich geprägt durch die Auswirkungen der Wirtschaftskrise in 2008 und 2009. Abbildung IV.6.1 verdeutlicht, dass besonders die Exporte und die Investitionen davon stark negativ beeinflusst wurden.

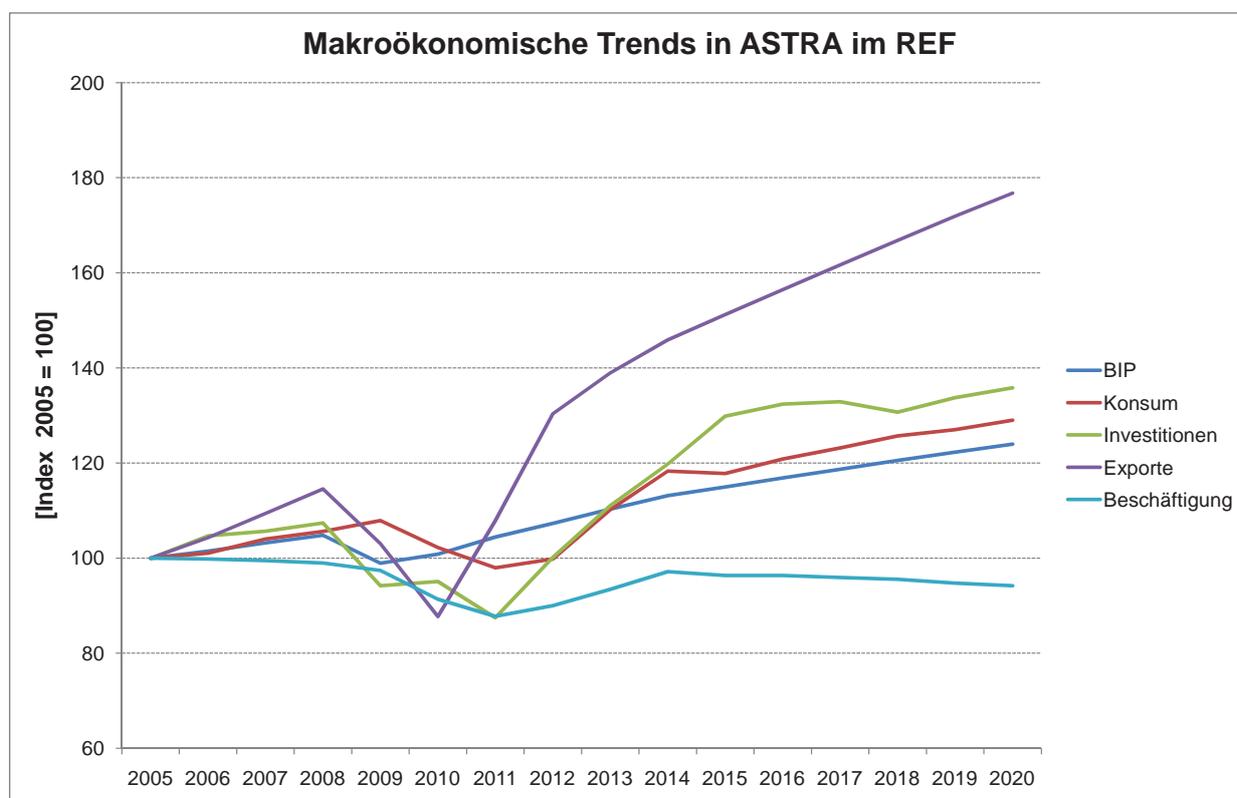


Abb. IV.6.1.: Makroökonomische Trends im REF

Im Gegensatz zu vielen anderen Europäischen Volkswirtschaften konnte Deutschland sehr schnell wieder ein starkes Wachstum des BIP realisieren. Trotz wachsender Staatsverschuldung und den finanziellen Problemen einiger europäischer Volkswirtschaften sowie den USA geht das Basisszenario nicht von einer möglichen kommenden Krise bis 2020 aus.

Das reale BIP wächst sicherlich bedingt durch den starken Aufschwung in 2010 und voraussichtlich auch in 2011 durchschnittlich um jährlich 1,9% zwischen 2010 und 2020. Das starke BIP-Wachstum macht sich trotz leicht zurückgehender Beschäftigung bis 2020 infolge eines Mangels besonders an Fachkräften in einem Anstieg der Binnennachfrage um 3% jährlich erkennbar. ASTRA schätzt die positive Wirkung bei Investitionen und Exporte mit einem durchschnittlichen Anstieg von ca. 5% pro Jahr bis 2020.

Das berechnete starke Wirtschaftswachstum in Deutschland bis 2020 bewirkt beim Personenverkehr zwar nur eine minimal steigende Anzahl an jährlich zurückgelegten Wegen, die steigende individuelle Motorisierung (siehe Abbildung IV.6.2) und die Zunahme des Anteils an Fahrten über längere Distanzen bewirken jedoch einen Anstieg der Personenverkehrsleistung (gemessen in Personen-km) von jährlich 1% bis 2020. Dabei zeichnet sich eine leichte Veränderung des Modal Split ab. Der Anteil der im Pkw zurückgelegten Personen-km steigt um etwas mehr als 2% auf knapp 75% bis 2020 an.

Der Güterverkehr und insbesondere der Schiffsverkehr war durch die Krise besonders stark betroffen. Abbildung IV.6.3 verdeutlicht diese Entwicklung.

Die Berechnungen im REF mit ASTRA ergeben ein durchschnittliches jährliches Wachstum der Güterverkehrsleistung von 1,6% bis 2020. Besonders stark mit jährlich 3,2% wird das Wachstum des Güterverkehrs in Tonnen-km im Bereich der Seeschifffahrt prognostiziert. Dabei nicht enthalten ist der Schiffsverkehr zwischen Deutschland und Ländern außerhalb der EU27 plus Norwegen und der Schweiz. Da ASTRA die Binnenschifffahrt nicht als gesondertes Verkehrsmittel betrachtet und diese mit dem Schienengüterverkehr zusammengefasst ist, kann nur eingeschränkt Aussage über das Wachstum dieses Bereiches gemacht werden. Der

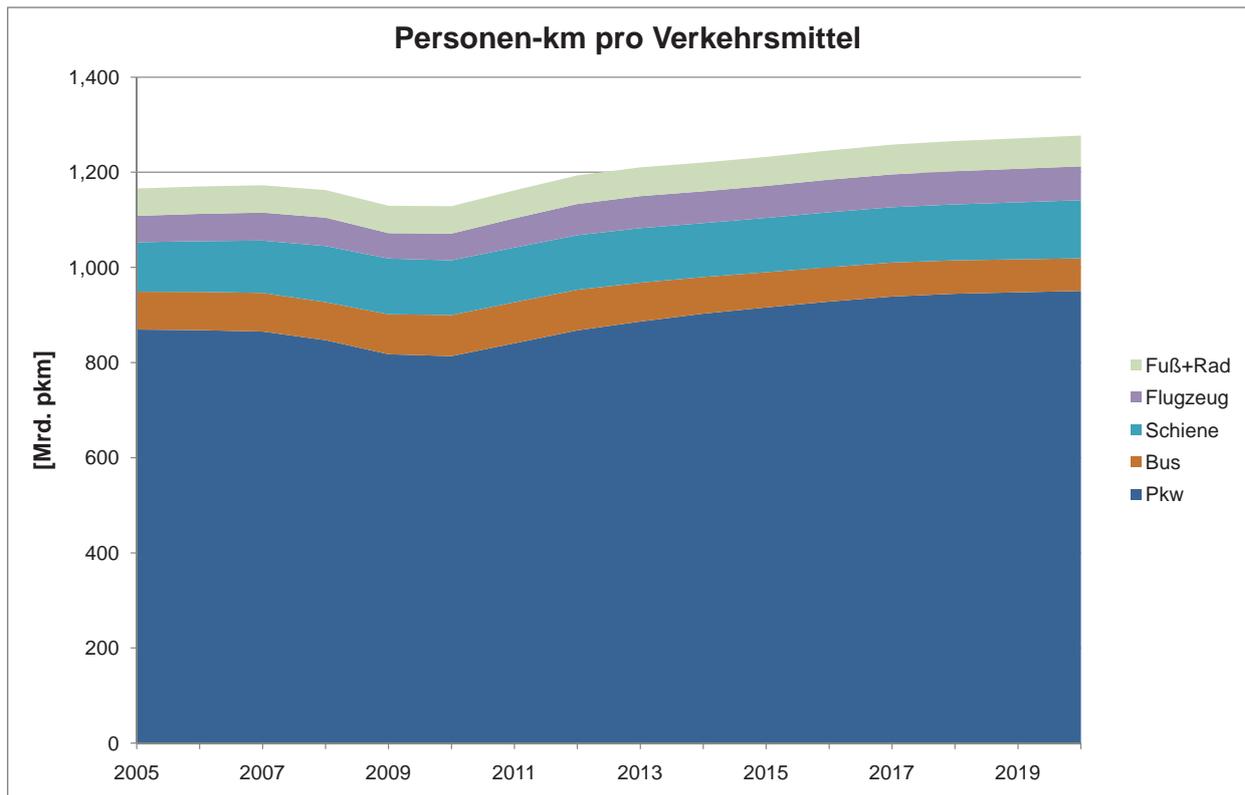


Abb. IV.6.2.: Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel im REF

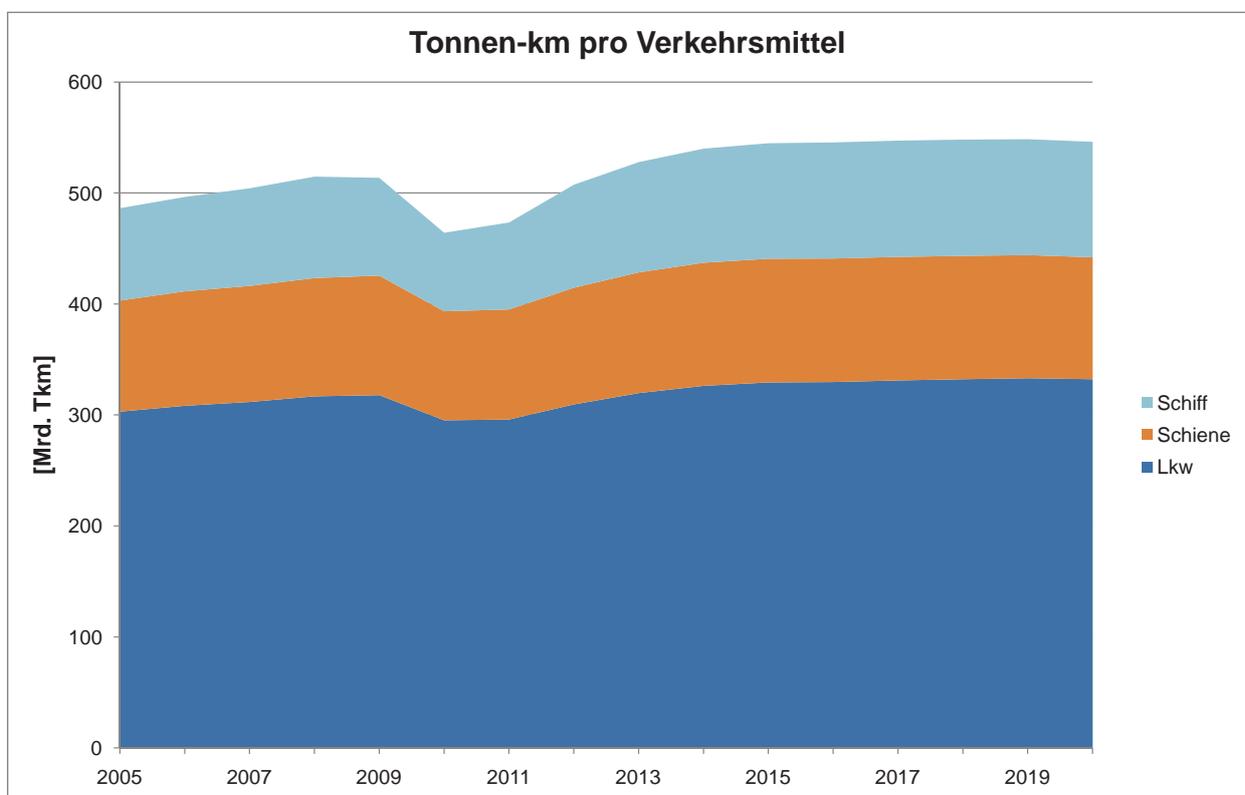


Abb. IV.6.3.: Güterverkehrsaufkommen pro Verkehrsmittel im REF

Straßengebundene Güterverkehr verliert nach der Simulation des Basisszenarios in ASTRA ca. 3% im Modal Split zwischen 2010 und 2020. Im Jahr 2020 haben schwere Nutzfahrzeuge einen Anteil von ca. 61% an den gesamten Tonnen-km, während die Schiene und die Binnenschifffahrt mit zusammen 20% leicht verlieren und die Seeschifffahrt mit 19% stark gewinnt.

Die Anstrengungen der Bundesregierung in Form des nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität (BMVBS (2009)) oder der Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (Bundesregierung (2004)) zeigen sich im Basisszenario in Form eines zunehmenden Anteils an Pkw mit alternativen Antrieben bis 2020. Der Anteil alternativer Antriebe bei Pkw steigt im Basisszenario bis 2020 auf knapp 16%. Hauptsächlich Benziner werden durch alternative Antriebe substituiert und haben laut den Berechnungen in ASTRA nur noch einen Anteil von ca. 47% an der gesamten Pkw-Flotte in Deutschland im Jahr 2020. Die angestrebten Förderungen besonders für batterieelektrische Kraftfahrzeuge (BEV) und die positiven exogenen Annahmen bzgl. der Preisentwicklung im Bereich der alternativen Antriebe führen zu insgesamt 7,8 Mio. Pkw mit alternativen Antrieben bis 2020. Deutlich stärker als von der Bundesregierung anvisiert steigt die Anzahl der reinen Elektromobilität im Basisszenario auf 3,9 Mio. Pkw. Pkw mit Hybridtechnologie, sowie Erdgas-Pkw sind neben den BEV die bedeutendsten alternativen Antriebsarten.

Insgesamt steigt die Motorisierung im Basisszenario von ca. 42 Mio. Pkw in 2010 auf 46,5 Mio Pkw. in 2020 an. Da die prognostizierte Bevölkerung zwischen 2010 und 2020 von ca. 82.7 auf 82.5 Mio. Menschen sinkt, steigt die Motorisierung deutlich von 512 Pkw in 2010 auf 564 Pkw pro Tausend Einwohner in 2020.

ASTRA berechnet für alle im Verkehr relevanten Luftschadstoffe (CO, NO<sub>x</sub> und VOC) und das Treibhausgas CO<sub>2</sub> die direkten, sowie die indirekten Emissionen. Direkte Emissionen können unterteilt werden in Emissionen bei Betriebstemperatur des Fahrzeugs und Emissionen bei Kaltstart des Fahrzeugs. Dazu berechnet ASTRA noch die Emissionen, die bei der Herstellung und dem Transport des Kraftstoffs anfallen, sowie die durchschnittlichen Emissionen zur Produktion eines Fahrzeugs (Schade (2005)). Da die indirekten Emissionen über das Industriemo-

dell im otello IAM (integrated assessment model) bereits berechnet werden, beziehen sich alle im Bereich Verkehr dargestellten Emissionen auf den Betrieb der Fahrzeuge, also auf direkte Emissionen.

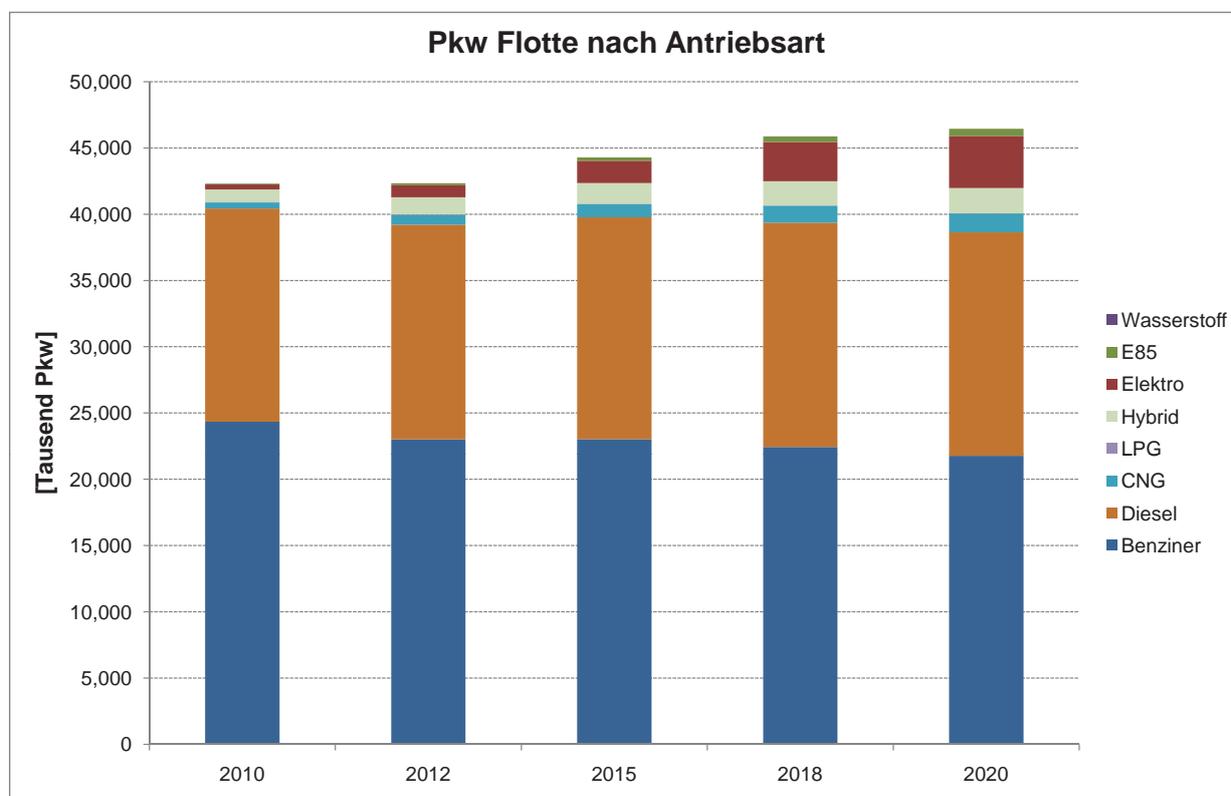


Abb. IV.6.4.: Motorisierung und Diffusion alternativer Antriebe im REF

Abbildung IV.6.5 zeigt die Entwicklung der direkten Emissionen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> für die in ASTRA abgebildeten Verkehrsmittel im Personen- sowie im Güterverkehr. Insgesamt steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 2010 und 2020 noch leicht um ca. 0,3% jährlich auf 166,9 Mt. an. Dies ist zum einen dem deutlichen Aufschwung nach der Wirtschaftskrise zuzurechnen, zum anderen aber auch ein Einfluss der Einführung des Emissionsstandards Euro 6. Laut HBEFA (2010) steigt der Verbrauch verglichen mit Euro 5 Fahrzeugen bei Diesel Lkw und Pkw an. Hier zeigt sich, dass die weitere Verschärfung der Grenzwerte bei Luftschadstoffen wie z.B. NO<sub>x</sub> durch einen höheren Verbrauch und damit mehr Treibhausgasemissionen erkauft wird.

Verkehrsmittel wie die Bahn erscheinen in diesem Zusammenhang nur mit dem Anteil nicht-elektrifizierter Fahrten, da die Emissionen bei der Stromerzeugung nicht als direkte Emissionen gewertet werden. Zudem muss bei der Bewertung berücksichtigt werden, dass ASTRA nur den inner-europäischen Verkehr simuliert. Da insbesondere der globale Schiffsverkehr sowie der interkontinentale Flugverkehr mit starkem Wachstum prognostiziert werden, wachsen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr eigentlich noch stärker als es in Abbildung IV.6.5 illustriert ist.

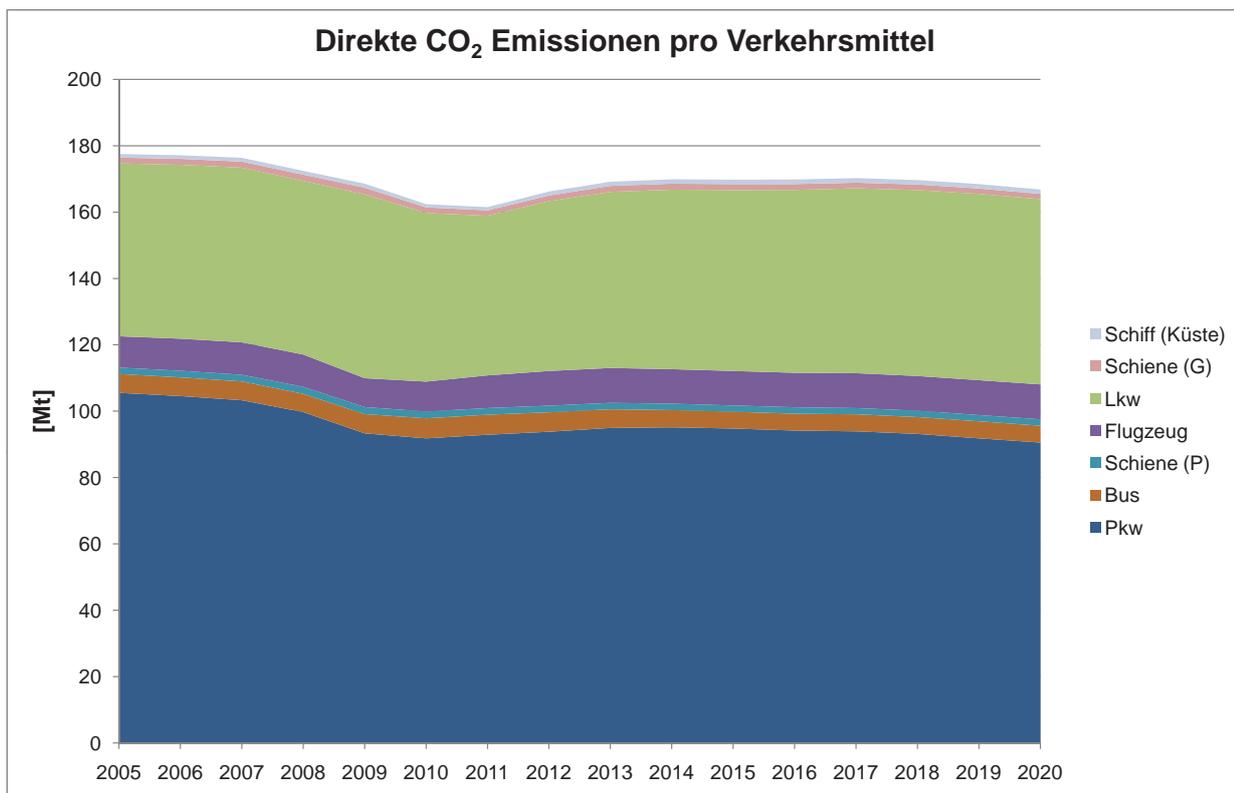


Abb. IV.6.5.: Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel im REF

Der Straßenverkehr ist der Hauptverursacher und laut REF für ca. 88% der gesamten, direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr verantwortlich. Der Anteil der Luftfahrt steigt leicht von 5,6% auf 6,3% bis 2020.

Bei den direkten NO<sub>x</sub>-Emissionen machen sich die deutlichen Verschärfungen der Grenzwerte besonders bei Diesel-Fahrzeugen bis Euro 6 bemerkbar. Die gesamten NO<sub>x</sub>-Emissionen sinken jährlich zwischen 2010 und 2020 um 2,9% auf ca. 322 kt. Vergleicht man die Ergebnisse mit 2005, dann kann man von einer Halb-

rung der Emissionen sprechen. Da zum einen die durchschnittliche Lebensdauer bei Zügen und Flugzeugen deutlich größer ist als bei Pkw und Nutzfahrzeugen und zum anderen die Emissionsstandards bei diesen stärkere Reduktionen erfordern, sinkt der Anteil des Straßenverkehrs an den gesamten  $\text{NO}_x$ -Emissionen von 60% in 2010 auf 35% in 2020. Laut den Berechnungen von ASTRA wird die Luftfahrt mit ca. 49% in 2020 der Hauptverursacher von  $\text{NO}_x$ -Emissionen sein.

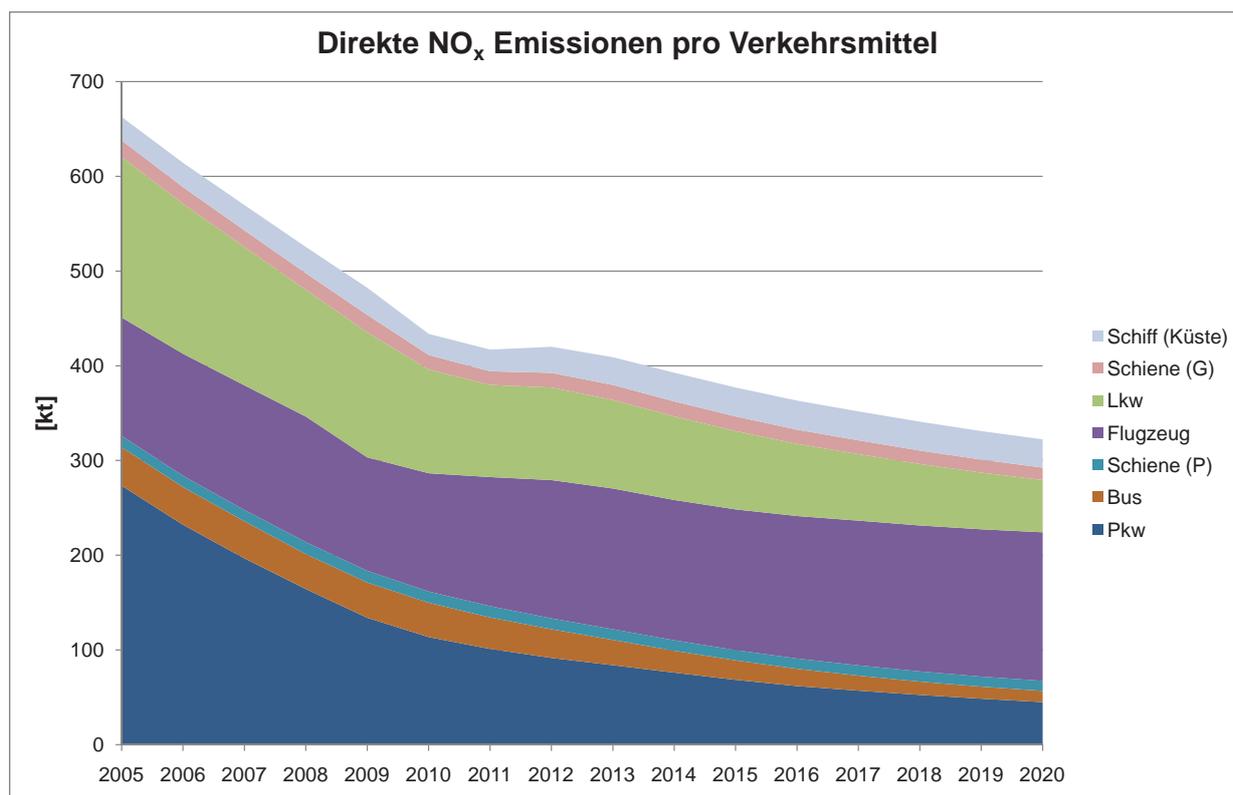


Abb. IV.6.6.: Direkte  $\text{NO}_x$ -Emissionen pro Verkehrsmittel im REF

Im Gegensatz zu  $\text{NO}_x$  wurden die Grenzwerte für CO bei Pkw, Bussen und Lkw seit Euro 4 nicht weiter verschärft. Die direkten CO-Emissionen durch Pkw und Lkw sinken im Vergleich mit 2010 um ca. 43% bzw. 13% bedingt durch die stark abnehmende Anzahl an Fahrzeugen, die nur maximal die Euro 3 Norm erfüllen. Insgesamt prognostiziert das REF eine Absenkung der direkten CO-Emissionen um 36,6% verglichen mit 2010. Die technische Verbesserung der Fahrzeuge infolge der Verschärfung der Grenzwerte trägt somit trotz steigender Personen- und Güterverkehrsleistung zu einer Reduktion um 200 kt im Zeitraum zwischen 2010

und 2020 bei. Die gesamten direkten CO-Emissionen belaufen sich somit in 2020 im REF auf 346 kt pro Jahr.

Der Anteil der schweren Nutzfahrzeuge an den gesamten CO-Emissionen erhöht sich durch die größeren Einsparungen bei Pkw deutlich von 13% in 2010 auf 18% in 2020. Das Auto ist im REF trotzdem der Hauptverursacher von Kohlenstoffmonoxid mit einem Anteil von 72% in 2020. Das Flugzeug gewinnt etwas an Bedeutung und hat in 2020 einen Anteil von ca. 6%.

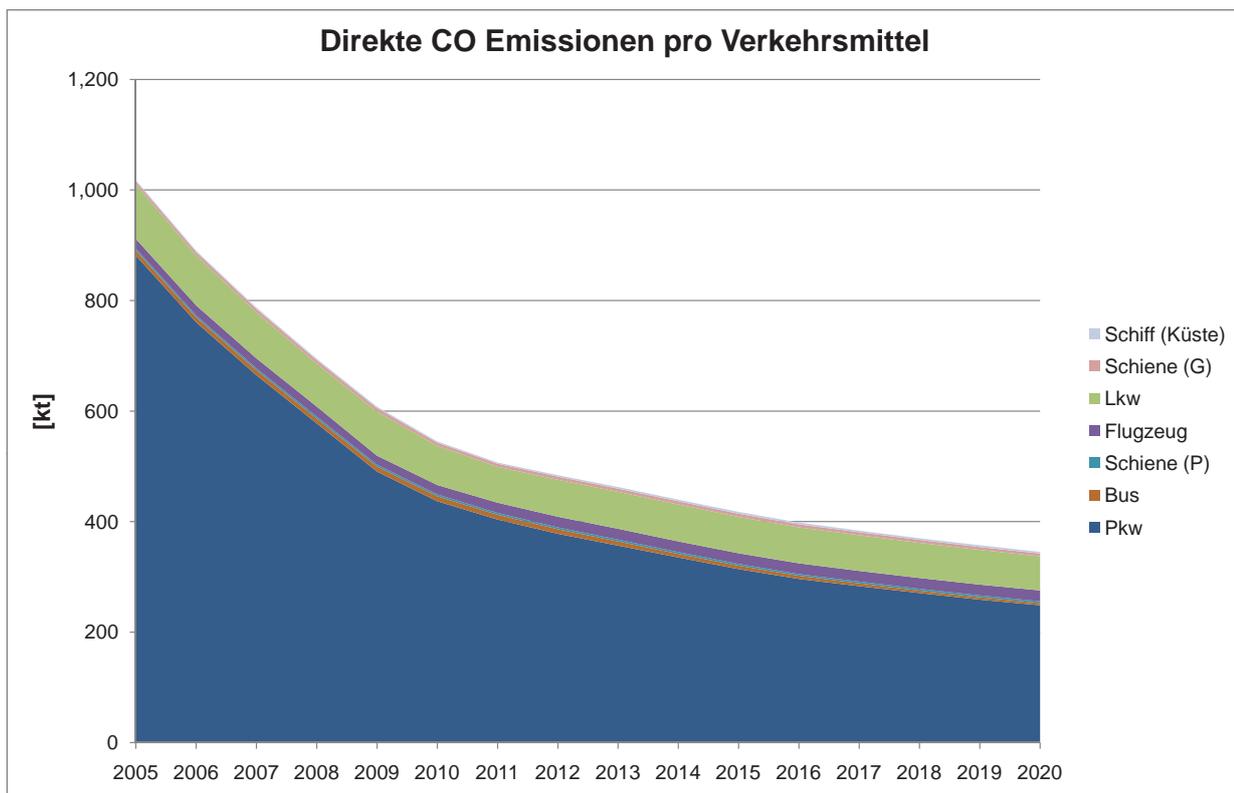


Abb. IV.6.7.: Direkte CO-Emissionen pro Verkehrsmittel im REF

Ein Blick auf Abbildung IV.6.8 verdeutlicht die Situation bei VOC (flüchtige organische Verbindungen wie z.B. Methan).

Das Auto als momentaner Hauptverursacher von direkten VOC-Emissionen wird bis 2020 im REF vom Lkw und dem Flugzeug überholt. Insgesamt sinken die jährlichen VOC-Emissionen durch den Verkehr jedoch von 59 kt in 2005 auf 36 kt in 2020. Verglichen mit 2010 ergibt sich nahezu eine Stagnation der VOC-Emissionen. Dies ist zum einen bedingt durch den Anstieg des Luftverkehrs

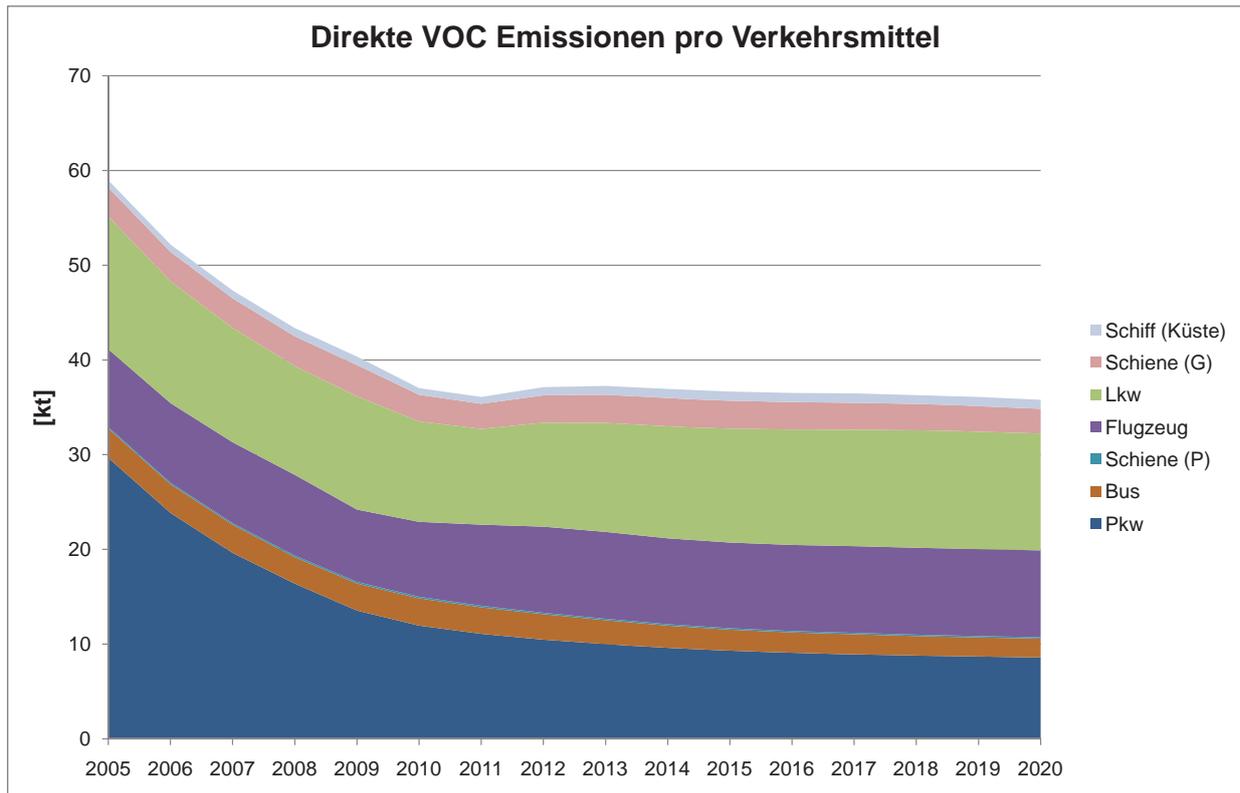


Abb. IV.6.8.: Direkte VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel im REF

und des Güterverkehrs auf der Straße, zum anderen aber auch ein Spiegelbild der technischen Verbesserungen in Form von kleineren VOC Grenzwerten. Beim Flugzeug kommt eine lange durchschnittliche Lebensdauer von Flugzeugen noch hinzu. Flugzeugtypen mit Turbinen der neuen Generation diffundieren somit deutlich langsamer als Pkws in die Flotten. Eine technische Verbesserung lässt sich somit erst über einen längeren Zeitraum als nur bis 2020 beobachten. Während die direkten VOC-Emissionen bei Pkw um 28% sinken, verzeichnet ASTRA im REF bei Lkw und Flugzeug eine Verschlechterung um jeweils ca. 16% bis 2020.

## IV.6.2. Szenarien zur Minderung von Luftschadstoffen

Eine Abschätzung der Auswirkungen von Instrumenten bzw. Politiken ist mit ASTRA auf verschiedene Art und Weise möglich. Zumeist werden die Simulationsergebnisse der Szenarien mit einem Basisszenario verglichen. Diese

Vorgehensweise findet sich hier wieder. Die dargestellten Ergebnisse zeigen somit die relative oder absolute Abweichung der Indikatoren bedingt durch die Instrumente und im Vergleich zur Situation im Basisszenario (REF). Die Ergebnisse des REF haben die Größenverhältnisse der Luftschadstoffemissionen zwischen den einzelnen Verkehrsmitteln verdeutlicht. Daraus geht hervor, dass eine optimale Reduktion von Emissionen nicht nur mit Maßnahmen für das hauptverantwortliche Verkehrsmittel erreicht werden kann. Eine eingleisige Ausgestaltung von Szenarien zur Reduktion von Luftschadstoffen birgt darüberhinaus die Gefahr von unerwünschten Verlagerungseffekten. Als Beispiel hierfür kann die isolierte Einführung einer Pkw Maut auf Bundesautobahnen betrachtet werden. Ein positiver Effekt entsteht dabei durch eine Verlagerung des Personenverkehrs von der Straße auf die Schiene. Zusätzlich werden jedoch auch Flugverbindungen attraktiver, was hinsichtlich der Luftschadstoffe einen ungewünschten Nebeneffekt hervorruft. Daher werden in otello Bündel von Instrumenten betrachtet und innerhalb von vier Szenarien implementiert.

Da ASTRA unterschiedlich gut Instrumente abbilden kann, wurden nur diese betrachtet, die gut modellierbar sind. Das sind zum einen Instrumente der Preispolitik und zum anderen Instrumente der Regulierungspolitik. Zu beiden Bereichen wurden Szenarien in zwei verschiedenen Ausprägungsarten implementiert: moderat und ambitioniert. Die Szenarien werden im Folgenden auch als Politikpakete bezeichnet, bzw. abgekürzt "PP".

#### **IV.6.2.1. Moderate Ausweitung der Preispolitiken (PP1)**

Das erste Instrumentenbündel PP1 testet eine moderate Ausweitung der Preispolitiken in Deutschland. PP1 umfasst die Implementierung von Instrumenten für die Verkehrsträger Straße, Flugzeug und Seeschifffahrt.

Für den Verkehrsträger Straße sind folgende Instrumente in ASTRA implementiert worden:

- Die streckenbezogene Straßennutzungsgebühr für schwere Nutzfahrzeuge (ab 12 Tonnen Gesamtgewicht), die 2005 in Deutschland eingeführt wurde und auf Bundesautobahnen und stark frequentierten Bundesstraßen eingesetzt wird, wird ab 2012 um 9 Cent pro km erhöht.
- Für Pkw wird eine ebenfalls streckenbezogene Straßennutzungsgebühr unabhängig vom erfüllten Emissionsstandard von 4 Cent pro gefahrenem km auf allen Bundesautobahnen ab 2012 erhoben.
- Im Gegenzug fällt die Kfz-Steuer ab 2012 weg.
- Zusätzlich wird die Pendlerpauschale schrittweise ab 2012 bis 2014 aufgehoben. Dadurch fallen laut Wuppertal Institut (Luhmann (2006)) jährlich steuerliche Begünstigungen i.H.v. 4 Mrd. Euro weg. Um die Wirkung dieses Instruments auf die Verkehrsverteilung und besonders die Verkehrsmittelwahl abzuschätzen, wurde der Wegfall der Begünstigung auf höhere Ausgaben pro gefahrenem Personen-km umgerechnet. Für alle Pkw-Fahrten von und zum Arbeitsplatz ab einer Distanz von 8 km wurden zusätzlich 0,7 Cent pro gefahrenem km gerechnet.

Für den Verkehrsträger Luftverkehr wurden folgende Instrumente im Modell implementiert:

- Die Besteuerung von Kerosin wird schrittweise von 2011 bis 2013 auf die Besteuerung von Benzin angepasst.
- Die Befreiung für Tickets auf internationalen Flügen von der Mehrwertsteuer wird ab 2012 abgeschafft.

Die Seeschifffahrt wurde ebenfalls mit einer preislichen Maßnahme belegt:

- Die Steuerbefreiung von Schiffsdiesel wird schrittweise zwischen 2011 und 2012 ebenfalls wegfallen.

Die, bezogen auf die Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasbilanzen effizienteren, Verkehrsmittel Zug und Bus wurden nicht mit zusätzlichen preislichen Instrumenten belastet.

Preisliche Instrumente wie in diesem Szenario implementiert können in ASTRA zahlreiche Änderungen bewirken. Direkte Einflüsse haben preisliche Veränderungen auf die gefahrenen Distanzen und die Verkehrsmittelwahl. Darüber hinaus kann auch der Staatshaushalt beeinflusst werden, da evtl. Einnahmen aus Steuern wegfallen oder hinzukommen. Zusätzlich wird der private Konsum verändert, da sich die Kosten für Mobilität verändern. Substitutionseffekte können daraus entstehen, die wirtschaftliche Änderungen zur Folge haben. Kostenänderungen haben auch Auswirkungen auf die Vorleistungsmatrix in der Input-Output Tabelle und verändern diese und damit die Bruttowertschöpfung. Der Außenhandel ist durch Veränderungen der Transportkosten ebenfalls betroffen. Letztlich bewirken Kostenänderungen für die Nutzung von Pkw auch eine Änderung bei der Motorisierung und evtl. sogar bei der Wahl der Antriebstechnologie bei Pkw.

Abbildung IV.6.9 veranschaulicht die Wirkung der Preisinstrumente in PP1 auf die Personenverkehrsleistung ausgedrückt in Personen-km. Im Vergleich zum REF sinkt die gesamte Personenverkehrsleistung um 3,4% oder 43 Mrd. Personen-km bis 2020. Verantwortlich hierfür sind die preislich durch Maut, Wegfall der Entfernungspauschale, Verteuerung von Kerosin und von internationalen Tickets besonders stark betroffenen Verkehrsmittel Pkw und Flugzeug. Bis 2020 schätzt ASTRA 38 Mrd. Personen-km weniger mit dem Pkw und 11 Mrd. Personen-km weniger mit dem Flugzeug ein. Der Busverkehr profitiert von der Verteuerung dieser beiden Verkehrsmittel am meisten, kurzfristig auch die Schiene. Eine Zunahme der mit Bus zurückgelegten Personen-km um 8,8% verdeutlicht die zunehmende Attraktivität dieses Verkehrsmittels verglichen mit dem REF. Das Vermeiden von längeren Fahrten und Ersetzen durch kürzere Fahrten bewirkt zudem, dass auch die Schiene nach einer kurzen positiven Veränderung wieder verliert und bis 2020 auf gleichem Niveau wie im REF endet.

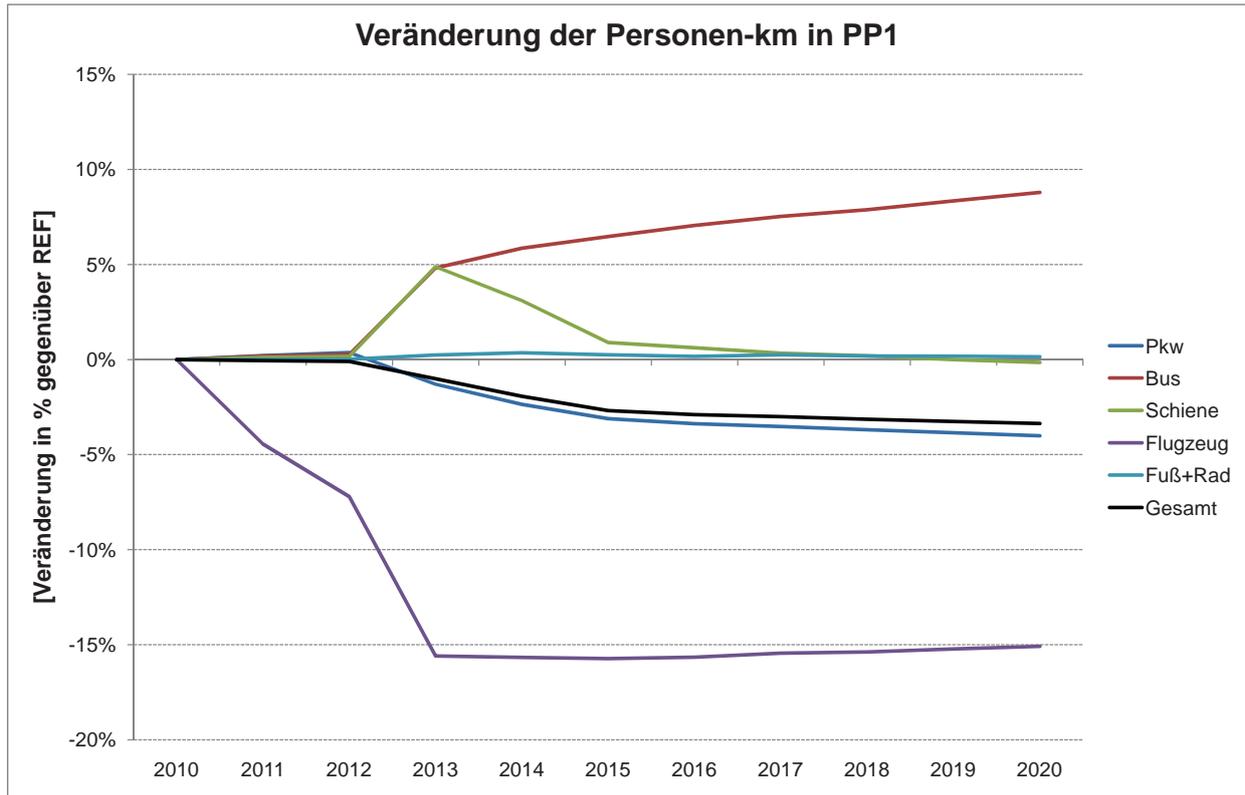


Abb. IV.6.9.: Veränderung der Personen-km pro Verkehrsmittel in PP1

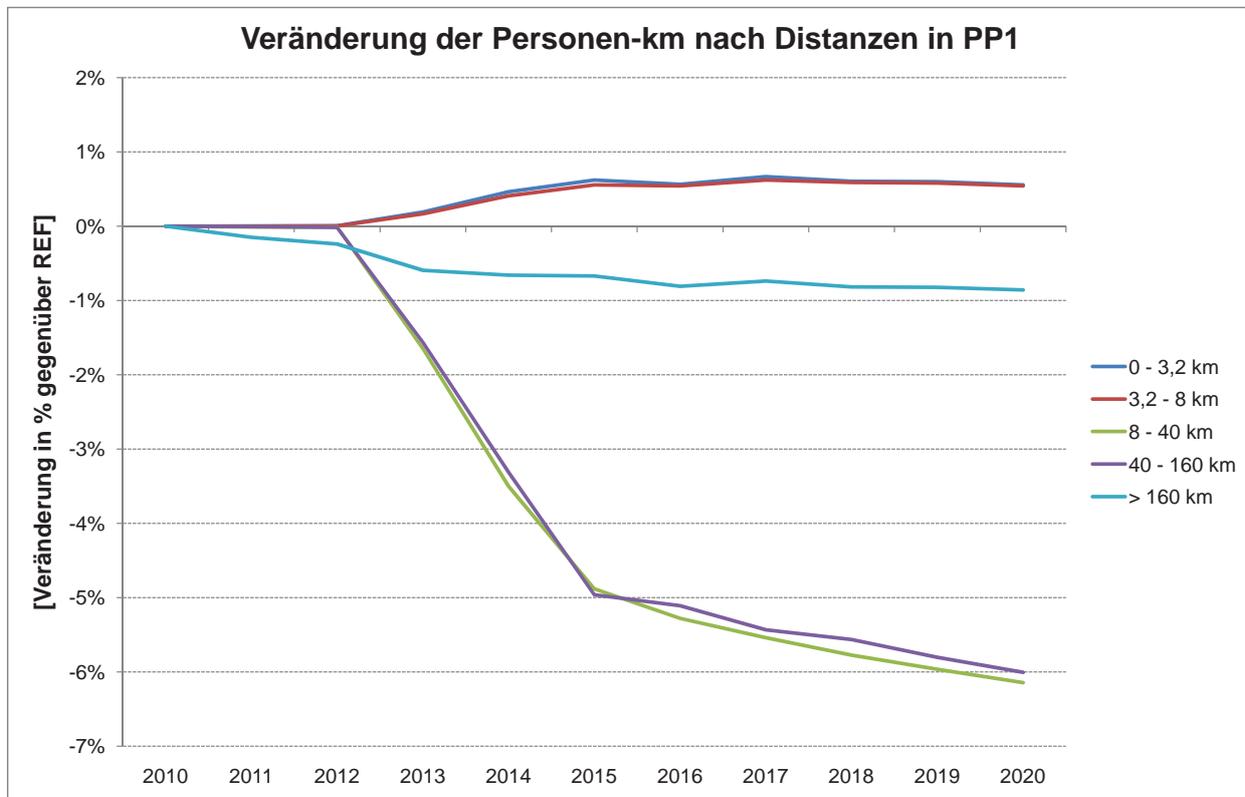


Abb. IV.6.10.: Veränderung der gefahrenen Personen-km nach Distanzen in PP1

Abbildung IV.6.10 zeigt die entstehenden Verteilungseffekte auf mögliche Ziele. Besonders die mittleren und langen Distanzen sind von den Instrumenten betroffen. Mauteinführung und mittelfristig auch die hinzukommenden Effekte der wegfallenden Entfernungspauschale (ÖI u. a. (2008)) zeigen ihre Wirkung auf die Personen-km in diesen Distanzbändern. Die Verteuerung von Flugtickets zeigt sich besonders im Rückgang der besonders langen Fahrten deutlich über 160 km Distanz. ASTRA prognostiziert einen Rückgang der Fahrten über 160 km Distanz von knapp 1%. Die mittleren Distanzen zwischen 8 km und 160 km sind deutlich stärker betroffen mit einem Minus von jeweils ca. 6%. Die Tendenz zu kürzeren Wegen zeigt die Zunahme der Personen-km über Distanzen kleiner als 8 km von ca. 0,6%.

Der Güterverkehr ist auf den Verkehrsträgern Straße durch die Erhöhung der Mautsätze und bei der Seeschifffahrt durch die Verteuerung von Schiffsdiesel betroffen. Beide Preisinstrumente beeinflussen den Güterverkehr auf vielfältige Weise. Eine Steigerung der durchschnittlichen Transportkosten induziert über alle Verkehrsmittel schwächer wachsende Exporte, was das internationale Güterverkehrsaufkommen dämpft. Beim innerdeutschen Güterverkehr entstehen Verlagerungseffekte hin zu stärker regionalen Strukturen. Die durchschnittlichen Distanzen sinken. Stark beeinflusst wird die Verkehrsmittelwahl. Der einzige nicht betroffene Verkehrsträger, die Schiene, profitiert von der Einführung der Preisinstrumente.

Abbildung IV.6.11 zeigt die Auswirkung auf die Güterverkehrsleistung in jährlich gefahrenen Tonnen-km pro Verkehrsmittel im Vergleich mit dem REF. ASTRA prognostiziert eine relativ geringe Reduktion der Tonnen-km um 1% bis 2020 im Vergleich zum REF. Vergleichsweise stark betroffen ist die Seeschifffahrt mit 2,3% geringerer Güterverkehrsleistung. Der Güterverkehr auf der Straße kann mittels der Erhöhung der Mautsätze moderat um 1% bis 2020 verringert werden. Dies verdeutlicht, dass die Kosten durch km-bezogene Straßennutzungsgebühren mit weniger als 10% selbst im Fernverkehr nur eine geringe Rolle spielen. Der größte Anteil an den Gesamtkosten stellen nach wie vor Personalkosten dar. Die Preisinstrumente bewirken verglichen mit dem REF jedoch nur eine temporäre

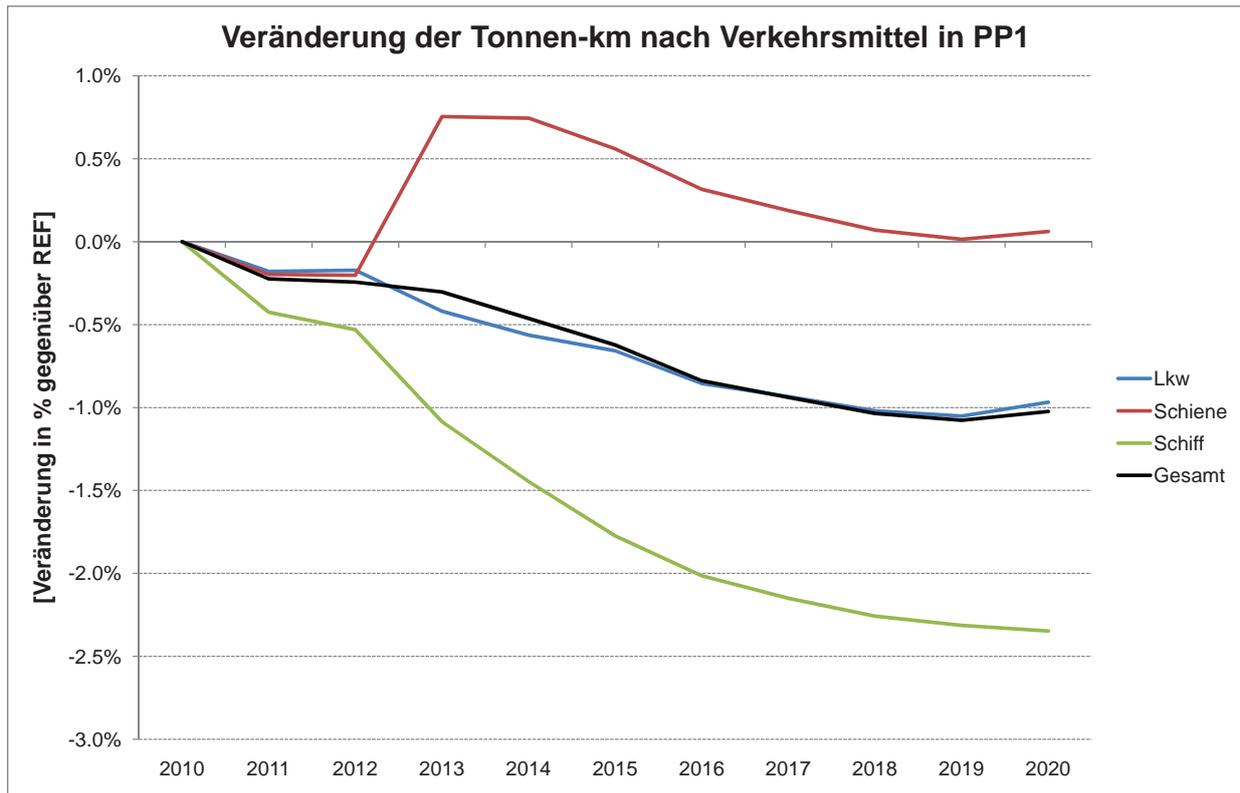


Abb. IV.6.11.: Veränderung der Güterverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP1

Zunahme der Güterverkehrsleistung auf der Schiene. Bis 2020 beeinflusst das insgesamt schwächere Güterverkehrsaufkommen eine Verflachung dieses Trends. Ein gering positiveres Wachstum des Schienengüterverkehrs um 0,1% verglichen mit dem REF bis 2020 ist die Folge.

Bezogen auf die gefahrenen Distanzen zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Personenverkehr. Eine Analyse der Veränderung der Tonnen-km nach verschiedenen Distanzbändern zeigt Abbildung IV.6.12.

Der Einfluss der Mauterhöhung und der Verteuerung von Schiffsdiesel zeigt sich in sinkenden Güterverkehrsleistungen in den beiden Distanzbändern zwischen 150 km und 700 km und über 700 km. Verglichen mit dem REF sinken die Tonnen-km um 1,1% bzw. 1,7%. Ein Teil der Fahrten wird dabei durch kürzere Distanzen ersetzt, der andere Teil fällt weg. Die Güterverkehrsleistung steigt leicht mit 0,4% auf den kurzen Distanzen bis maximal 50 km Entfernung bis 2020 im Vergleich mit dem REF.

Preisinstrumente haben durch wirtschaftliche Auswirkungen und steigende durchschnittliche Kosten pro gefahrenem km auch Auswirkungen auf die

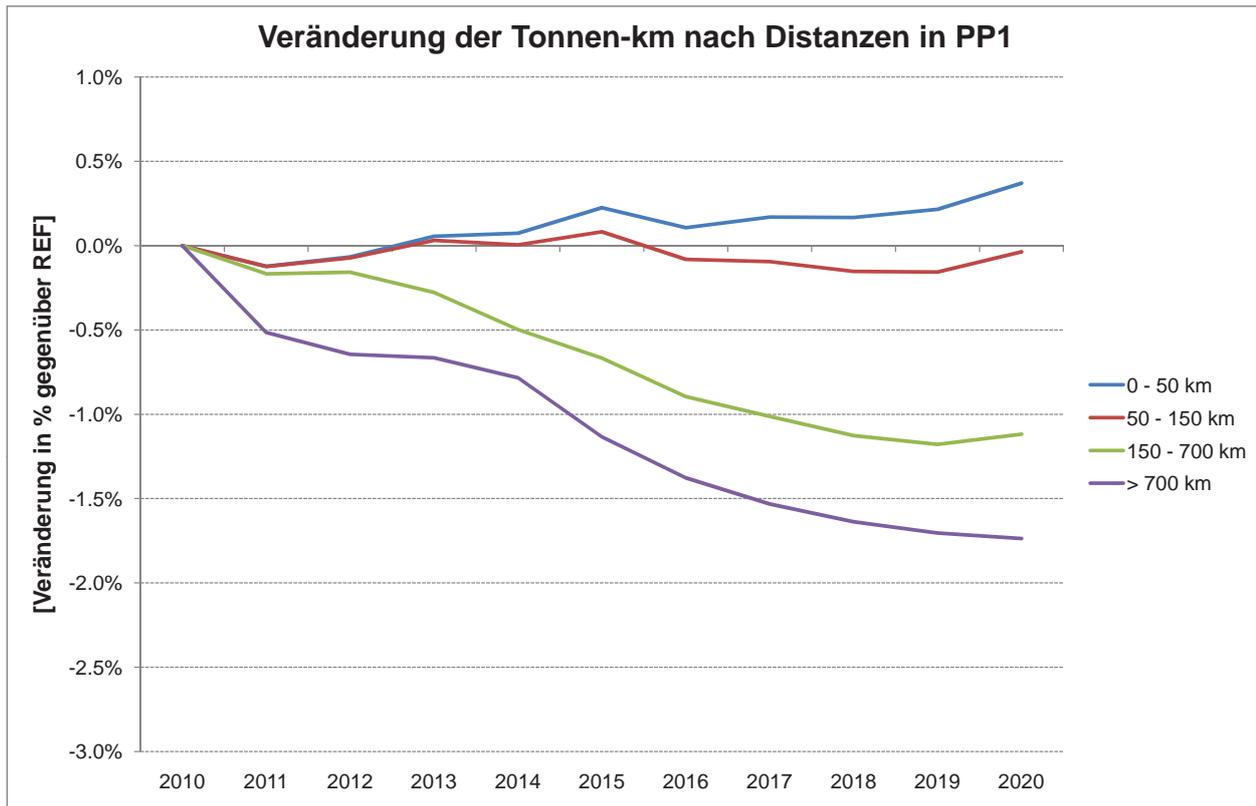


Abb. IV.6.12.: Veränderung der Güterverkehrsleitung nach Distanzen in PP1

Entwicklung der Motorisierung und die Attraktivität verschiedener Antriebsarten. Abbildung IV.6.13 skizziert in Form absoluter Veränderungen der Pkw Flotte differenziert nach Kraftstoffarten verglichen mit dem REF diese Effekte. Die gesamte Pkw-Flotte sinkt in PP1 um ca. 310 Tausend Fahrzeuge bis 2020. Relativ gesehen bedeutet dies ein Absinken der Pkw-Zahlen bis 2020 um 0,7% verglichen mit dem REF.

Zusätzlich zeigt sich ein ungewünschter Rebound-Effekt. Der als Kompensation der zusätzlichen Ausgaben durch die Einführung der km-bezogenen Straßennutzungsgebühren konzipierte Wegfall der CO<sub>2</sub>-basierten Kfz-Steuer bewirkt eine zunehmende Attraktivität der zuvor stärker besteuerten, konventionellen Pkw angetrieben mit Diesel bzw. Benzin. Alternative Antriebe wie Batterieelektrische Pkw oder Biokraftstoffe werden wirtschaftlich weniger interessant und verlieren dadurch Marktanteile. Auf 877 Tausend zusätzliche konventionelle Pkw in PP1 bis 2020 verglichen mit dem REF kommen 1,19 Millionen weniger Pkw mit al-

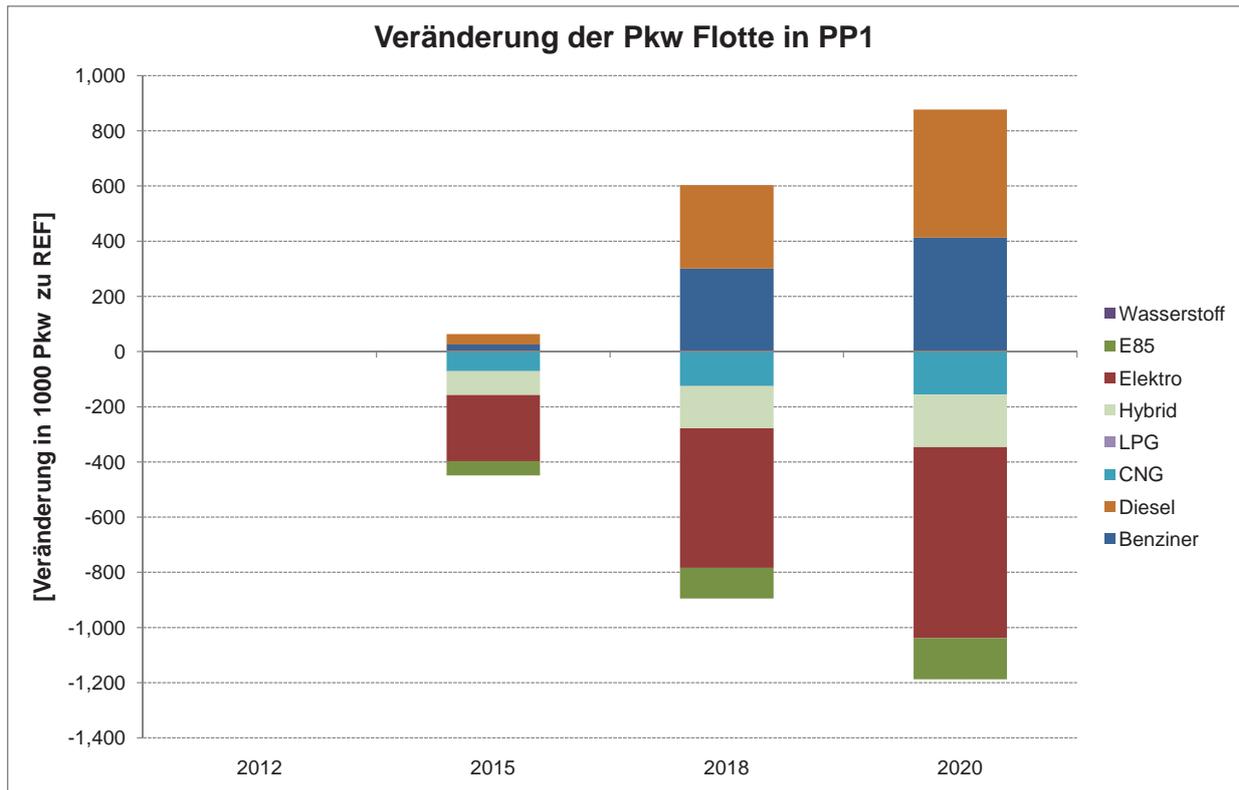


Abb. IV.6.13.: Veränderung der Pkw-Flotte nach Antriebsart in PP1

ternativen Antrieben. Dieser Effekt dämpft letzten Endes die gewünschten Reduktionen der Luftschadstoffe und besonders der Treibhausgasemissionen. Als Quintessenz kann abgeleitet werden, dass eine an die Emissionsstandards gekoppelte km-bezogene Straßennutzungsgebühr diesen ungewünschten Effekt nicht entstehen lassen würde, da in diesem Fall die effizienteren und schadstoffärmeren Pkw-Technologien bevorteilt würden.

Abbildung IV.6.14 zeigt die Auswirkung einer moderaten Ausgestaltung von Preisinstrumenten auf die direkten Emissionen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> im Vergleich mit dem REF. Insgesamt berechnet das ASTRA Modell eine moderate Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 2% oder ausgedrückt in absoluten Mengen um 3,1 Mega-Tonnen (Mt.) im Vergleich zum REF. Absolut gesehen tragen die Preisinstrumente bei Pkw und Flugzeug die größten Mengen mit jeweils ca. 1,6 Mt. an CO<sub>2</sub>-Reduktionen bei. Relativ gesehen bedeutet dies besonders beim Luftverkehr eine Verbesserung um ca. 15% bis 2020. Beim Pkw sind diese Veränderungen marginal mit nur 1,8% weniger CO<sub>2</sub> bis 2020 verglichen mit dem REF. Die

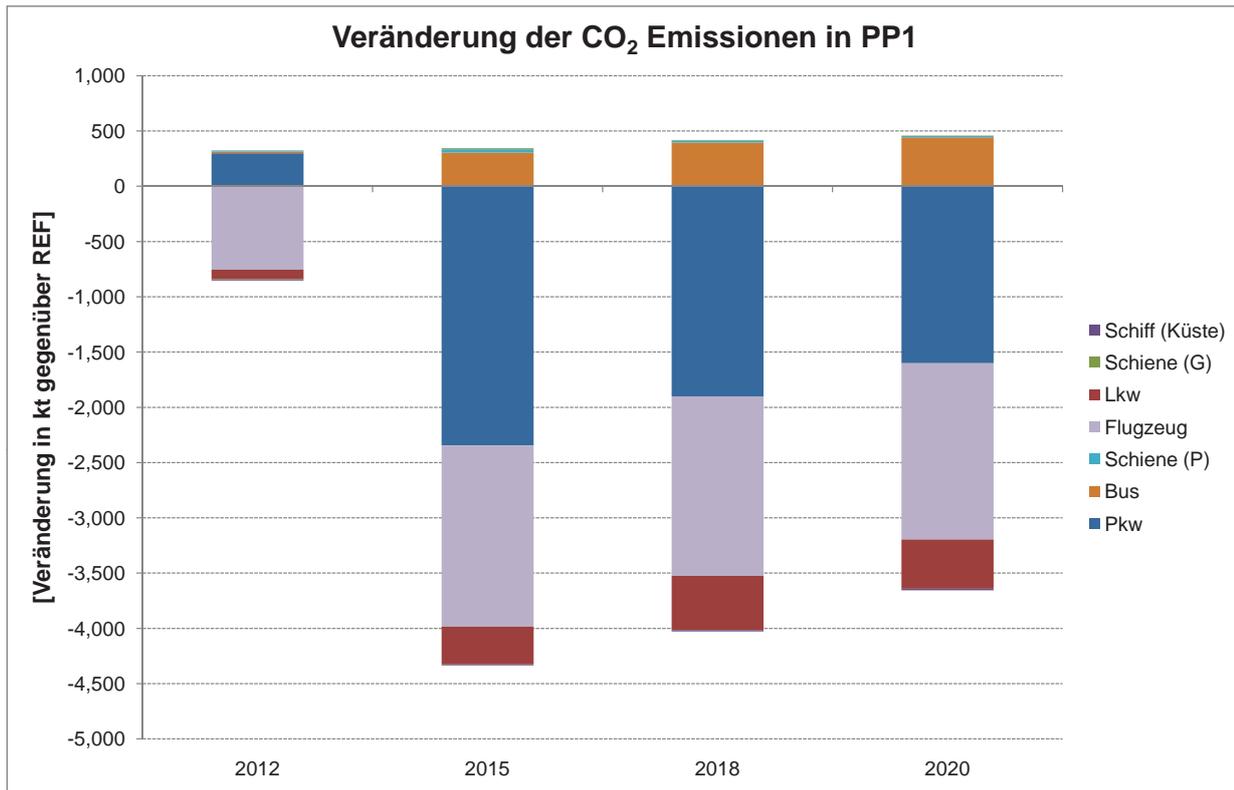


Abb. IV.6.14.: Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1

Verlagerungseffekte hin zur Schiene und besonders dem Busverkehr bewirken bei diesen Verkehrsträgern eine Steigerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 0,7% bzw. 8,7% bis 2020.

Bei den Stickstoffoxiden tragen vor allem die Preisinstrumente beim Flugzeug zu einer Senkung der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 8% bis 2020 im Vergleich zum REF bei (siehe Abbildung IV.6.15). Alleine im Luftverkehr prognostiziert ASTRA eine Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen um jährlich knapp 23 Kilo-Tonnen (kt) bis 2020. Insgesamt bedeutet dies eine Verringerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 22,6 kt bis 2020, da durch die Steigerung des Personenverkehrs auf der Schiene und mit dem Bus leicht höhere Emissionen hinzukommen. Die geringen Auswirkungen auf die Personenverkehrsleistung beim Pkw bewirken eine marginal bessere Situation hinsichtlich dieses Luftschadstoffes. Mit nur 2,5% weniger NO<sub>x</sub>-Emissionen trägt der Pkw zur Verbesserung der Emissionen bis 2020 bei.

Abbildung IV.6.16 demonstriert die Bedeutung der einzelnen Verkehrsmittel bezüglich der Emissionen des Luftschadstoffes Kohlenstoffmonoxid (CO). Der Pkw

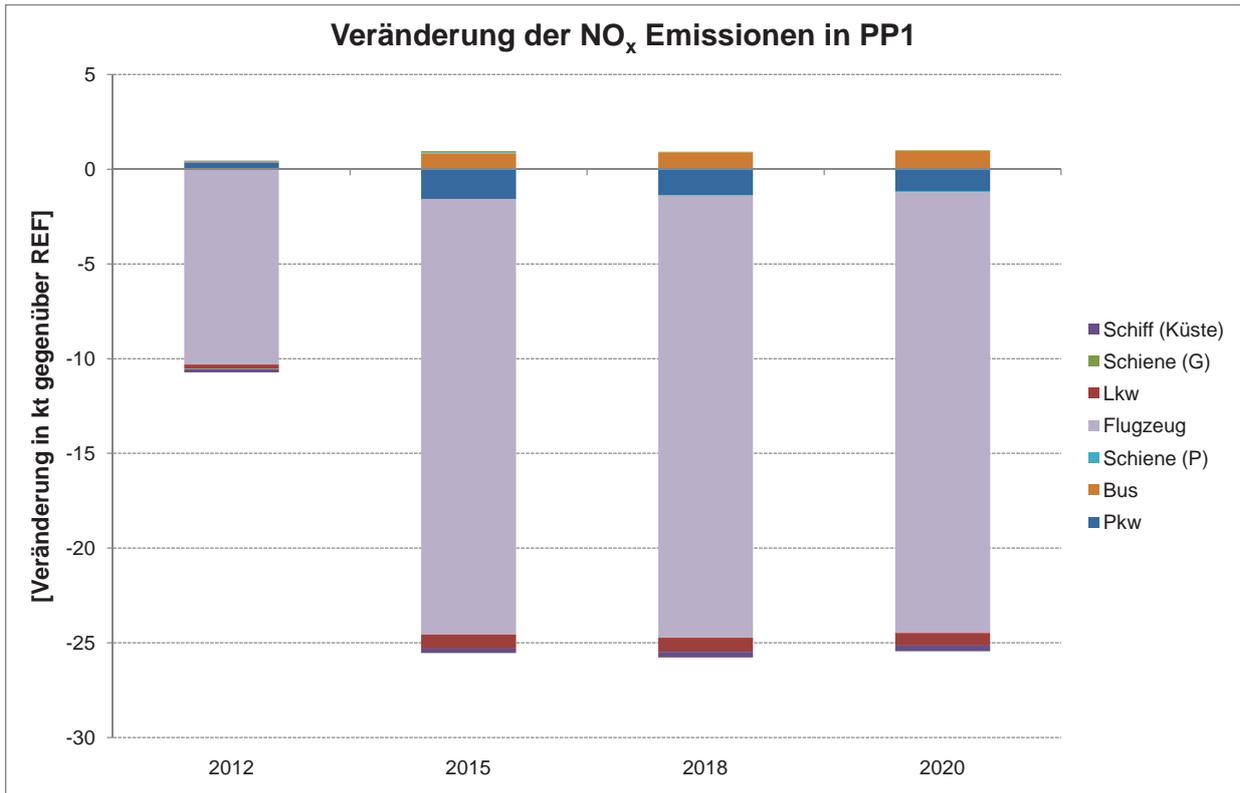


Abb. IV.6.15.: Veränderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1

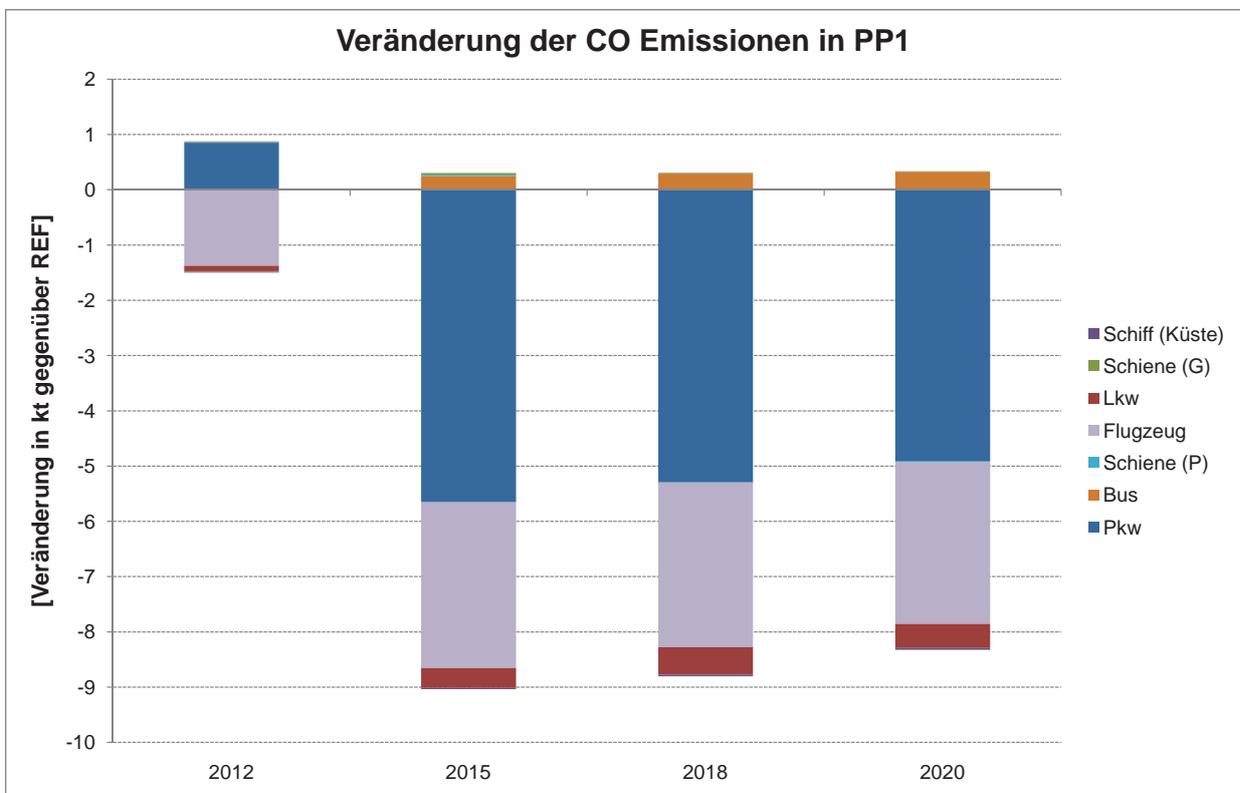


Abb. IV.6.16.: Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1

als Hauptverursacher von CO emittiert in PP1 4,9 kt bzw. 2% weniger CO bis 2020. Im Luftverkehr können die CO-Emissionen um 2,9 kt bzw. 14,9% bis 2020 verringert werden. Die Erhöhung der Lkw-Mautsätze bewirkt nur eine marginale Verbesserung der CO-Emissionen bis 2020 in Höhe von 0,4 kt bzw. 0,7%. Insgesamt ermittelt ASTRA eine Senkung der CO-Emissionen um 2% bzw. 7,8 kt bis 2020 im Vergleich zum REF.

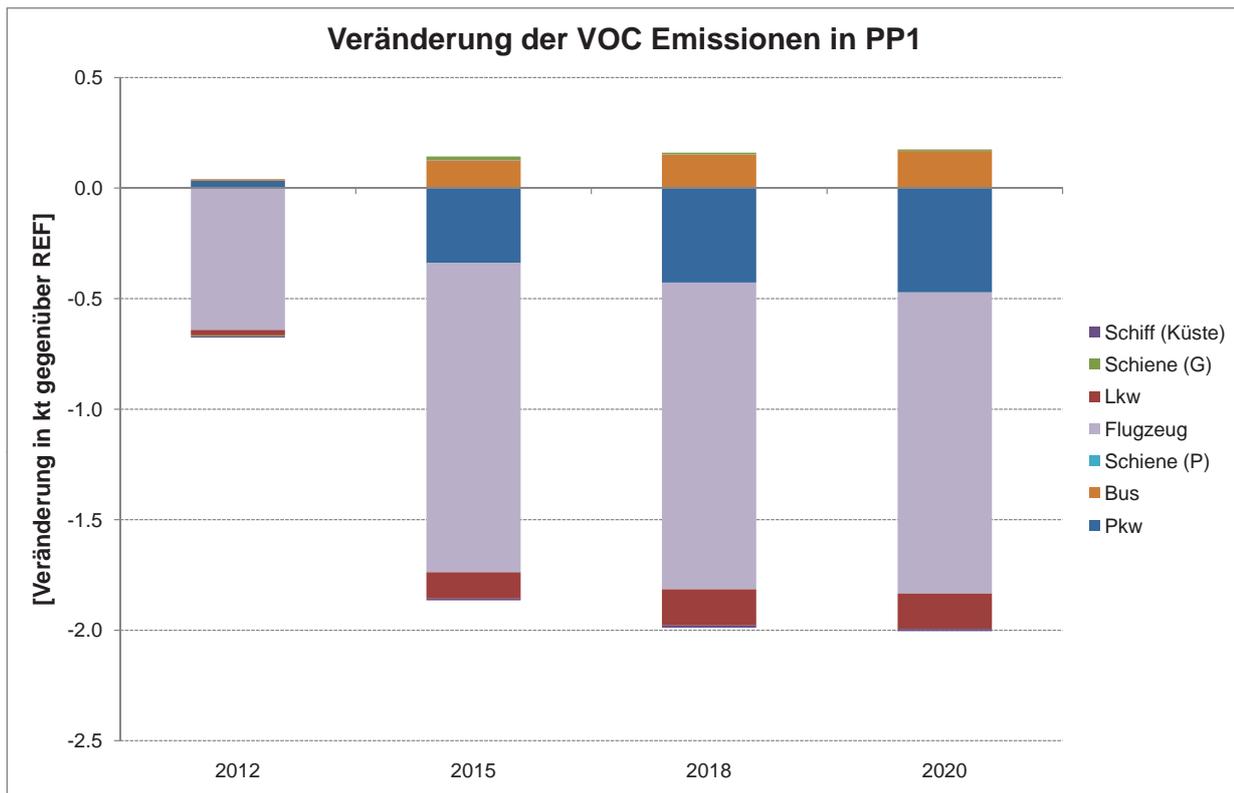


Abb. IV.6.17.: Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1

Die Analyse der Auswirkungen auf die direkten Emissionen von VOC durch den Verkehr zeigt Abbildung IV.6.17. Eine moderate Einführung von Preisinstrumenten wie in PP1 getestet wirkt sich positiv auf die VOC-Emissionen aus. Im Vergleich zum REF sinken die VOC-Emissionen um ca. 5% oder 1,7 kt bis 2020. ASTRA prognostiziert eine Verbesserung der VOC-Emissionen im Flugverkehr um 1,4 kt bzw. 14,8% bis 2020. Pkws emittieren 5,5% bzw. 0,5 kt weniger VOC bis 2020, Lkw 1,3% bzw. 0,2 kt weniger.

### IV.6.2.2. Ambitionierte Ausweitung der Preispolitiken (PP2)

Das zweite Instrumentenbündel PP2 testet eine ambitionierte Ausweitung der Preispolitiken. PP2 baut auf den in PP1 implementierten Instrumenten auf und ergänzt diese um folgende Instrumente:

- Die km-bezogene Straßennutzungsgebühr für schwere Nutzfahrzeuge wird ab 2012 auch auf allen Bundes- und Landstraßen eingeführt. Die Erhöhung der Mautsätze bleibt konstant wie in PP1 bei 9 Cent pro km. Ziel ist die Vermeidung von negativen Auswirkungen durch Ausweicheffekte auf kostenfreie Strecken.
- Parallel dazu werden auch die km-bezogenen Straßennutzungsgebühren für Pkw ab 2012 auf allen Bundes- und Landstraßen bei gleichbleibendem Mautsatz wie in PP1 eingeführt.
- Um den Anteil des ÖPNV in Städten mit mehr als 600 Tausend Einwohnern (d.h. in Berlin, Hamburg, München, Köln, Frankfurt und Stuttgart) zu vergrößern, wird in PP2 eine City-Maut in Höhe von 5 Euro pro Einfahrt und Tag ab 2012 eingeführt.
- Im Luftverkehr wird ein Emissionshandel-System für CO<sub>2</sub> ab 2012 eingeführt. Die Preise für die Zertifikate steigen dabei zwischen 2012 und 2020 von 8,50 Euro auf 25 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>.

Die ambitionierte Ausgestaltung von preislichen Maßnahmen in PP2 bewirkt im Personenverkehr eine Reduktion der Personenverkehrsleistung um 4% bis 2020 im Vergleich zum REF. Die Einführung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels im Luftverkehr ändert die Personenverkehrsleistung bei der Luftfahrt nur marginal gegenüber PP1. Daraus lässt sich schließen, dass die Besteuerungsmaßnahme und die Erhebung der Mehrwertsteuer auf internationale Tickets einen deutlich größeren Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl haben als der Emissionshandel. Sicher spielt auch der niedrige

Zertifikatspreis eine wichtige Rolle. Bei deutlich höheren Zertifikatspreisen würde sich der Emissionshandel auch bemerkbar machen.

Besonders in den kleineren Distanzbändern zeigt sich eine Veränderung der Verkehrsmittelwahl. Insgesamt sinken die Personen-km beim Pkw um 5% in PP2 bis 2020 und damit stärker als in PP1 (siehe Abbildung IV.6.18).

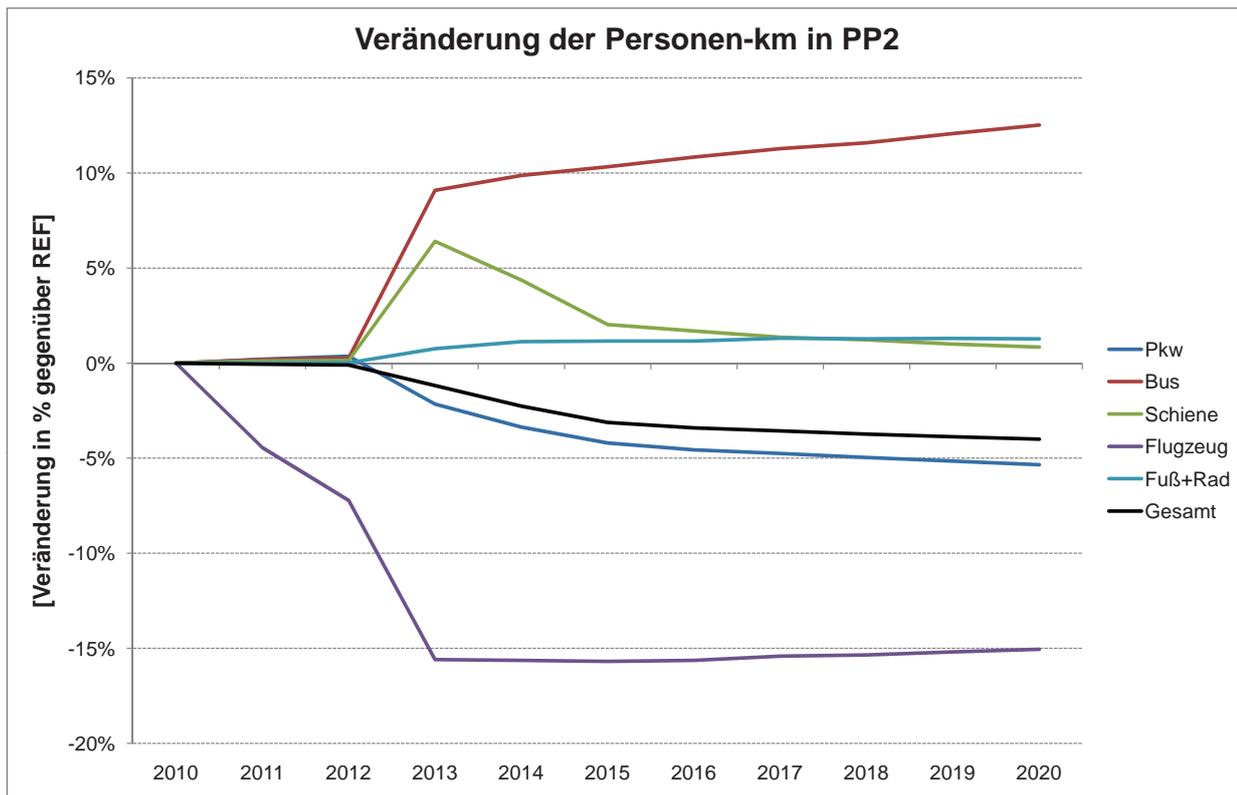


Abb. IV.6.18.: Veränderung der Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP2

Nicht-motorisierte Personen-km nehmen zu mit 1,3% bis 2020. Der schienengebundene öffentliche Nahverkehr profitiert ebenfalls mit einer Zunahme der Personen-km um 0,8% bis 2020. Am deutlichsten gewinnt der Bus an Anteil hinzu mit knapp 12,5% bis 2020 gegenüber dem REF.

Die Ausweitung der km-bezogenen Straßennutzungsgebühr für schwere Nutzfahrzeuge auf alle Bundes- und Landstraßen induziert ein geringeres Wachstum des Straßengüterverkehrs in Deutschland. Ausweicheffekte werden dadurch vermieden und besonders der Güterverkehr auf der Schiene ökonomisch attraktiver. Abbildung IV.6.19 zeigt die Auswirkungen der Instrumente in PP2 im Vergleich mit dem REF bis 2020.

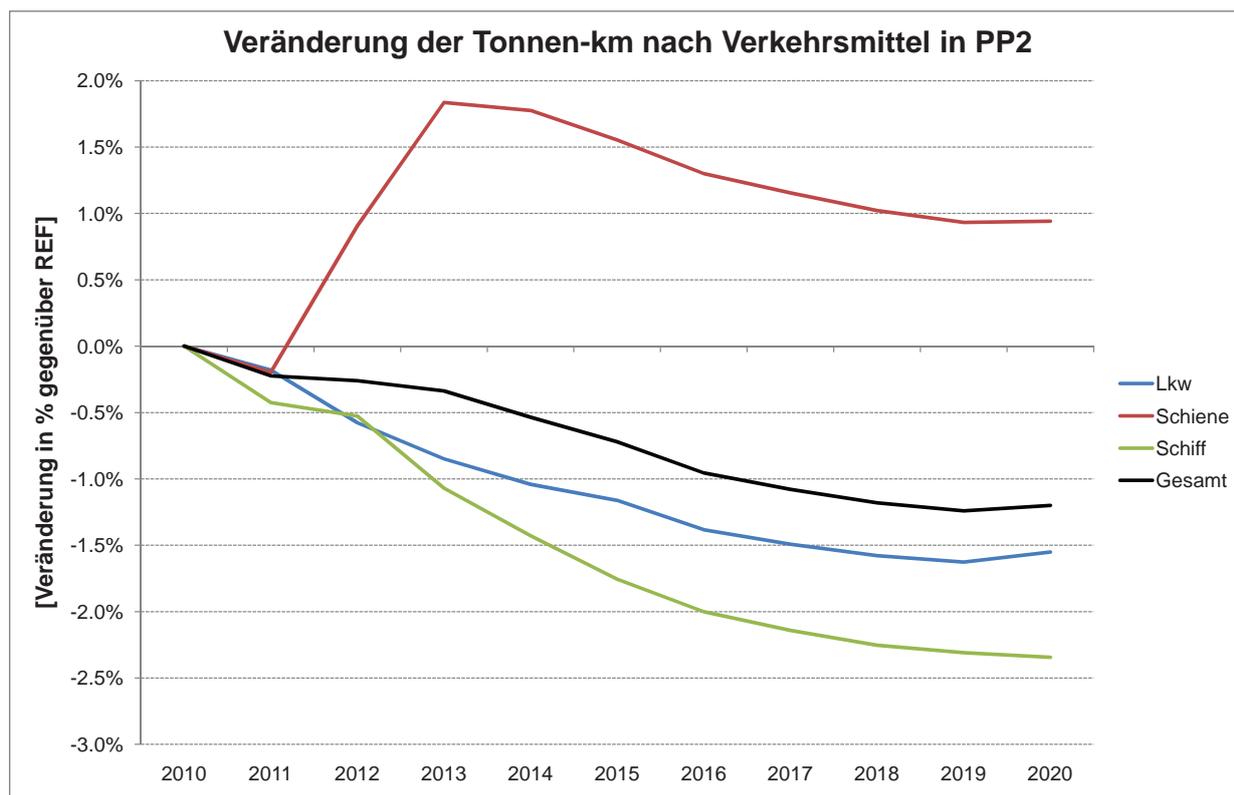


Abb. IV.6.19.: Veränderung der Güterverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP2

Die gesamte Güterverkehrsleistung in Tonnen-km sinkt moderat stärker als in PP1 bis 2020 um 1,2% verglichen mit REF. Dafür verantwortlich ist das geringere Wachstum des Lkw Verkehrs durch die Ausweitung der Maut. Im Vergleich mit dem REF berechnet ASTRA geringere Tonnen-km für den Lkw in Höhe von 1,6% bis 2020. Ein Teil der Güterverkehrsleistung auf der Straße wird dabei über die Schiene substituiert, die in PP2 bis 2020 um knapp 1% über der Verkehrsleistung im REF liegt. Die Implementierung eines solchen Instruments bedeutet jedoch einen immensen Investitionsbedarf, um die Mautkontrollbrücken und das elektronische System auf allen Bundes- und Landstraßen zu implementieren. Daher ist die Realisierung dieses Szenarios zumindest auf Basis der heutigen technischen Möglichkeiten und Kosten sehr unwahrscheinlich.

Die in PP2 zusätzlich implementierten bzw. ausgeweiteten Instrumente bewirken nur eine minimale Veränderung der Pkw-Flotten. Die etwas geringere Güterverkehrsleistung erzeugt einen Rückgang der Lkw-Flotte um 1,7% und der Transporter bis 3,5 t um 2,1%. Die technische Zusammensetzung der Pkw-Flotte bzw.

der Anteile der verschiedenen Kraftstoffarten ändert sich durch die in PP2 hinzugefügten Instrumente ebenfalls nicht im Vergleich zu PP1.

Die etwas stärkeren Auswirkungen auf die Personen- und Güterverkehrsleistung in PP2 verglichen mit PP1 bewirken nur eine geringfügig bessere Situation bei den direkten Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen durch den Verkehr bis 2020. Letztlich macht sich in den Änderungen der Gesamtmengen im Vergleich mit PP1 nur der geringere Personenverkehr in Personen-km mit dem Pkw bemerkbar. Dadurch sinken die gesamten direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 2,7% bis 2020 statt 1,9% in PP1. In absoluten Mengen bedeutet dies einen Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 4,4 Mt. bis 2020 verglichen mit dem REF und zusätzlich eingespartem CO<sub>2</sub> in Höhe von ca. 1,3 Mt. im Vergleich mit PP1. Straßennutzfahrzeuge emittieren laut ASTRA in PP2 ca. 0,5 Mt. weniger CO<sub>2</sub> bis 2020, während alle Pkw ca. 1 Mt. weniger CO<sub>2</sub> ausstoßen (siehe Abbildung IV.6.20).

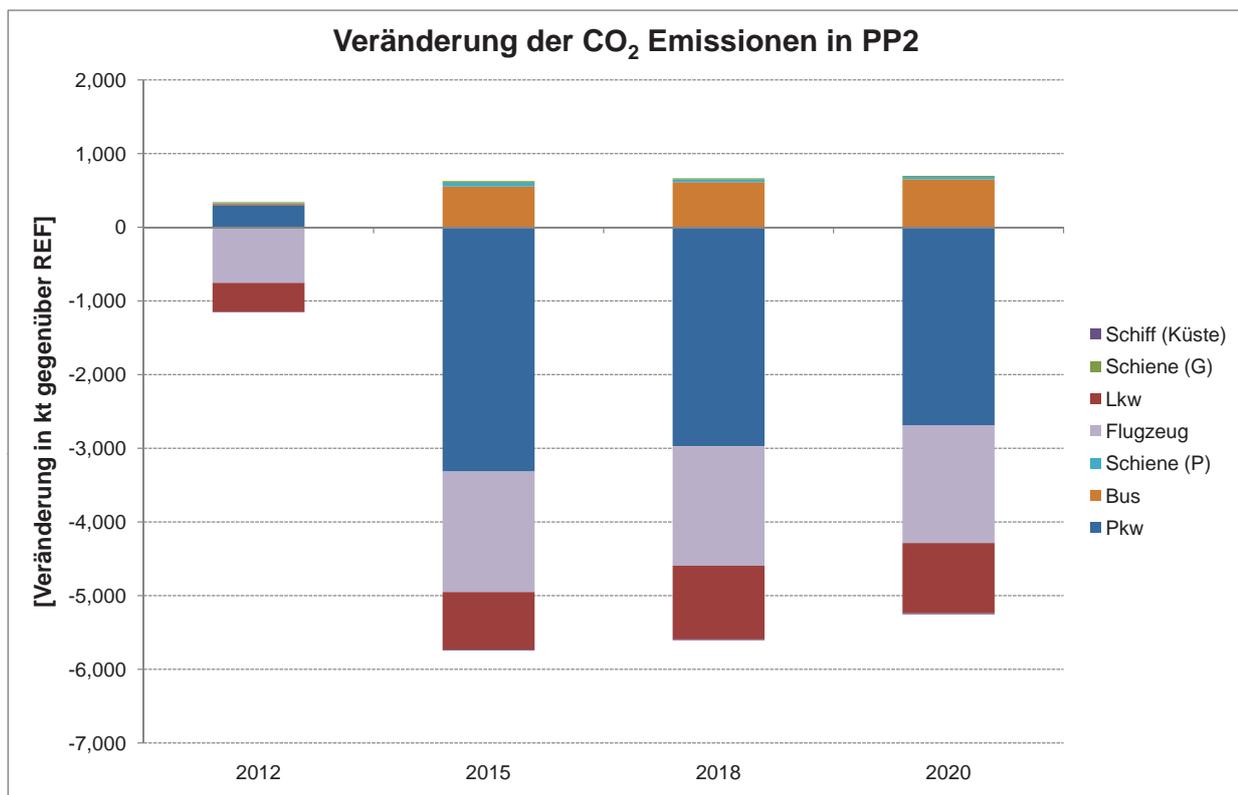


Abb. IV.6.20.: Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2

Bei den direkten  $\text{NO}_x$ -Emissionen sieht man nahezu das gleiche Bild wie in PP1. Der geringe Rückgang der Neuzulassungen bei den Nutzfahrzeugen ist die Ursache dafür, dass trotz leicht zurückgehender Verkehrsleistungen verglichen mit PP1 die gleiche Menge an  $\text{NO}_x$  emittiert wird. Der Anteil der neu zugelassenen Lkw und Pkw, die die Euro 6 Norm erfüllen, ist etwas geringer und somit der Vorteil durch weniger gefahrene km bei  $\text{NO}_x$  zunichte (siehe Abbildung IV.6.21).

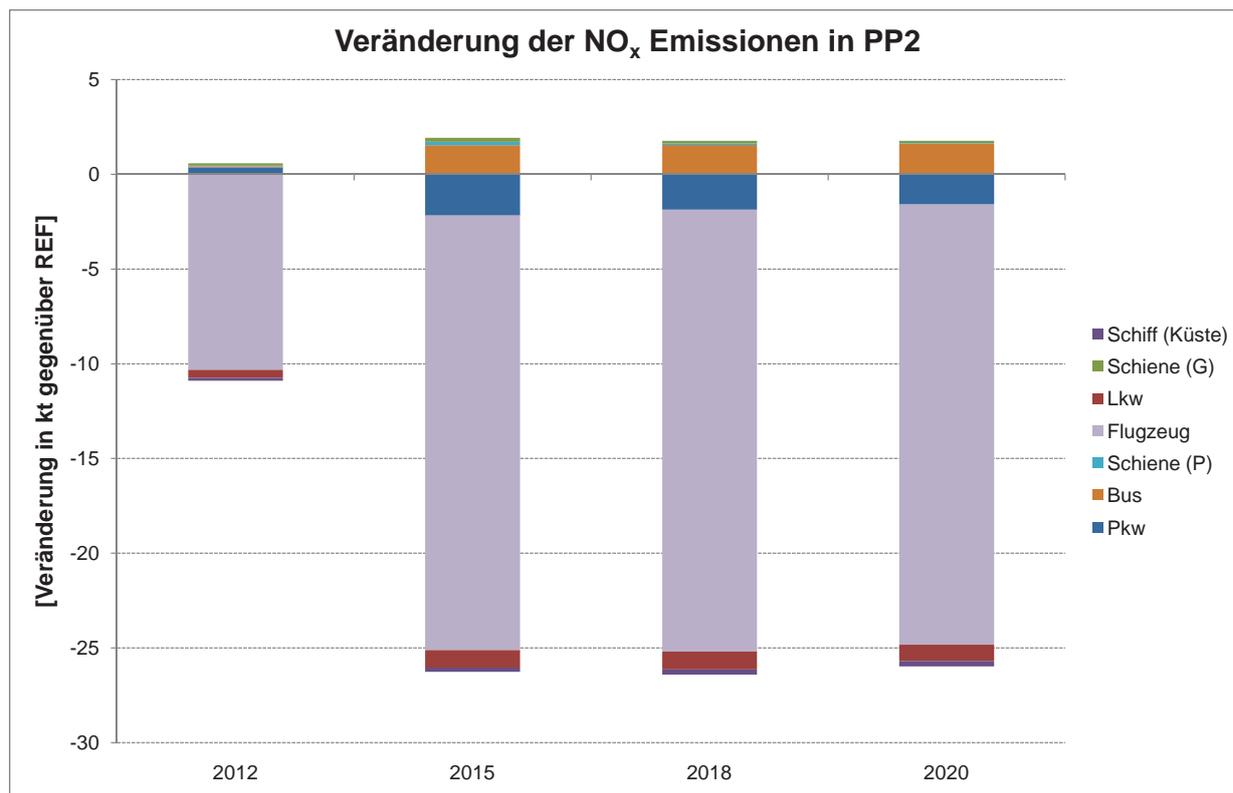


Abb. IV.6.21.: Veränderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2

Bei den CO-Emissionen sieht man eine kleine Verbesserung gegenüber PP1 (siehe Abbildung IV.6.22). Die gesamten direkten, jährlichen CO-Emissionen sinken im Vergleich mit dem REF um 3,3% und damit um 1% mehr als in PP1. Dies liegt daran, dass zum einen die Neuzulassungen bei Pkws sich kaum ändern und zum anderen daran, dass die Grenzwerte für CO sich seit dem Übergang von Euro 3 auf Euro 4 nicht mehr verschärft haben. Somit überträgt sich die geringere Fahrleistung nahezu eins zu eins auf etwas geringere CO-Emissionen. Insgesamt können laut ASTRA Berechnungen durch die Preisinstrumente in PP2 ca. 11,2 kt an Koh-

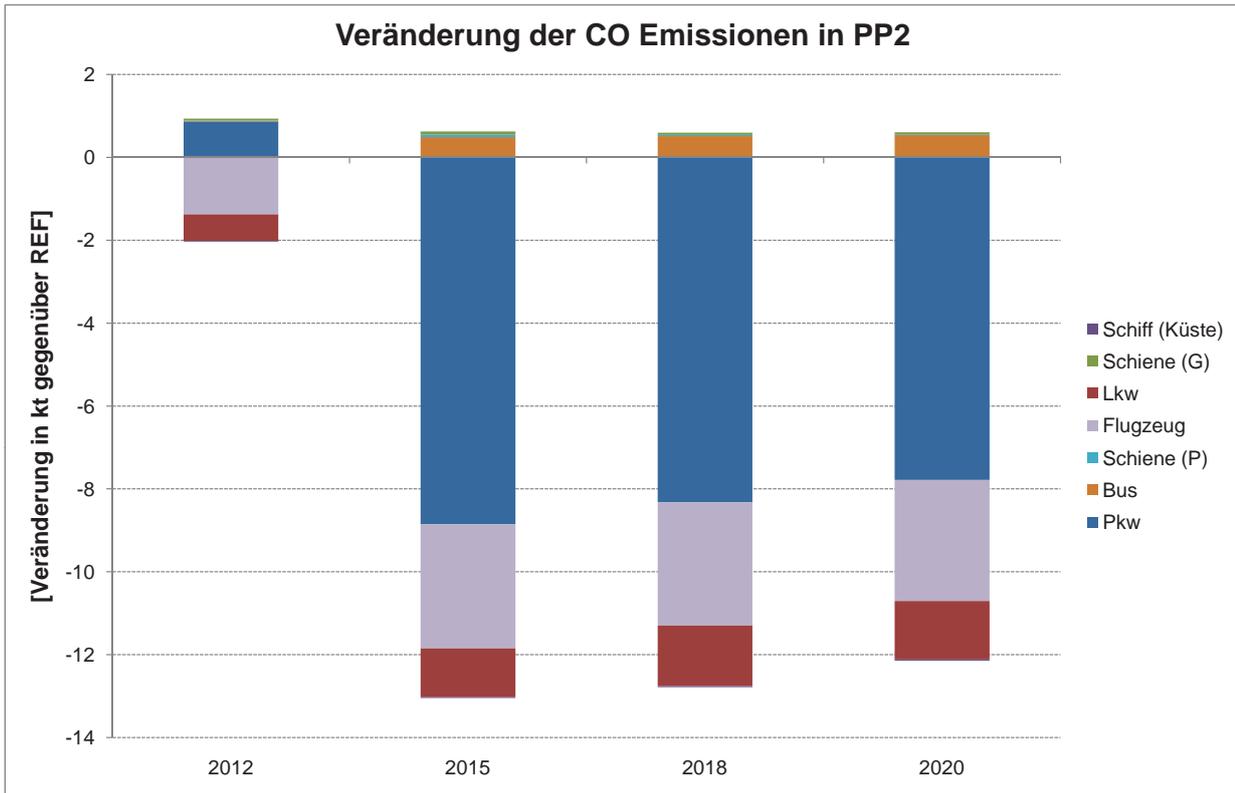


Abb. IV.6.22.: Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2

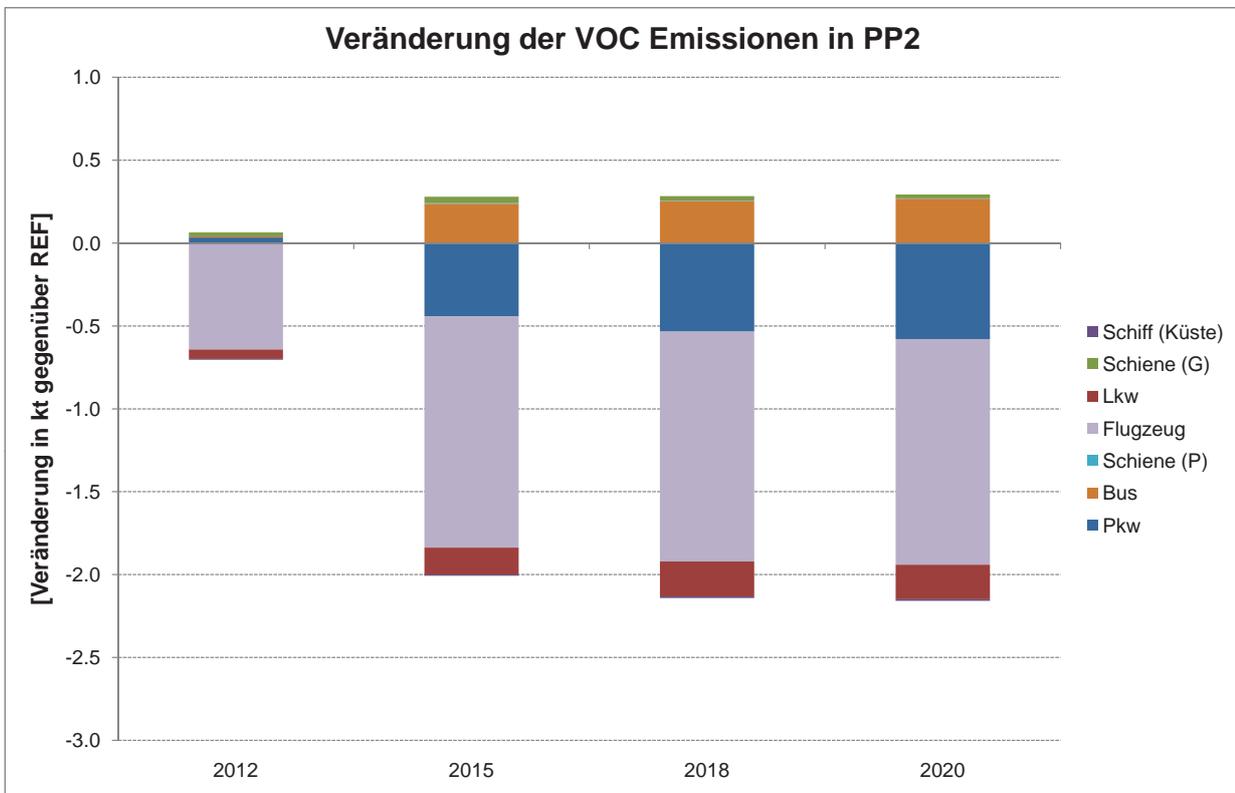


Abb. IV.6.23.: Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2

lenstoffmonoxid jährlich im Jahr 2020 eingespart werden. Mengenmäßig trägt der Pkw am meisten zur Reduktion bei. Dort können insgesamt 8 kt eingespart werden, das Flugzeug steuert mit 3 kt CO die zweithöchste Menge bei.

Abbildung IV.6.23 zeigt die Veränderung der direkten Emissionen an VOC im Vergleich zum REF in kt. Man sieht ähnlich wie bei den  $\text{NO}_x$ -Emissionen kaum einen Unterschied zu den Veränderungen in PP1 (vgl. Abbildung IV.6.17). Insgesamt stößt der Verkehr mit 1,8 kt weniger nur 0,1 kt weniger VOC aus als in PP1, da die Maßnahmen, die den Flugverkehr betreffen, nur unwesentlich durch PP2 betroffen sind.

### IV.6.2.3. Moderate Ausweitung der Regulierungspolitiken (PP3)

Das dritte Instrumentenbündel PP3 testet eine moderate Ausweitung der Regulierungspolitiken. Die wichtigsten und effizientesten Instrumente in diesem Bereich sind sicher das Setzen schärferer Emissionsstandards durch Abgasnormen oder direkte Verpflichtungen an die fahrzeugherstellende Industrie. In PP3 wurden für den Verkehrsträger Straße die folgenden Instrumente implementiert:

- Die Grenzwerte der noch nicht eingeführten Abgasnormen Euro 6 und einer fiktiv ab 2019 eingeführten Klasse Euro 7 für Pkw, Busse, leichte und schwere Nutzfahrzeuge werden dabei um 20% reduziert.
- Zusätzlich werden die  $\text{CO}_2$ -Verpflichtungen an die Pkw-Hersteller verschärft. Bis 2015 ergeben sich dadurch als Vorgabe 115 g pro Fahrzeug-km im Flottenschnitt und bis 2020 80 g pro Fahrzeug-km. In PP3 wird davon ausgegangen, dass die Hersteller diese Vorgaben uneingeschränkt einhalten.

Für den Verkehrsträger Luftfahrt wurde folgendes Regulierungsinstrument in das ASTRA Modell implementiert:

- Die von der IATA definierten Emissionsstandards für Luftschadstoffe werden pauschal um 10% gegenüber REF herabgesetzt.

Während die im Bereich der Preispolitiken getesteten Instrumente geringfügig negative Auswirkungen auf den privaten Konsum haben, bewirken die in PP3 implementierten Instrumente eine gegenteilige Entwicklung. Dies setzt jedoch voraus, dass die Fahrzeughersteller aus Wettbewerbsgründen die entstehenden Zusatzkosten durch die geforderten technischen Verbesserungen der Effizienz und der Schadstoffemissionen der einzelnen Fahrzeuge nicht oder nur geringfügig an den Endkunden weitergeben. Dies ist auch eine der Kernannahmen, die das Bild der Ergebnisse der Einführung der beschriebenen Instrumente prägen.

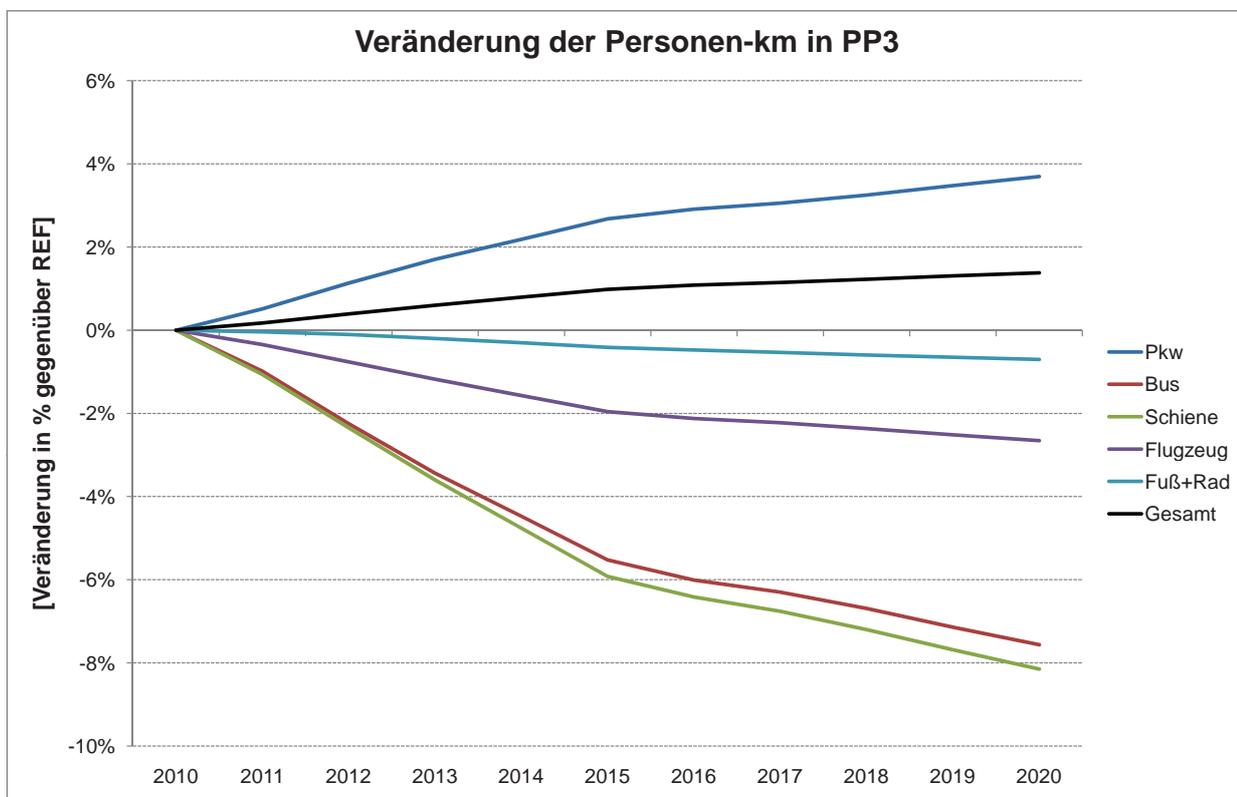


Abb. IV.6.24.: Veränderung der Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP3

Abbildung IV.6.24 beschreibt die relative Veränderung der Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP3 im Vergleich zum REF. Die Verschärfung der Emissionsstandards und vor allem die durch die strengeren CO<sub>2</sub>-Grenzwerte effizienteren Pkw bewirken eine Zunahme der gesamten Personen-km um 1,4% bis 2020 verglichen mit dem REF. Hier zeigt sich ein klassischer Rebound Effekt. Die Entwicklung effizienterer Fahrzeuge senkt die Betriebskosten der Fahrzeuge und

macht die individuelle Motorisierung attraktiver. Hinzu kommen die wirtschaftlichen Effekte, hervorgerufen durch die zusätzlichen Investitionen in Forschung und Entwicklung von effizienteren und schadstoffärmeren Fahrzeugen und die Steigerung des privaten Konsums durch geringere Betriebskosten für neue Pkw. Insgesamt ergibt sich durch die Instrumente in PP3 eine leichte Steigerung des BIP um 0,2% im Jahr 2020 verglichen mit dem REF.

Abbildung IV.6.24 zeigt deutlich, dass die Steigerung der gesamten Personenverkehrsleistung durch die zunehmende Fahrleistung der Pkw in Höhe von 3,7% in 2020 entsteht. Durch die geringeren Betriebskosten steigt der Modal Split des Pkw hauptsächlich zu Lasten der Bahn und des Busses. Deren Personenverkehrsleistung sinkt laut ASTRA Berechnungen bis 2020 um 8,1% bzw. 7,6% gegenüber dem REF. Das Flugzeug verliert bezogen auf die inner-europäischen Personen-km 2,7% bis 2020. Marginal sinken auch mit 0,7% gegenüber dem REF die nicht-motorisierten Personen-km bis 2020.

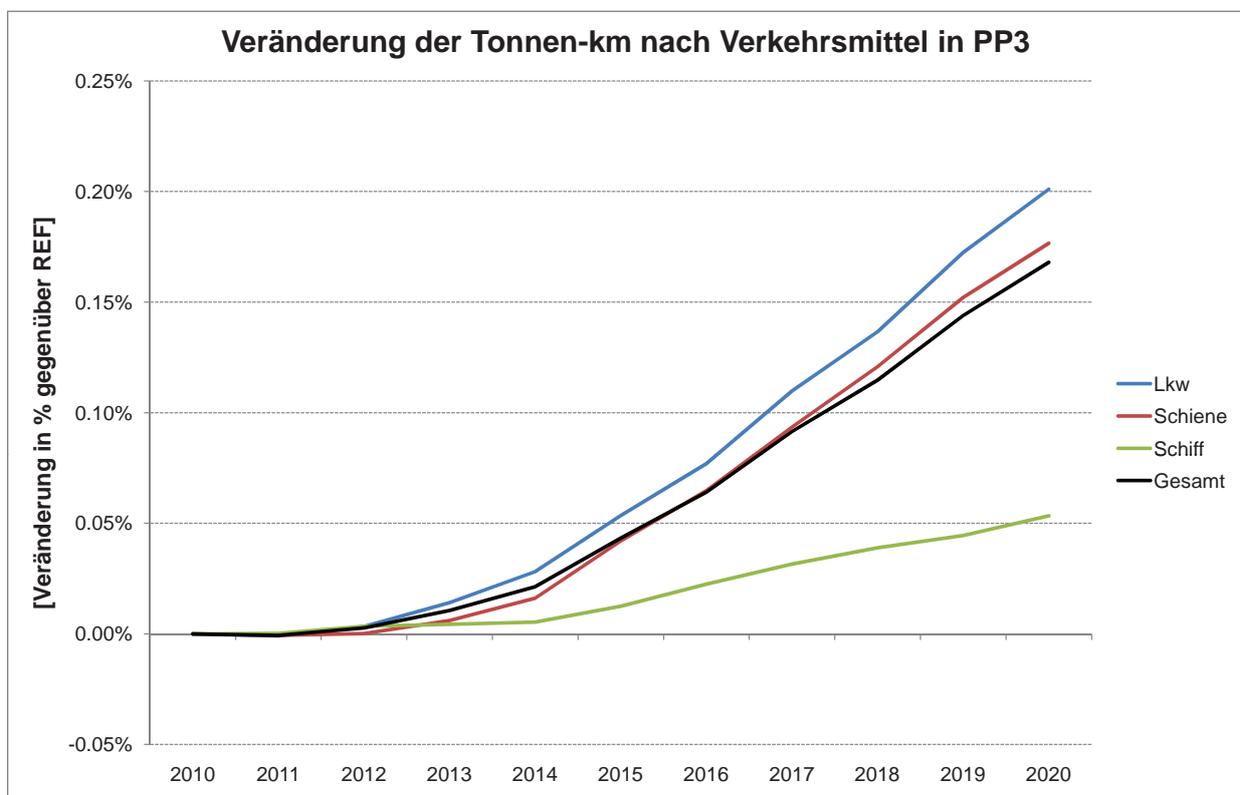


Abb. IV.6.25.: Veränderung der Güterverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP3

Das leicht steigende Wirtschaftswachstum gegenüber dem REF induziert beim Güterverkehr eine Zunahme der Güterverkehrsleistung um 0,16% bis 2020. Besonders die auf der Straße und der Schiene zurückgelegten Tonnen-km steigen im Vergleich mit dem REF um 0,2% bzw. 0,18%. Die Seeschifffahrt gewinnt dagegen nur marginal mit 0,05% bis 2020 gegenüber dem REF. Diese Entwicklung fußt auf der Annahme, dass eine technische Reduktion der Luftschadstoffemissionen von Nutzfahrzeugen nicht auf Kosten der Effizienz geht. Laut HBEFA (2010) ist dies zumindest für die neue Generation der Euro 6 Fahrzeuge nicht der Fall. Geht der Kraftstoffverbrauch der neuen Nutzfahrzeuge einher mit einer technischen Verbesserung der Schadstoffemissionen würde sich ein anderes Bild zeigen und zumindest der Straßengüterverkehr im Vergleich mit dem REF verlieren, da die Betriebskosten steigen würden.

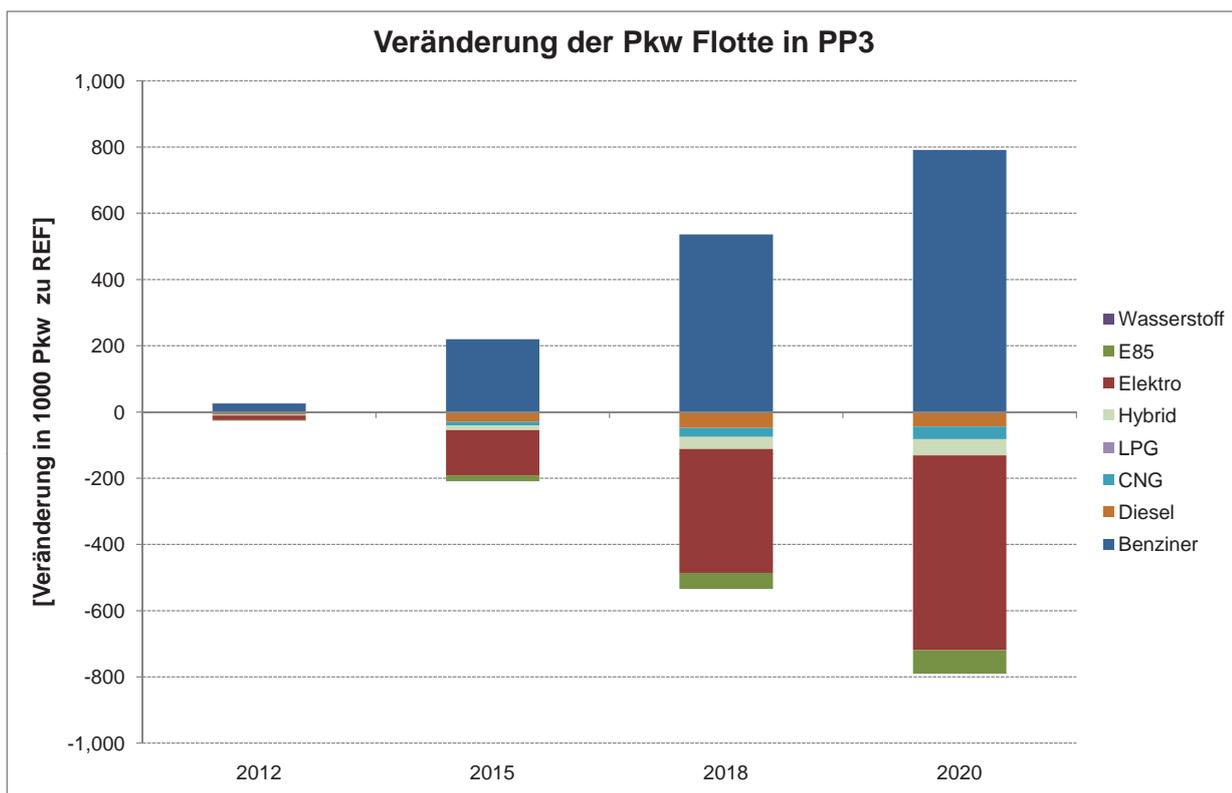


Abb. IV.6.26.: Veränderung der Pkw-Flotte nach Kraftstoffart in PP3

Die strengere CO<sub>2</sub>-Verpflichtung an die Fahrzeug-Hersteller zeigt sich ebenfalls in einer geänderten Flottenstruktur bei Pkws. Abbildung IV.6.26

veranschaulicht diesen Effekt. Da Batterieelektrische, Brennstoffzellen- sowie Plug-in Hybride Fahrzeuge bis 2020 laut Abschätzung von Experten (siehe McKinsey (2010)) selbst unter positiven Rahmenbedingungen noch deutlich teurer sind als konventionelle Pkw, müssen die Hersteller die Effizienz dieser deutlich verbessern. Da besonders bei Pkw mit Ottomotoren noch großes Verbesserungspotenzial zu erwarten ist, sinkt der Durchschnittsverbrauch bei Neufahrzeugen mit Ottomotoren am deutlichsten. Dadurch sinken auch die Betriebskosten und machen den Benziner attraktiver. Die Veränderung der Pkw-Flotte in PP3 zeigt eben diesen Effekt mit einer Zunahme an Pkw mit Ottomotoren um 790 Tausend Fahrzeuge bis 2020 im Vergleich zum REF. Diese Entwicklung verhindert eine stärkere Diffusion alternativer Antriebe. Resultat davon ist, dass die Luftschadstoffemissionen nicht so stark sinken. Hinsichtlich der Luftschadstoffemissionen würden Erdgas-Fahrzeuge beispielsweise eine deutliche Verbesserung gegenüber konventionellen Fahrzeugen darstellen.

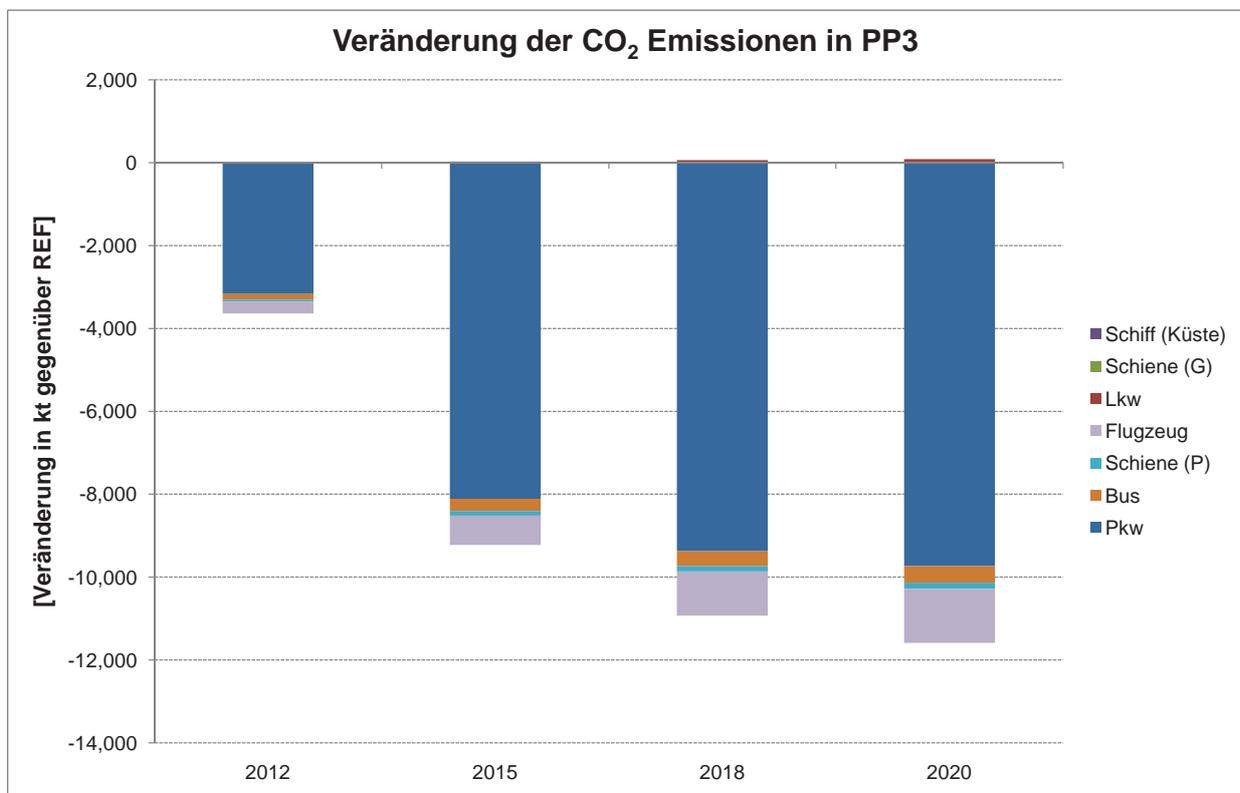


Abb. IV.6.27.: Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3

Die Veränderung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Verkehr im Vergleich zum REF ist dementsprechend geprägt von der Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Verpflichtung an die Pkw-Hersteller. Abbildung IV.6.27 zeigt, dass in PP3 laut ASTRA Berechnungen insgesamt 10,7 Mt CO<sub>2</sub> eingespart werden können. Über 9,7 Mt CO<sub>2</sub> an Einsparungen trägt eine effizientere Pkw-Flotte dazu bei. Durch die Verlagerung des Personenverkehrs von der Schiene, dem Bus und dem Flugzeug hin zur Straße ergibt sich für diese drei Verkehrsmittel eine weitere Einsparung an emittiertem CO<sub>2</sub>. Relativ gesehen können in PP3 6,9% an CO<sub>2</sub> eingespart werden, verglichen mit dem REF bis 2020.

Bei den Emissionen des Luftschadstoffes NO<sub>x</sub> machen sich zum einen negativ die steigenden Fahrleistungen bei Pkw und dem Güterverkehr und zum anderen positiv die schärferen Grenzwerte bei Euro 6 Fahrzeugen bemerkbar. Der Rückgang des Flugverkehrs im Vergleich zum REF bewirkt neben der Verschärfung der IATA Emissionsstandards einen Rückgang der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 19 kt bis 2020. Die strengeren Grenzwerte bei schweren Nutzfahrzeugen zeigen sich in PP3 durch eine Verringerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 4 kt bis 2020. Kleinere Grenzwerte bei Pkw für die Euro 6 Norm wirken sich in absoluten Mengen kaum auf eine Verbesserung aus, da die Grenzwerte der ursprünglichen Euro 6 Norm bereits sehr klein sind. Insgesamt sinken die direkten NO<sub>x</sub>-Emissionen in PP3 um 24,4 kt bzw. 8,3% bis 2020 im Vergleich zum REF (siehe Abbildung IV.6.28).

Der Straßenverkehr als Hauptverursacher von direkten Kohlenstoffmonoxid-Emissionen trägt in PP3 auch erwartungsgemäß am stärksten zur gesamten Reduktion der CO-Emissionen in Höhe von 13,1 kt bzw. 3,9% bis 2020 bei (siehe Abbildung IV.6.29). Bis 2015 macht sich die im Vergleich zum REF steigende Personenverkehrsleistung bei Pkws negativ bemerkbar. Daher steigen die CO-Emissionen bis 2012 zunächst um knapp 4 kt und sinken erst nach der zunehmenden Diffusion von Fahrzeugen, die die Euro 6 Norm erfüllen. In PP3 emittieren Pkws bis 2020 laut den Berechnungen mit ASTRA ca. 4,3 kt weniger CO. Die Senkung der CO Grenzwerte bewirkt bei den schweren Nutzfahrzeugen sogar eine Einsparung von 6,1 kt CO bis 2020 gegenüber dem

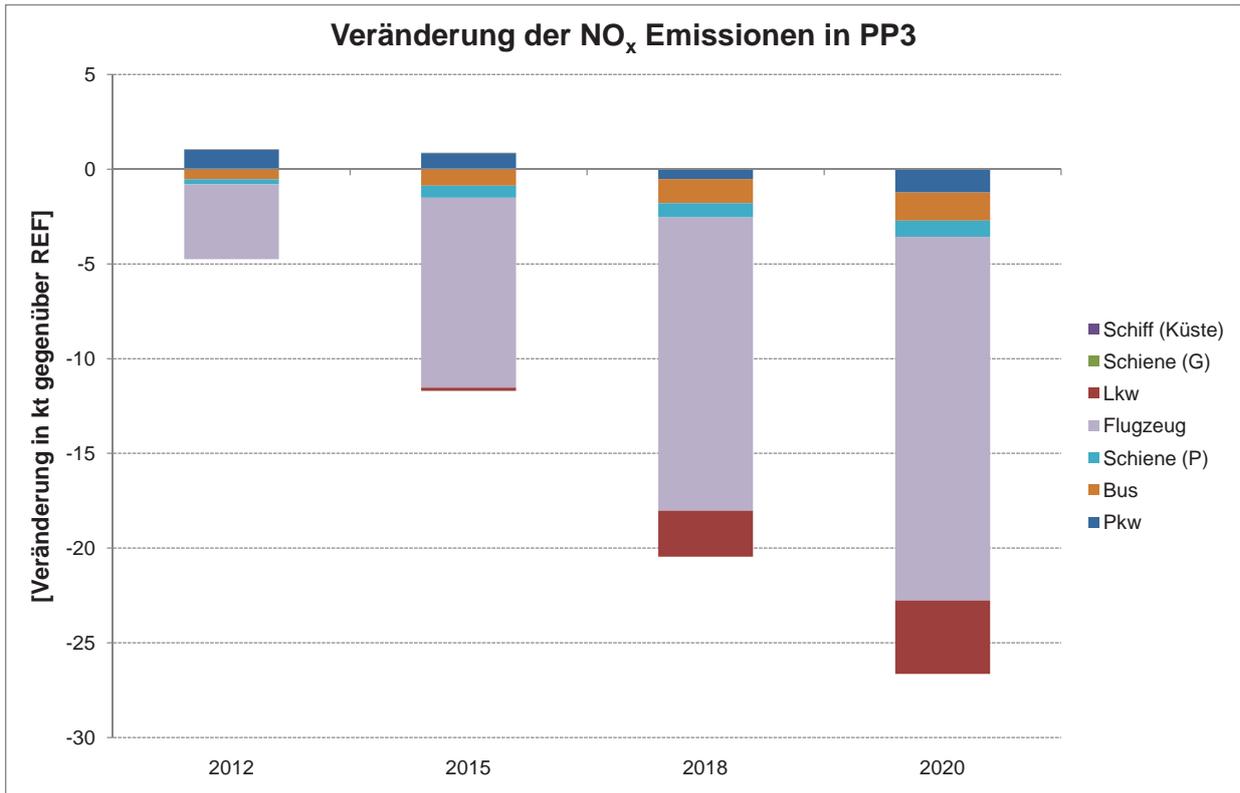


Abb. IV.6.28.: Veränderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3

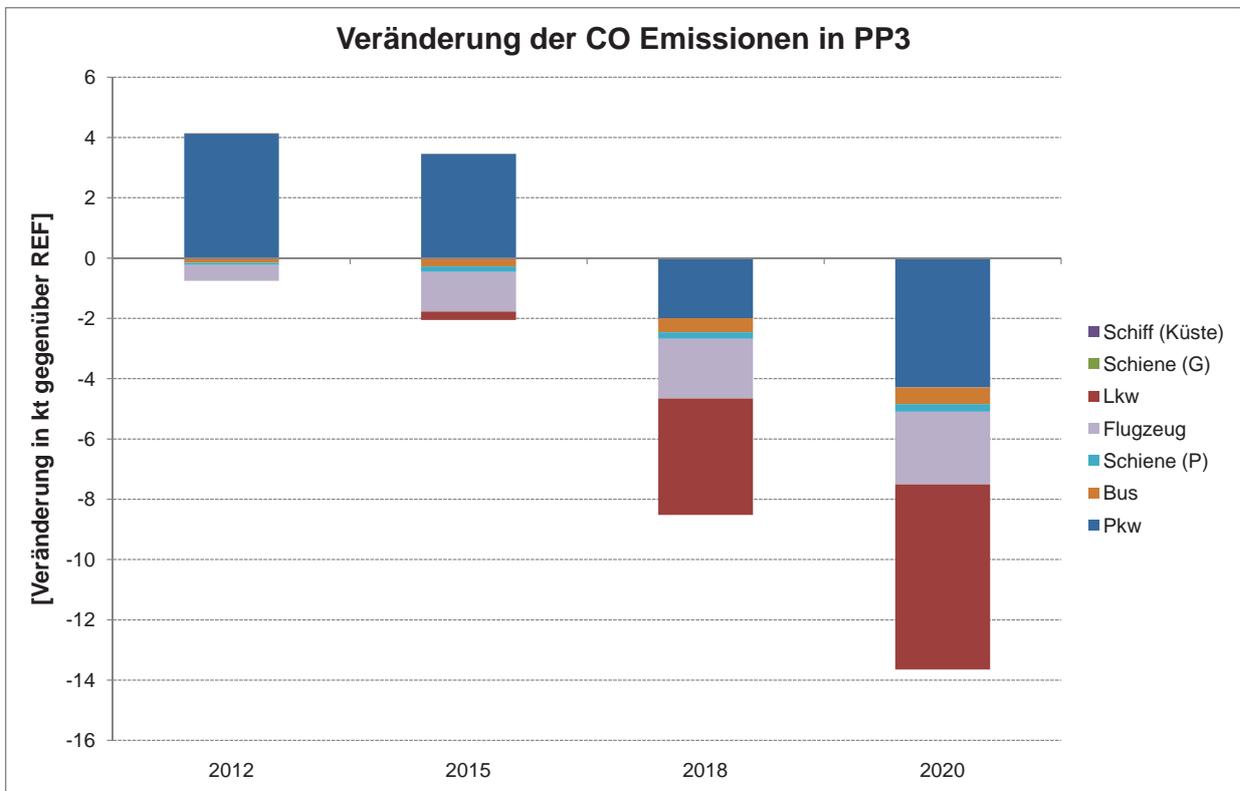


Abb. IV.6.29.: Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3

REF. Die Regulierungsmaßnahme im Luftverkehr induziert eine Verringerung der CO-Emissionen bis 2020 um 2,4 kt. Bezogen auf die von den einzelnen Verkehrsträgern emittierten Gesamtmengen an CO kann somit der Luftverkehr relativ gesehen mit über 12% am stärksten den CO Ausstoß verringern.

Die absolute Veränderung der direkten VOC-Emissionen durch die Einführung der Regulierungsmaßnahmen in PP3 gegenüber REF ist in Abbildung IV.6.30 dargestellt. Die Simulation des Instrumentenbündels ergibt eine Reduktion der VOC-Emissionen um 3,3 kt bis 2020. Relativ gesehen stellt dies mit über 9% eine deutliche Verbesserung des Luftschadstoffausstoßes dar. Hauptverursacher von VOC sind laut REF der Straßenverkehr und der Luftverkehr. Durch die gezielte Regulierung eben dieser beiden Verkehrsträger kann eine vergleichsweise deutliche Verringerung erreicht werden. Lkw verursachen in PP3 ca. 1,2 kt weniger VOC-Emissionen, der inner-europäische Flugverkehr ausgehend von Deutschland ca. 1,1 kt. und der Pkw-Verkehr 0,7 kt weniger VOC-Emissionen bis 2020.

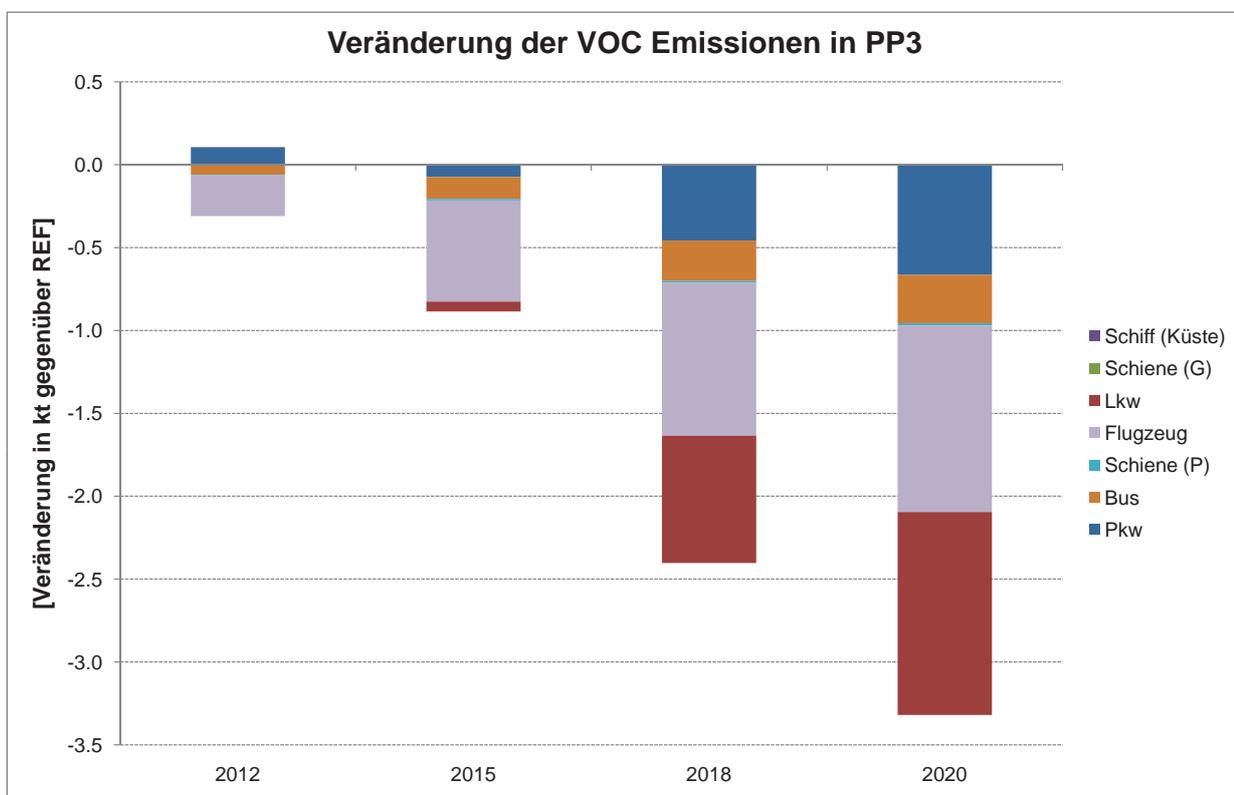


Abb. IV.6.30.: Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3

Eine längere Betrachtung der Auswirkungen über das Jahr 2020 hinaus würde deutlichere Einsparungen aufzeigen, da die Abgasnormen nur langsam in die Pkw-Flotte diffundieren. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von Pkws zwischen 12 und 14 Jahren und der frühesten Einführung von Euro 6 im Jahr 2014 wird bis 2020 nur ein kleiner Teil der gesamten Pkw-Flotte mit diesen verbesserten Abgaswerten unterwegs sein. Bei anderen Verkehrsträgern wie zum Beispiel der Bahn wirken sich deutlich längere Lebensdauern der Lokomotiven noch deutlicher in Form einer verlangsamten Diffusion in die Flotten aus.

#### **IV.6.2.4. Ambitionierte Ausweitung der Regulierungspolitiken (PP4)**

Das letzte Instrumentenbündel PP4 simuliert eine ambitionierte Ausweitung der Regulierungspolitiken. PP4 berücksichtigt alle Instrumente, die im Rahmen des Szenario PP3 implementiert worden sind und fügt zusätzlich ein weiteres, viel diskutiertes Instrument der Regulierung im Bereich Verkehr hinzu: die Geschwindigkeitsbegrenzung auf Bundesautobahnen auf einheitlich maximale 120 km pro Stunde ab 2011. Um die direkten Auswirkungen auf die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen zu ermitteln, wurden für jeden Stoff Reduktionsfaktoren mit Hilfe der COPERT 4 Funktionen abgeschätzt. Für CO<sub>2</sub> ergeben sich daraus Reduktionen der Emissionen auf den Bundesautobahnen von ca. 17%, für NO<sub>x</sub> ca. 19%, für CO ca. 29% und für VOC ca. 30%. Durch die Differenzierung des Personenverkehrs in verschiedene Distanzbänder und die Berücksichtigung des im europäischen Verkehrsmodell TRANS-TOOLS berechneten Anteils der auf Autobahnen zurückgelegten Personenverkehrsleistung errechnet ASTRA die Gesamteinflüsse des Tempolimits auf die Emissionen.

Das Tempolimit erzeugt darüber hinaus Veränderungen in den durchschnittlichen Fahrzeiten, die sich über die Simulationsdauer bis 2020 aber durch die Veränderung der Straßennutzung wieder ändern. Ebenfalls eine bedeutende Auswirkung hat das Tempolimit auf den Kraftstoffverbrauch und damit auf die Betriebskosten für Pkw. Die daraus entstehenden Effekte sind bereits in PP3 thematisiert worden.

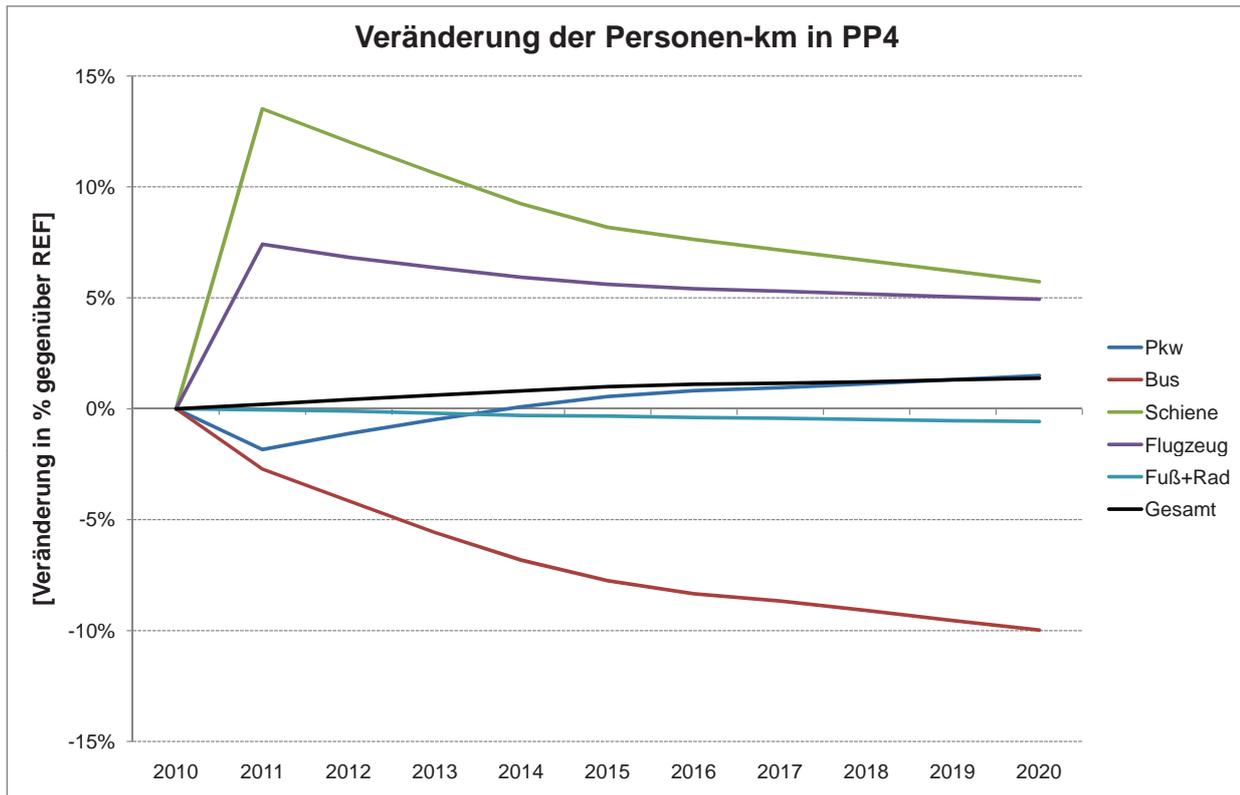


Abb. IV.6.31.: Veränderung der Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP4

Abbildung IV.6.31 zeigt die Auswirkungen des Tempolimits zusätzlich zu den bereits in PP3 implementierten Regulierungsmaßnahmen auf die Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel im Vergleich zum REF. Das Verkehrsmittelwahlmodell in ASTRA reagiert sehr stark auf die sprunghafte Veränderung der durchschnittlichen Fahrtzeiten induziert durch das Tempolimit in 2011. Gerade für längere Fahrten wird der Pkw zunächst unattraktiver, weshalb sich bereits im Jahr der Einführung die gesamten Personen-km beim Pkw um fast 2% verringern. Pkw-Fahrten werden durch Fahrten mit der Bahn oder dem Flugzeug ersetzt, die beide im Jahr der Einführung deutlich profitieren mit einer Steigerung der Personen-km um ca. 13,4% bzw. 7,4% im Vergleich zum REF.

Die positiven Effekte eines Tempolimits machen sich in den Folgejahren bemerkbar. Ein deutlich besserer Verkehrsfluss zu den morgen- und abendlichen Spitzenzeiten bewirkt in Zusammenhang mit kurzzeitig geringerer Auslastung der Bundesautobahnen eine Reduktion der Fahrtzeiten im Vergleich zur Situation in PP3 und auch im REF. Dadurch und durch die wirtschaftlichen Effekte, die gerin-

gere Betriebskosten durch reduzierten Kraftstoffverbrauch induzieren, ergibt sich eine leichte Steigerung der gesamten Personen-km bis 2020 um ca. 1.5% im Vergleich zum REF. Trotz der Verbesserung des Verkehrsflusses durch das Tempolimit sinkt der dazu gewonnene Anteil der Bahn und des Flugzeugs im Vergleich zum Jahr der Einführung nur marginal. ASTRA berechnet eine Steigerung des Bahnverkehrs in Personen-km bis 2020 um 5,7%, der Flugverkehr nimmt mit 4,9% ebenfalls zu im Vergleich zum REF. Letztlich zeigt sich auch eine leichte Steigerung beim Pkw-Verkehr in Höhe von 1,4% bis 2020.

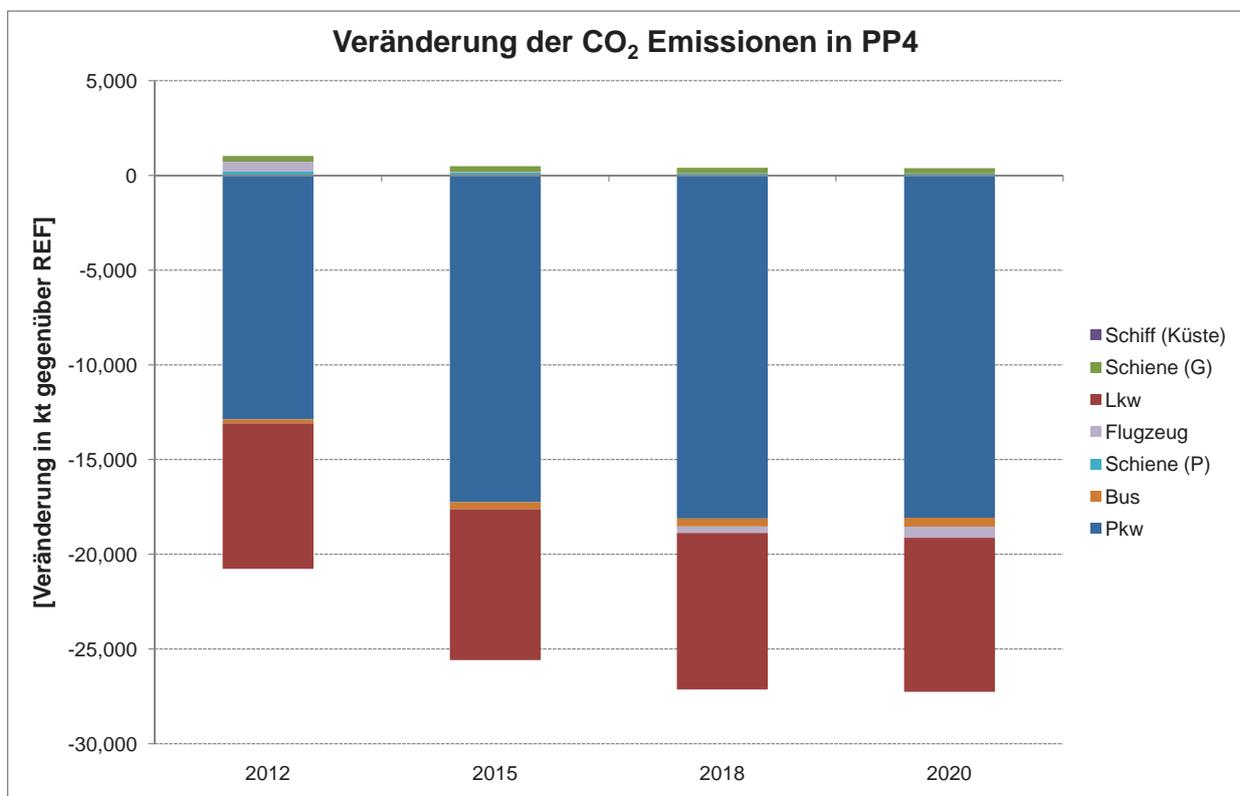


Abb. IV.6.32.: Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4

Die Auswirkungen der ambitionierten Ausweitung der Regulierungspolitik in PP4 auf die Treibhausgasemissionen von CO<sub>2</sub> zeigt sich in Abbildung IV.6.32. Die Einführung des Tempolimit erhöht die Einsparungen an CO<sub>2</sub> bis 2020 nochmals deutlich auf über 26 Mt. Das Tempolimit betrifft in erster Linie den Pkw und Lkw Verkehr hauptsächlich. CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Pkw können in PP4 um ca. 18 Mt, die des Lkw Verkehrs um ca. 8,1 Mt reduziert werden. Geringe Mengen

an zusätzlichem CO<sub>2</sub> entstehen durch die Steigerung der Personenverkehrsleistung auf der Schiene. Hierbei muss jedoch betont werden, dass es sich bei den dargestellten Emissionen nur um direkte Emissionen handelt und somit der elektrifizierte Teil des Schienenverkehrs nicht berücksichtigt ist. Dieser ist im Bereich der Stromerzeugung abgebildet und wird daher hier nicht extra ausgewiesen. Eine Addition dieses Anteils würde die Bilanz etwas verschlechtern. Ausgedrückt in relativen Emissionsminderungen verglichen mit dem REF ergeben sich Einsparungen in Höhe von über 16% bis 2020.

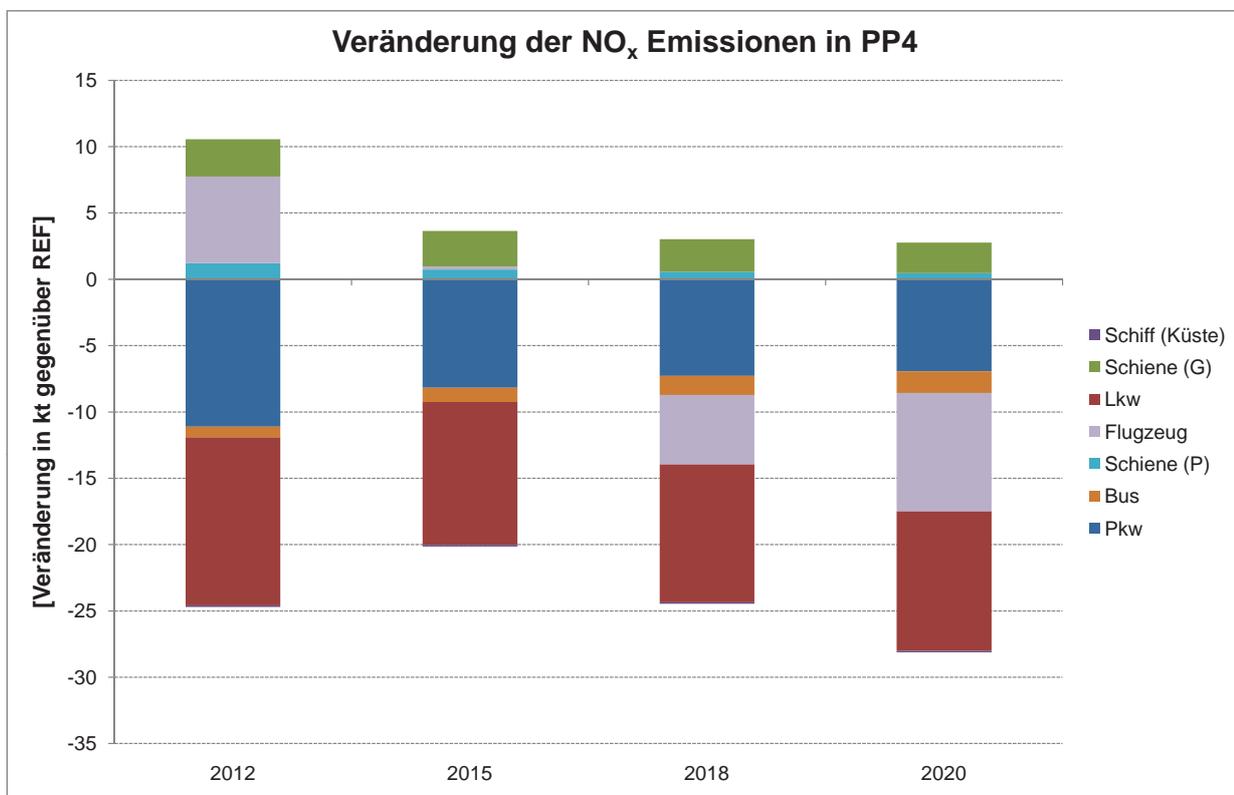


Abb. IV.6.33.: Veränderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4

Bei den in Abbildung IV.6.33 skizzierten Veränderungen der direkten NO<sub>x</sub>-Emissionen machen sich die zusätzlich gefahrenen Personen-km bei den Verkehrsmitteln Schiene und dem Flugzeug bemerkbar. Einer Reduktion der jährlichen NO<sub>x</sub>-Emissionen um 24 kt in 2012 direkt nach der Einführung des Tempolimits durch Bus, Pkw und Lkw steht eine Steigerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in Höhe von 11 kt durch die Schiene und die Luftfahrt gegenüber. Bis 2020 hingegen verbessert

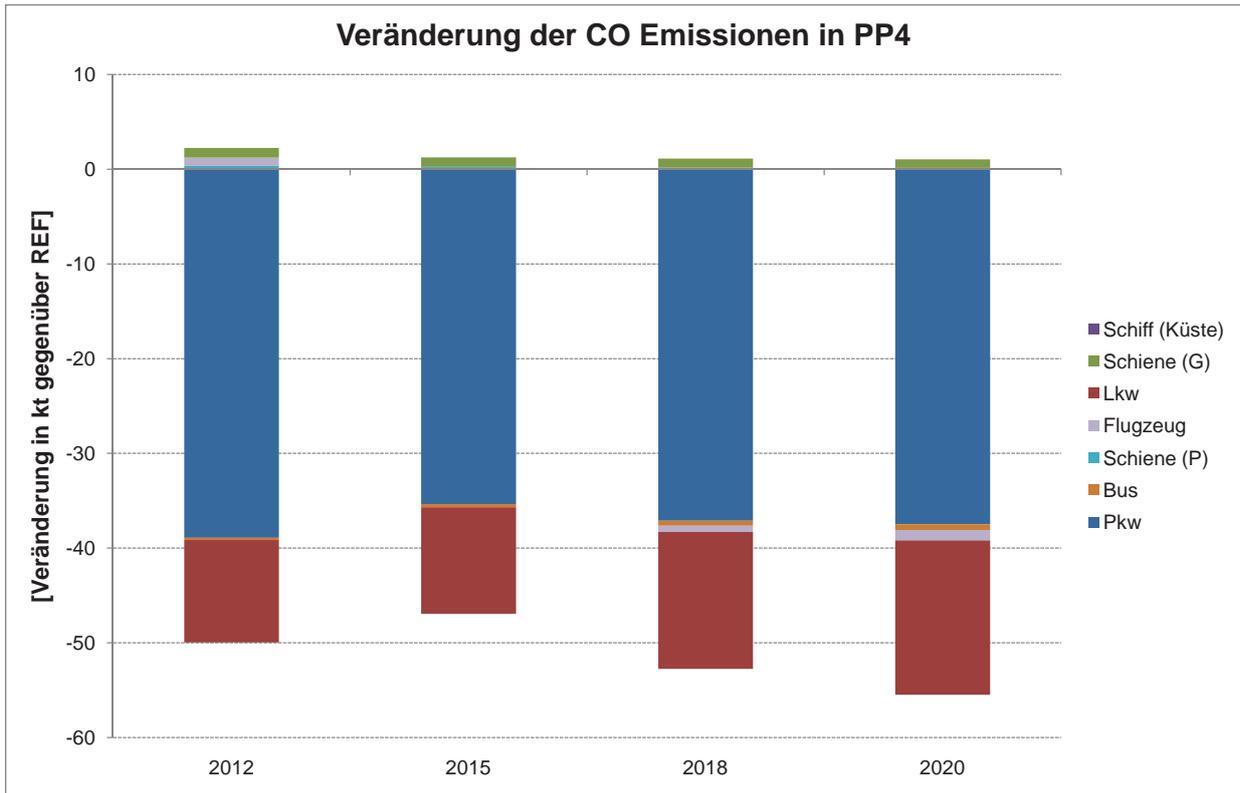


Abb. IV.6.34.: Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4

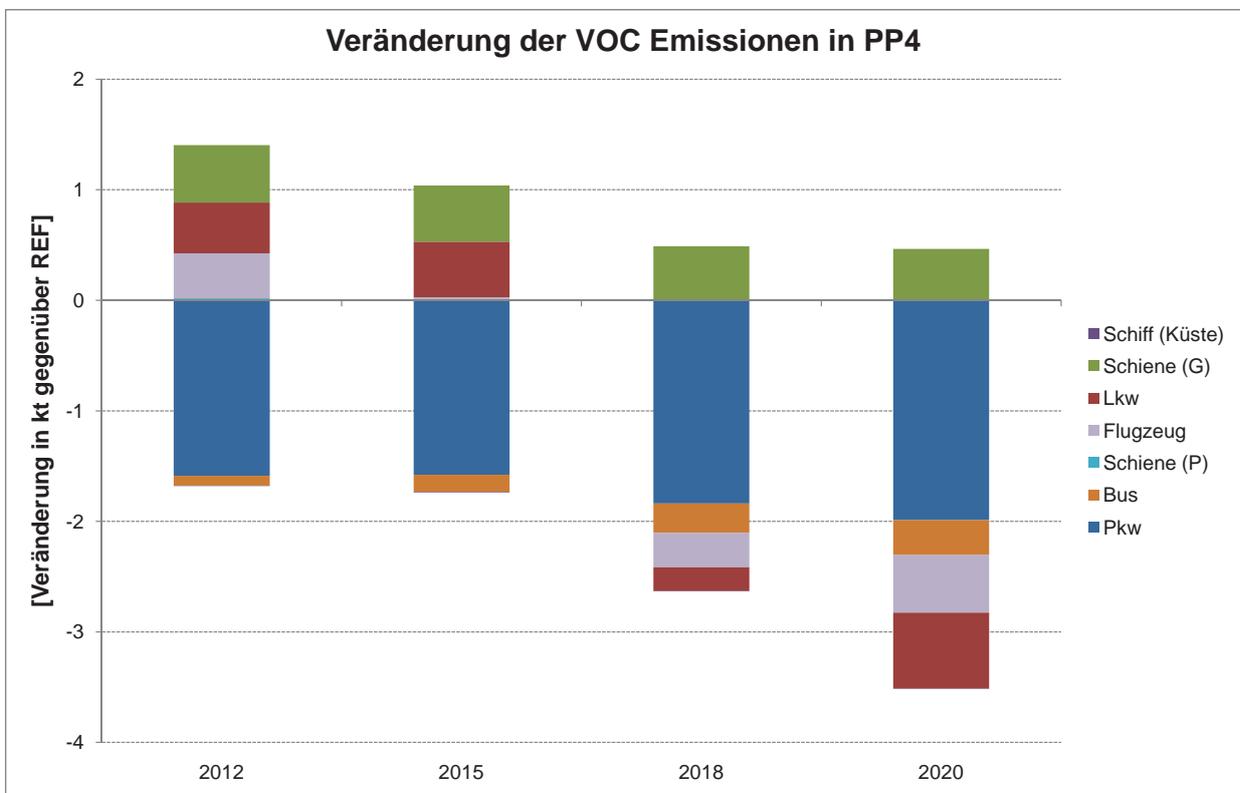


Abb. IV.6.35.: Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4

sich die Situation deutlich und es können insgesamt 25 kt an  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Vergleich zum REF eingespart werden.

In den Abbildungen IV.6.34 und IV.6.35 sind die Veränderungen der direkten CO- und VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel dargestellt. Bis 2020 ergibt sich durch die ambitionierte Ausweitung der Regulierungspolitiken eine Senkung der CO-Emissionen um 54 kt, VOC-Emissionen können in PP4 um 3 kt gesenkt werden. Bei den Veränderungen der beiden Luftschadstoffe zeigt sich der Einfluss des Tempolimits deutlich. Nahezu 99% der Einsparungen an CO kommen durch den Pkw und Lkw Verkehr. Bei den VOC-Emissionen spielen daneben noch die strengeren VOC Grenzwerte aus PP3 eine große Rolle.

## IV.7. Fazit und Ausblick zu Teil IV

Für die Berechnung der Prognosen zur Entwicklung der jährlichen Frachten der Luftschadstoffe  $\text{NO}_x$ , CO und VOC und des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  wurde das integrierte Makroökonomie-, Verkehrs-, Umwelt- und Technologie-Modell ASTRA weiterentwickelt. ASTRA ist wie das integrierte Bewertungsmodell der anderen Bereiche in otello ein System Dynamik Modell, jedoch in der Software *Vensim<sup>TM</sup>* implementiert. Für die Anwendung des ASTRA Modells zur Berechnung der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen durch den Verkehr bis 2020 wurde das ASTRA Modell an verschiedenen Stellen erweitert und angepasst. Zum einen wurden die neben  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}_2$  wichtigsten Luftschadstoffe Kohlenstoffmonoxid (CO) und flüchtige organische Verbindungen (VOC) im Bereich Verkehr in ASTRA modelliert. Auf Basis der aus HBEFA (2010) abgeleiteten Emissionsfaktoren für Pkw, Busse, leichte und schwere Nutzfahrzeuge in Abhängigkeit der Abgasnorm, der Kraftstoffart und Motorgröße, den endogen simulierten Fahrzeug-Flotten und der detaillierten Berechnung der Personen- und Güterverkehrsleistungen kann ASTRA die jährlichen Frachten dieser Stoffe prognostizieren. Dabei unterscheidet ASTRA zwischen direkten Emissionen (Emissionen bei Betriebstemperatur und Kaltstartemissionen) und indirekten Emissionen (Emissionen bei Produktion und Transport von Kraftstoffen und für die Herstellung der Fahrzeuge). Für die Darstellung der Emissionen in otello wurden nur die direkten Emissionen extrahiert, da die indirekten Emissionen im Bereich Industrie und Energieversorgung simuliert werden. Eine Doppelzählung sollte dadurch vermieden werden.

Aus einer großen Anzahl an möglichen Instrumenten zur Reduktion von Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen im Verkehr wurden jeweils zwei

Instrumentenbündel aus den Bereichen Preispolitik und Regulierungspolitik gewählt. Instrumente aus dem Bereich der Anreizpolitik wurden ausgeklammert, da diese bis auf wenige Ausnahmen nicht detailliert genug innerhalb des ASTRA Modells simuliert werden können. Die Ausgestaltung der jeweiligen Szenarien bzw. Politikpakete (PP1 bis PP4) berücksichtigt Instrumente für alle Verkehrsträger, die in besonderem Maße zur Schadstoff- bzw. Treibhausgasbelastung beitragen. Im Falle von CO<sub>2</sub> und CO sind dies besonders der Pkw- und Lkw-Verkehr, bei NO<sub>x</sub> und VOC das Flugzeug gemeinsam mit dem Straßenverkehr. Die Instrumentenbündel in PP1 und PP2 (Preispolitik) umfassen dabei unter anderem die Einführung km-bezogener Straßennutzungsgebühren, die Streichung der Entfernungspauschale, die stärkere Besteuerung von Kraftstoffen bei Flugzeugen und Schiffen, Einfahrtgebühren für Großstädte sowie die Einführung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels bei der Luftfahrt. Die beiden Instrumentenbündel im Bereich der Regulierungspolitik testen dagegen die Wirkung von Instrumenten, wie die Einführung strengerer Abgasnormen für den Straßenverkehr und Flugzeuge, der Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Verpflichtungen an die fahrzeugproduzierende Industrie und die Einführung eines einheitlichen Tempolimits auf den Bundesautobahnen. Das Ergebnis in Form von Einsparungen bei den mengenmäßig wichtigsten Luftschadstoffen bzw. Treibhausgasen im Vergleich zum Basisszenario (REF) ist in Tabelle IV.7.1 skizziert.

Tab. IV.7.1.: Vergleich der Luftschadstoffeinsparungen in PP1 bis PP4

	CO <sub>2</sub> [Mt]		NO <sub>x</sub> [kt]		CO [kt]		VOC [kt]	
	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020
PP1	-3,9	-3,1	-23,0	-22,6	-8,5	-7,8	-1,6	-1,7
PP2	-5,0	-4,4	-22,8	-22,4	-12,1	-11,2	-1,6	-1,8
PP3	-8,7	-10,7	-10,5	-24,4	1,4	-13,1	-0,9	-3,0
PP4	-21,4	-22,5	-15,8	-23,4	-40,7	-45,9	-0,7	-2,8

Die parallele Einführung verschiedener Instrumente im Bereich der Regulierungspolitiken (PP3 und PP4) erweist sich anhand der Ergebnisse als bedeuten-

---

de Einflussmöglichkeit zur Reduktion der Luftschadstoffe und Treibhausgase bis 2020. ASTRA prognostiziert durch die Instrumente in PP3 einen Rückgang der jährlichen direkten Emission von CO<sub>2</sub> um 10,7 Mt, von NO<sub>x</sub> um 24,4 kt, von CO um 13,1 kt und von VOC um 3 kt bis zum Jahr 2020. Durch die zusätzliche Einführung des Tempolimits in PP4 erhöhen sich die jährlichen Einsparungen an Emissionen durch den stark betroffenen Pkw-Verkehr besonders bei CO<sub>2</sub> und CO. Über 16% der CO<sub>2</sub>-Emissionen und knapp unter 16% der CO-Emissionen lassen sich laut Berechnungen mit ASTRA in PP4 einsparen.

Durch die stärkere Belastung des Luftverkehrs durch Änderung der Kerosin- und Ticket-Besteuerung in PP1 bzw. noch der zusätzlichen Einführung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels im Luftverkehr in PP2 zeigen sich besonders bei NO<sub>x</sub> deutliche Einsparungen in diesen beiden Szenarien. Durch die Instrumente in PP1 und PP2 lassen sich laut den ASTRA Prognosen ca. zwischen 22,4 und 22,6 kt direkte NO<sub>x</sub>-Emissionen bis 2020 einsparen. Bei den anderen Schadstoffen und bei CO<sub>2</sub> erweisen sich die Instrumentenbündel im Bereich der Regulierungspolitiken in PP3 und PP4 als effektiver. In PP1 können 3,1 Mt CO<sub>2</sub>, 7,8 kt CO und 1,7 kt VOC bis 2020 eingespart werden, in PP2 können diese um 4,4 Mt (CO<sub>2</sub>), 11,2 kt (CO) und 1,8 kt (VOC) reduziert werden. Ein wesentlicher Unterschied zwischen PP1 und PP2 auf der einen und PP3 und PP4 auf der anderen Seite besteht darin, dass Preisinstrumente nicht zwanghaft zu einer Änderung des Verhaltens führen, wohingegen Regulierungsinstrumente die Einhaltung der Normen, Standards oder Richtlinien implizieren. Darüberhinaus haben Regulierungsinstrumente bei einer durchdachten Konzeption den Vorteil, dass dadurch der Endkunde sogar profitieren kann.

Ein weiterer Erkenntnis-Gewinn bei der Analyse der Szenarienergebnisse besteht darin, dass bei der gezielten Zusammenstellung von Instrumenten mit dem Ziel der Einhaltung einer Richtlinie wie der NEC auch unerwünschte Rebound Effekte entstehen können. Das Testen von Instrumentenbündeln mit integrierten Bewertungsmodellen wie dem ASTRA Modell kann daher nützlich sein, um diese bereits im Vorfeld identifizieren zu können. Einige Beispiele wurden bei der Analyse der Szenarien hervorgehoben. In PP1 verursacht der ursprünglich als Kompen-

sation der Kosten durch die Straßennutzung vorgesehene Wegfall der Kfz-Steuer eine Senkung der Kosten von Pkw mit konventionellem Antrieb. Dadurch wird die Durchdringung der Pkw-Flotten mit alternativen, effizienteren bzw. deutlich schadstoffärmeren Technologien gedrosselt und der Effekt der Einführung der km-bezogenen Straßennutzungsgebühren fällt bezüglich der Emissionsreduktion deutlich geringer aus als antizipiert. Ein ähnliches Beispiel lässt sich in PP3 beobachten. Hier führt die Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Verpflichtung der Fahrzeughersteller dazu, dass die neu zugelassenen Fahrzeuge effizienter und damit kostengünstiger im Betrieb sind. Dadurch steigt der Anteil des individuell motorisierten Verkehrs an der gesamten Personenverkehrsleistung und umweltfreundliche Verkehrsmittel wie die Bahn verlieren leicht an Anteil. Eine Mischung der verschiedenen Instrumente aus allen Bereichen, der Preispolitik, der Regulierungspolitik sowie der hier ausgeklammerten Anreizpolitik, kann diesen Rebound Effekten entgegen wirken und so zu einer stärkeren Reduktion von Luftschadstoffen und Treibhausgasen aus dem Verkehr führen.

Ebenfalls deutlich wird anhand der Analyse der Emissionsfaktoren (HBEFA (2010)) die deutlich gegenläufige Entwicklung bei CO<sub>2</sub> und den Luftschadstoffemissionen von CO, NO<sub>x</sub> und VOC ab der Abgasnorm Euro 6. Die sinkenden Grenzwerte führen dazu, dass der Verbrauch und der Ausstoß an CO<sub>2</sub> steigen. Es ist fraglich, ob dieses Paradoxon technisch gelöst werden kann. Falls nicht, stellt sich politisch gesehen die Frage, welche Seite zukünftig prioritär behandelt werden wird.

Auf Seite der Simulationswerkzeuge lässt sich sagen, dass ASTRA durch seinen integrierten, dynamischen Bewertungsansatz prädestiniert für die Analyse solcher Instrumente und Instrumentenbündel ist. Eine Verfeinerung der geografischen Auflösung des Verkehrsmodells von vier deutschen Zonen auf NUTS2 Level in ASTRA wird die regionalen Belastungen bei Luftschadstoffen und Treibhausgasen verdeutlichen. Zusätzlich kann eine Einführung von Flottenmodellen für alle nicht straßengebundenen Verkehrsmittel sinnvoll sein, da dadurch die technische Entwicklung dieser Flotten ebenfalls endogen beeinflusst werden kann und somit Preis- und Regulierungsinstrumente feiner abgebildet werden können.

## IV.8. Literatur zu Teil IV

- [Akkermans u. a. 2010] AKKERMANS, Lars ; VANHERLE, Kris ; MOIZO, Alessandra ; RAGANATO, Paola ; SCHADE, Burkard ; LEDUC, Guillaume ; WIESENTHAL, Tobias ; SHEFERD, Somin ; TIGHT, Miles ; GÜHNEMANN, Astrik ; KRAIL, Michael ; SCHADE, Wolfgang: Ranking of measures to reduce GHG emissions of transport: reduction potentials and feasibility qualification / TML, TRT, IPTS, ITS, ISI. Karlsruhe : Europäische Kommission, 2010. – DG-Research
- [BMVBS 2004] BMVBS: Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Auszug: die Kraftstoffstrategie - alternative Kraftstoffe und innovative Antriebe. Berlin : Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2004. – Forschungsbericht
- [BMVBS 2009] BMVBS: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin : Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2009. – Forschungsbericht
- [BMVBW 2010] BMVBW: *Verkehr in Zahlen 2009/2010*. Berlin : Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, 2010
- [Boss und Rosenschon 2008] BOSS, Alfred ; ROSENSCHON, Astrid: Der Kieler Subventionsbericht: eine Aktualisierung. Kiel : Institut für Weltwirtschaft Kiel, 2008. – Forschungsbericht
- [Bundesregierung 2004] BUNDESREGIERUNG: Perspektiven für Deutschland

- Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Fortschrittsbericht 2004. Berlin : Bundesregierung, 2004. – Forschungsbericht. – 170–196 S

[Consult 1990] CONSULT, PLANCO: Externe Kosten unterschiedlicher landgebundener Verkehrsträger. Essen : Deutsche Bundesbahn, 1990. – Forschungsbericht

[Doll u. a. 2010] DOLL, Claus ; KRAIL, Michael ; FRÖHLING, Magnus ; HIETE, Michael: Measures and Instruments for Emission Reduction in Transport - Findings from the Otello Project. In: *12th World Conference on Transport Research (WCTR)*. Lissabon, 2010

[EU 2004] EU: *DIRECTIVE 2004/26/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC. On the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from non road mobile machinery*. Brüssel : Europäische Kommission, 2004

[EU 2011] EU: Weissbuch Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Brüssel : Europäische Kommission, 2011. – Forschungsbericht

[EU / IES 2008] EU / IES: *2007 Technical Review of the NRMM-Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC*. Brüssel : Europäische Kommission, DG-JRC und Institute für Environment and Sustainability (IES), 2008

[Fiorello u. a. 2009] FIORELLO, D. ; DE STASIO, C. ; KÖHLER, J. ; KRAFT, M. ; NEWTON, S. ; PURWANTO, J. ; SCHADE, B. ; SCHADE, W. ; SZIMBA, E.: The iTREN-2030 reference scenario until 2030. Deliverable 4 of iTREN-2030 (Integrated transport and energy baseline until 2030). Project co-funded by European Commission 6th RTD Programme. Mailand, 2009. – Forschungsbericht

- [Fraunhofer-ISI u. a. 2008] FRAUNHOFER-ISI ; ETH-ZÜRICH ; ÖKO-INSTITUT ; FZ-JÜLICH ; CEPE: Wirtschaftlicher Nutzen des Klimaschutzes - Kostenbetrachtung ausgewählter Einzelmaßnahmen der Meseberger Beschlüsse zum Klimaschutz. Karlsruhe : Umweltbundesamt (UBA), 2008. – Forschungsbericht
- [Friedrich und Bickel 1995] FRIEDRICH, Rainer ; BICKEL, Peter: *Was kostet uns die Mobilität? Externe Kosten des Verkehrs*. Heidelberg, 1995
- [Gühnemann 1998] GÜHNEMANN, Astrid: Entwicklung eines Verfahrens zur Aufstellung umweltorientierter Fernverkehrspläne. Karlsruhe : Umweltbundesamt, 1998. – Forschungsbericht
- [Greenpeace 2008] GREENPEACE: Umweltschädliche Subventionen und Steuerbegünstigungen des Bundes. Hamburg : Greenpeace e.V., 2008. – Forschungsbericht
- [Huckestein und Verron 1996] HUCKESTEIN, Burkhard ; VERRON, Hedwig: *Externe Effekte des Verkehrs in Deutschland*. In: UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Mobilität um jeden Preis? Expertenworkshop zu den externen Effekten des Verkehrs und den Möglichkeiten sie zu verringern*. Berlin : Umweltbundesamt, 1996
- [ÖI u. a. 2008] ÖI ; FZJ ; DIW ; ISI: Politiksznarien für den Klimaschutz IV - Szenarien bis 2030 für den Projektionsbericht 2007. Berlin, Jülich, Karlsruhe : Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2008. – Forschungsbericht
- [ICAO 2006] ICAO: Convention in International Civil Aviation (Chicago Convention). Montreal : International Civil Aviation Organisation (ICAO), 2006. – Forschungsbericht

- [IER 2004] IER: New Ext: Final Report to the European Commission. Stuttgart : IER, ARMINES/ENSMP, PSI, Université de Paris, University of Bath, VITO, 2004. – DG-Research
- [Jochem u. a. 2008] JOCHEM, E. ; JÄGER, C. ; SCHADE, W. ; BATTAGLINI, A. ; EICHHAMMER, W. ; KÖHLER, J. ; KÖWENER, D. ; WIETSCHER, M. ; ET AL: Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland. Karlsruhe, Berlin, 2008. – Endbericht des KlimInvest 2020 Projekts für das BMU. – URL <http://www.kliminvest.net/download.html>
- [King 2007] KING, J.: King Report - Low Carbon Cars - Part I. The potential for CO<sub>2</sub> reduction und Part II Recommendations for action. London : The Stationery Office, 2007. – Forschungsbericht
- [Knörr u. a. 2010] KNÖRR, Wolfram ; KUTZNER, Frank ; LAMBRECHT, Udo ; SCHACHT, Alexander: Fortschreibung und Erweiterung Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO Version 5) / Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU). Heidelberg : Umweltbundesamt, 2010. – Forschungsbericht
- [Krahl 2009] KRAHL, M.: *System-Based Analysis of Income Distribution Impacts on Mobility Behaviour*. Baden-Baden : Nomos-Verlag, 2009
- [Leontief 1966] LEONTIEF, W.W.: *Input-Output Economics*. New York : Oxford University Press, 1966
- [Luhmann 2006] LUHMANN, J.: Werbungskosten für Fahrten zur Arbeitsstätte „geschleift“ - außer für den Dienstwagen: das lückenhafte Ende eines deutschen Sonderwegs. In: *Wuppertal Bulletin zu Instrumenten des Klima- und Umweltschutzes* Bd. 9. Wuppertal, 2006
- [Maibach und Rothengatter 2000] MAIBACH, Markus ; ROTHENGATTER, Wer-

- ner: External Costs of Transport, Update 1995. Zürich, Karlsruhe : Internationaler Bahnverband (UIC), Paris, 2000. – Forschungsbericht
- [Maibach u. a. 2008] MAIBACH, Markus ; SCHREYER, Christoph ; VAN ESSEN, Huib ; DOLL, Claus: Handbook on the Estimation of the External Costs of Transport: Deliverable 1 of the study IMPACT: Internalisation of all external costs of transport. Zürich, Delft, Karlsruhe : Europäische Kommission, DG-TREN, 2008. – Forschungsbericht
- [Matthes u. a. 2009] MATTHES, F. ; GORES, S. ; HARTHAN, R. ; MOHR, L. ; PENNINGER, G. ; MARKEWITZ, P. ; HANSEN, P. ; MARTINSEN, D. ; DIEKMANN, J. ; HORN, M. ; EICHHAMMER, W. ; FLEITER, T. ; KÖHLER, J. ; SCHADE, W. ; SCHLOMANN, B. ; SENSFUSS, F.: Politiksznarien für den Klimaschutz V - Auf dem Weg zum Strukturwandel. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030 / Öko-Institut, FZ-Jülich, Fraunhofer-ISI, H. J. Ziesing. Dessau : Umweltbundesamt, 2009. – Forschungsbericht
- [Mauch und Rothengatter 1994] MAUCH, Samuel ; ROTHENGATTER, Werner: External Costs of Transport. Paris : Internationaler Bahnverband (UIC), 1994. – Forschungsbericht
- [HBEFA 2010] HBEFA: *Handbuch der Emissionsfaktoren HBEFA 3.1*. Basel : Infras, 2010. – URL [www.hbefa.net](http://www.hbefa.net)
- [McKinsey 2008] MCKINSEY: Pathways to a Low Carbon Economy. Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. McKinsey&Comany, 2008. – Forschungsbericht
- [McKinsey 2010] MCKINSEY: A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis - The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. Brüssel, Belgien : NEW-IG Secretariat, 2010. – Forschungsbericht

- [ME&P 2000] ME&P: SCENES European Transport Forecasting Model and Appended Module: Technical Description, Deliverable D4 of SCENES (Modelling and methodology for analysing the interrelationship between external developments and European transport) project funded by the European Commission 4th RTD framework. Cambridge, 2000. – Forschungsbericht
- [Nash 2003] NASH, Chris: Unification of Accounts and Marginal Costs for Transport Efficiency (UNITE). Leeds : University of Leeds, Institute of Transport Studies on behalf of the European Commission, 2003. – Forschungsbericht
- [Schade u. a. 2002] SCHADE, B. ; ROTHENGATTER, W. ; SCHADE, W.: Strategien, Maßnahmen und ökonomische Bewertung einer dauerhaft umweltgerechten Verkehrsentwicklung (Strategies, Instruments and Economic Assessment of Environmentally Sustainable Transport (EST)). Berlin : Erich-Schmidt-Verlag, 2002. – Endbericht für das Umweltbundesamt
- [Schade 2005] SCHADE, W.: *Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy*. Baden-Baden, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2005
- [Schade u. a. 2009] SCHADE, W. ; LÜLLMANN, A. ; BECKMANN, R. ; KÖHLER, J.: IEKP-Makro - Gesamtwirtschaftliche Wirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen in den Bereichen Gebäude, Unternehmen und Verkehr. Karlsruhe, 2009. – Endbericht des IEKP-Makro Projekts für das Umweltbundesamt
- [Schreyer u. a. 2007] SCHREYER, Christoph ; MAIBACH, Markus ; BICKEL, Peter ; DOLL, Claus: Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland 2005. Zürich, Stuttgart, Karlsruhe : INFRAS, IER, ISI im Auftrag der Allianz-pro-Schiene e.V., 2007. – Forschungsbericht
- [TNO u. a. 2008] TNO ; INFRAS ; IVL ; IFEU ; TU GRAZ: Cost-Effectiveness of Greenhouse Gases Emission Reductions in various Sectors.

Delft, Zürich, Heidelberg, Stockholm, Graz : Europäische Kommission, 2008.  
– Forschungsbericht

[UBA 2008] UBA: Die Subventionierung des Verkehrs in Europa. Dessau :  
Umweltbundesamt, 2008. – Forschungsbericht

[UIC / CER 2006] UIC / CER: Rail Diesel Emissions - Facts and Challenges.  
Paris, Brüssel : Internationaler Bahnverband (UIC) und Gemeinschaft Europäi-  
scher Bahnen und Infrastrukturunternehmen (CER), 2006. – Forschungsbericht



## **Teil V.**

# **Exemplarische Anwendung des otello-Modellsystems**

**(P. Breun, T. Comes, C. Doll, M. Fröhling, M. Hiete, R. Ilse, M. Krail,  
T. Lützkendorf, F. Schultmann, J. Stengel, M. Unholzer)**



## V.1. Einleitung

Der folgende Berichtsteil setzt sich mit dem Zusammenspiel der einzelnen im Vorangegangenen beschriebenen Teilmodelle auseinander. Zunächst werden einige bereichsübergreifende Modellergebnisse dargestellt (Kapitel V.2). Hierbei wird insbesondere das Basisszenario über die Teilmodelle hinweg ausgewertet (Abschnitt V.2.1). Anschließend werden ausgewählte Szenarios aufgeführt, anhand derer die Kopplung der Modellteile vertieft dargestellt und deren Wechselwirkungen quantitativ beschrieben werden (Abschnitt V.2.2).

In Kapitel V.3 wird die Methodik zur multikriteriellen Bewertung erläutert. Hierbei werden zunächst szenariobasierte Techniken zur Entscheidungsunterstützung unter Unsicherheit veranschaulicht (Abschnitt V.3.1). Zudem werden die Szenarios, die in otello die Grundlage für die Bewertung der einzelnen Strategien zur Luftreinhaltung bilden, charakterisiert. Anschließend beschreibt Abschnitt V.3.2 ein Entscheidungsunterstützungssystem, das es ermöglicht, verschiedene konfligierende Ziele gleichzeitig zu berücksichtigen und die Resultate aggregiert darzustellen, wobei Abschnitt V.3.3 einen Auszug der Ergebnisse der multikriteriellen Bewertung wiedergibt.

Der Berichtsteil endet mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick.



## V.2. Bereichsübergreifende Modellergebnisse

Die Teilmodelle Industrie & Energieversorgung, Wohngebäude und Verkehr haben jeweils ein Basisszenario definiert, das der aktuellen Gesetzgebung in den Bereichen entspricht und die Entwicklung der Emissionen ohne weitergehende politische und rechtliche Anpassungen abschätzt. Eine ausführliche Beschreibung der zugrunde liegenden Annahmen sowie der politischen Rahmenbedingungen findet sich in den jeweiligen Berichtsteilen. Ebenso sind dort die Auswertungen der bereichsspezifischen Ergebnisse zu finden.

Zur Veranschaulichung der Wechselwirkungen zwischen den Teilmodellen Wohngebäude und Industrie wird das Szenario *Ökoschnellmodernisierer im Teilmodell Wohngebäude* betrachtet. Dies entspricht dem in Kapitel III.4.3 vorgestellten Szenario „Ökoschnellmodernisierer“, in dem den Hauseigentümern ein ökologisches Verhalten unterstellt wird und zudem von kürzeren Investitionszyklen als in den übrigen Szenarios ausgegangen wird. Dieses Szenario stellt hinsichtlich der getroffenen Annahmen sowie der Entwicklung des Endenergiebedarfs im Bereich Wohngebäude ein Extremszenario dar.

Weiterhin wird ein Szenario *Ökoschnellmodernisierer in den Teilmodellen Wohngebäude und Industrie* beschrieben. Die Annahmen für das Teilmodell Wohngebäude entsprechen dabei dem Szenario *Ökoschnellmodernisierer im Teilmodell Wohngebäude*. Zusätzlich wird auch im Industriemodell ein Verhalten der Unternehmer unterstellt, das sich ausschließlich nach ökologischen Zielsetzungen ausrichtet.

Die im Preismodell berechneten Preisänderungen der verschiedenen Güter dienen dem Teilmodell Wohngebäude als Input-Größen. Neben den exogenen Vorgaben von Weltmarktpreisen und Produktivitätssteigerung hat insbesondere das po-

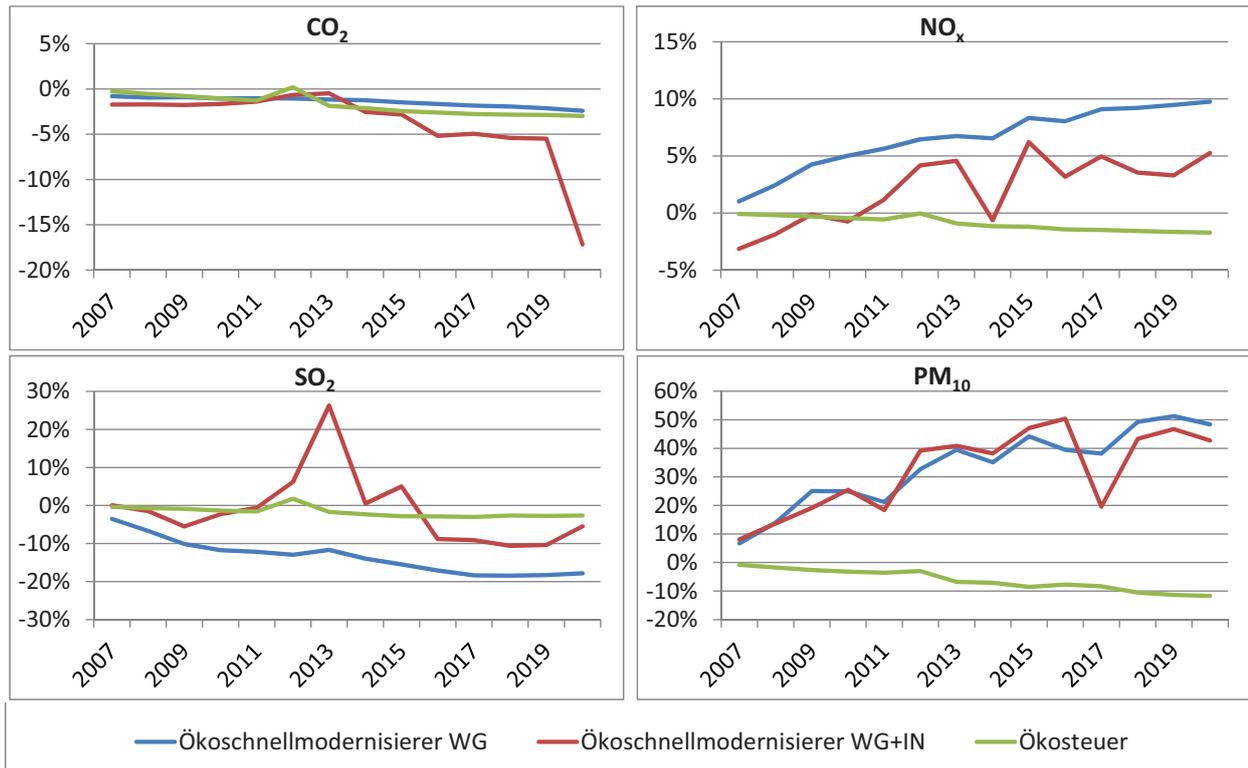


Abb. V.2.1.: Entwicklung der Gesamtemissionen der verschiedenen Szenarios im Vergleich zum Basisszenario

litische Instrument „Ökosteuern“ Einfluss auf die Entwicklung der Preise und wird daher in einem weiteren Szenario untersucht.

Die Ökosteuern umfasst die Energie- und die Stromsteuer und ist in Form von Gütersteuern auf Energieträger implementiert. Es werden verschiedene Steuersätze für Industriesektoren und private Nutzer unterschieden, die aus den entsprechenden Gesetzestexten hervorgehen (vgl. Abschnitt II.5.1.3). Eine Erhöhung der Steuersätze wirkt sich somit auf beide Teilmodelle (Industrie & Energieversorgung und Wohngebäude) aus. Im Szenario *Ökosteuern* werden alle Steuersätze auf Energieträger ab 2012 verfünffacht.

Tabelle V.2.1 fasst in einem Überblick die Emissionentwicklung in den verschiedenen Szenarios zusammen. Dargestellt ist die prozentuale Änderung im Jahr 2020 gegenüber dem Jahr 2007 in den einzelnen Bereichen für die vier Schadstoffe CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub>. Den Verlauf der Gesamtemissionen der verschiedenen Szenarios im Vergleich zum Basisszenario gibt Abbildung V.2.1 wieder.

Tab. V.2.1.: Änderung der Emissionsfrachten von 2007 bis 2020 in den verschiedenen Szenarios

Szenario		CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
Basis	Elektrizitätsversorgung	10,63%	-13,73%	-27,64%	-24,02%
	Zement	-10,41%	-7,52%	-17,03%	-6,64%
	Stahl	-14,19%	-25,26%	-20,00%	-21,34%
	Wohngebäude	-6,86%	-4,01%	-21,18%	-6,60%
	Verkehr	-5,40%	-43,42%		-55,07%
	gesamt	-0,21%	-34,12%	-26,02%	-19,06%
Ökoschnell- modernisierer Wohngebäude	Elektrizitätsversorgung	4,95%	-18,75%	-31,71%	-28,61%
	Zement	-10,59%	-7,71%	-17,22%	-6,82%
	Stahl	-14,37%	-25,39%	-20,16%	-21,52%
	Wohngebäude	-3,43%	55,10%	-82,05%	93,26%
	Verkehr	-5,40%	-43,42%		-55,07%
	gesamt	-1,83%	-28,42%	-36,97%	12,56%
Ökoschnell- modernisierer Wohngebäude und Industrie	Elektrizitätsversorgung	-32,18%	-15,25%	-23,66%	-30,46%
	Zement	-9,99%	-23,47%	-18,66%	-6,16%
	Stahl	-6,66%	-8,95%	-13,90%	-33,28%
	Wohngebäude	-3,43%	55,10%	-82,05%	93,26%
	Verkehr	-5,40%	-43,42%		-55,07%
	gesamt	-15,88%	-28,41%	-30,12%	6,84%
Ökosteuern	Elektrizitätsversorgung	7,86%	-16,11%	-29,63%	-26,30%
	Zement	-12,68%	-10,05%	-19,56%	-9,01%
	Stahl	-16,03%	-26,56%	-21,63%	-23,05%
	Wohngebäude	-13,53%	-10,80%	-21,12%	-35,37%
	Verkehr	-5,40%	-43,42%		-55,07%
	gesamt	-2,93%	-35,19%	-27,70%	-27,98%

### V.2.1. Basisszenario

Im Basisszenario berechnet das Input-Output-Modell einen Anstieg der Bruttowertschöpfung von 2007 bis 2020 von 8,8%. Diese geht einher mit höheren Produktionszahlen, die in Summe in Euro ausgedrückt um 21,7% angestiegen sind. Dabei ist aufgrund der fast vollständig konstanten Koeffizienten der Input-Output-Matrix keine relevante Verschiebung zwischen den Sektoren zu erkennen.

Für die von den Teilmodellen abgedeckten Emissionen ergeben sich im Basisszenario die Verläufe, wie in den Abbildungen V.2.2 dargestellt.

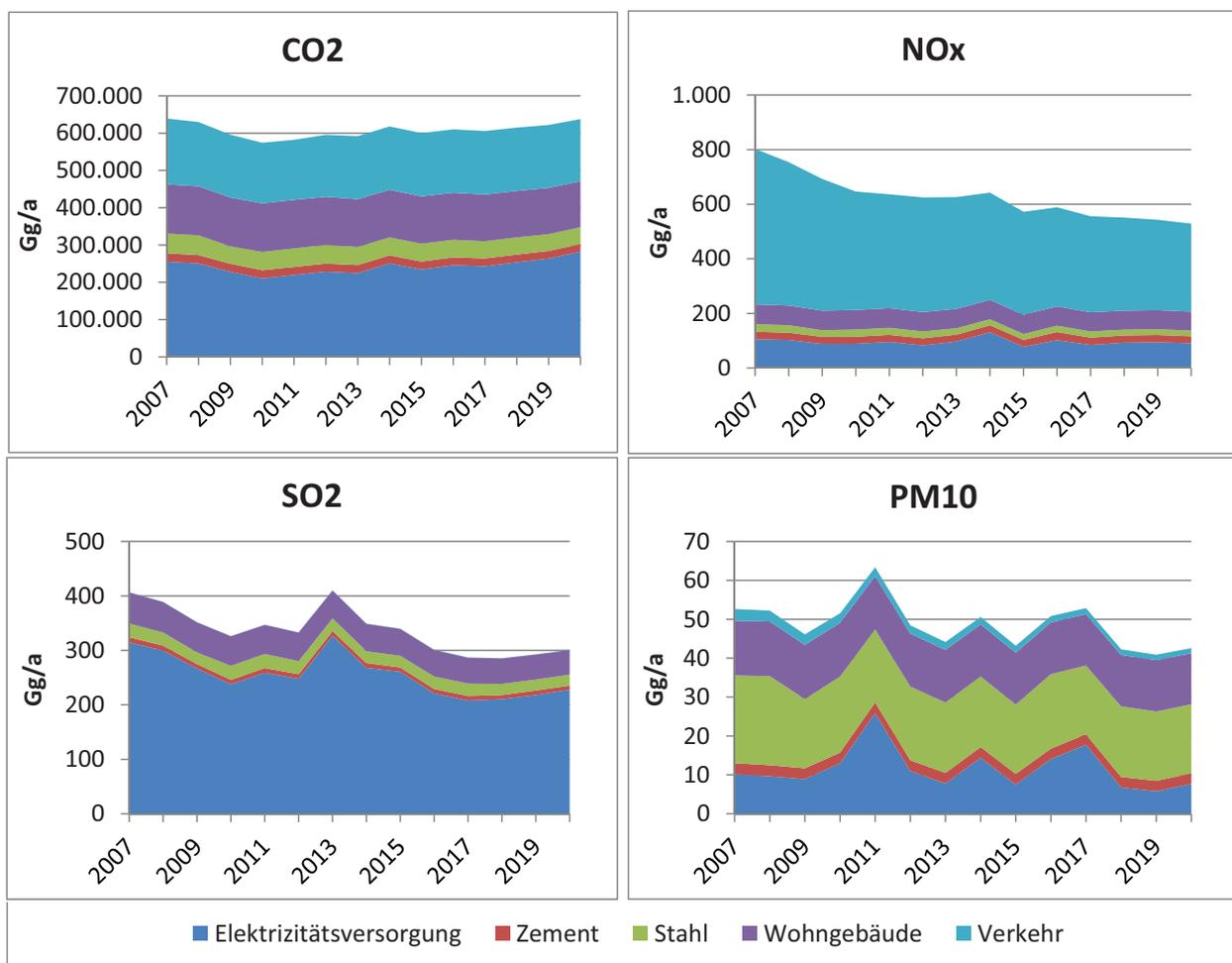


Abb. V.2.2.: Entwicklung der Emissionen aus den Teilmodellen im Basisszenario

Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt sich, dass die Entwicklung im Energiesektor den Verlauf dominiert. Trotz deutlicher relativer Minderungen in den anderen Sektoren und Bereichen führt der Anstieg im Energiesektor zu einem Wiederanstieg

der Gesamtemissionen auf das Niveau von 2007. Der Anstieg der Stromnachfrage, von dem in diesem Szenario ausgegangen wird, trägt teilweise zu dem Anstieg der Emissionen bei, jedoch zeigt sich im Basisszenario, wie in Abschnitt II.6.4 beschrieben, ebenfalls eine Zunahme des Anteils der Kohlekraftwerke am Strommix zur Kompensierung der Kernkraftwerke. Zu beachten bleibt hier, dass im Basisszenario kein CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel eingeführt wurde.

Auch bei den SO<sub>2</sub>-Emissionen spielen die Kraftwerke eine bedeutende Rolle und beeinflussen den Verlauf der Gesamtemissionen maßgeblich.

Bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen trägt der Verkehr den größten Teil zu den Emissionen und auch zu deren Minderung bei. Auch hier treten die absoluten Minderungen der übrigen Emittenten in den Hintergrund.

Von den hier abgebildeten Sektoren trägt der Stahlsektor einen wesentlichen Teil zu den Staubemissionen bei. Es zeigt sich auch ein nicht zu vernachlässigender Einfluss der Wohngebäude, was insbesondere vor dem Hintergrund der in den dort betrachteten Szenarios auftretenden Steigerungen an Staubemissionen durch Holzfeuerung an Bedeutung gewinnt.

Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklungen in den einzelnen Bereichen findet sich in den jeweiligen Berichtsteilen der Teilmodelle.

## **V.2.2. Weitere Szenarios**

In den folgenden Ausführungen werden die Unterschiede der Werte für das Jahr 2030 im Vergleich zum Basisszenario angegeben.

### **V.2.2.1. Ökoschnellmodernisierer im Teilmodell Wohngebäude**

Das Szenario erreicht insgesamt eine geringe Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und eine deutliche Reduktion der SO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Basisszenario (vgl. Abbildung V.2.1). Die Änderungen gehen entsprechend der gewählten Szenariodefinition vom Wohngebäudemodell aus. Dort zeigt sich ein deutlicher Anstieg

der Nutzung von Holzpellettheizungen. Dieser Energieträgerwechsel erklärt den deutlichen Anstieg der Staub- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen (s. auch Kapitel III.6).

Weiterhin kommt es zu einem leichten Rückgang der Industrieemissionen durch den Rückgang des Endenergiebedarfs im Wohngebäudemodell. In diesem Szenario liegt der zum Heizen eingesetzte Endenergiebedarf der Haushalte im Jahr 2030 um 611.144 TJ/a bzw. 36,7% unter dem Bedarf im Basisszenario. Damit einher geht ein Rückgang der  $\text{CO}_2$ -Emissionen im Jahr 2030 von 5.872 Gg/a bzw. 6,1%.

Wie bereits dargestellt, geht die Berechnung des Endenergiebedarfs im Teilmodell Wohngebäude in das Konsummodell des makroökonomischen Rahmenmodells ein. Hier wird der Verwendungszweck CC04 „Wohnen“ durch die Ergebnisse des Teilmodells genauer spezifiziert und an die dort simulierten Änderungen bezüglich Heizung und Dämmung der Wohngebäude angepasst. Dies resultiert in einer geänderten Zusammensetzung der zum Heizen nachgefragten Energieträger, die in großen Teilen von der Industrie bereitgestellt werden und somit auch dort zu Anpassungen führen.

### **Nachfrage nach Strom**

Der Rückgang der Stromnachfrage zum Heizen beträgt in diesem Szenario 21.400 TJ/a bzw. 33,2%. Dies bewirkt im Teilmodell Industrie einen Produktionsrückgang für die Kraftwerke von 1,7%. Dadurch sind die  $\text{CO}_2$ -Emissionen 8.600 Gg bzw. 2,8% geringer als im Basisszenario. Der überproportionale Rückgang der Emissionen im Vergleich zum Produktionsrückgang deutet darauf hin, dass bereits im Verlauf der Simulation im Teilmodell Industrie durch den Rückgang der Nachfrage andere Investitionsentscheidungen getroffen wurden bzw. dass sich eine andere Zusammensetzung des Strommixes ergibt.

### **Nachfrage nach Heizöl und Gas**

Während bei der Elektrizitätsversorgung nur geringe Änderungen zu erkennen sind, da der Einsatz von Strom zum Heizen der Wohngebäude nur einen gerin-

gen Anteil der Stromnachfrage ausmacht, zeigen sich deutlichere Änderungen für die Produktionsbereiche der Mineralöl- sowie der Gasversorgung. Für diese beiden Produktionsbereiche berechnet das Input-Output-Modell aufgrund der geänderten Nachfrage aus dem Teilmodell Wohngebäude einen Rückgang der Produktionswerte um 5,6% bzw. 57,1%.

### **Nachfrage nach Holz/Holzpellets**

Aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach Holzpellets erfährt der Produktionsbereich Forstwirtschaft einen deutlichen Anstieg seines Produktionswertes um 180%.

Der Einsatz von Brennholz und Holzpellets als Brennstoff ist durch die Verfügbarkeit inländischen Holzes begrenzt. Um diese Begrenzung der Verfügbarkeit abzubilden, wird der vom Preismodell berechnete Preisanstieg zusätzlich verstärkt. Dazu wird eine exponentielle Zunahme der Gewinnmarge in Abhängigkeit von der produzierten Menge an Holz simuliert.

Die enorme Zunahme der Produktion im Produktionsbereich Forstwirtschaft deutet jedoch darauf hin, dass hier ein noch stärkerer Preisanstieg vorgegeben oder die Möglichkeit einer Verlagerung der Produktion ins Ausland abgebildet werden muss.

#### **V.2.2.2. Ökoschnellmodernisierer in den Teilmodellen Wohngebäude und Industrie**

Zu den Effekten aus dem Wohngebäudemodell, wie im vorangehenden Szenario beschrieben, kommen nun noch deutliche Minderungen aus dem Industriemodell. Der Rückgang der  $\text{NO}_x$ -Emissionen in den Industriesektoren kann den Anstieg bei den Wohngebäuden jedoch nicht vollständig ausgleichen. Der Anstieg der  $\text{SO}_2$ -Emissionen lässt sich durch eine Verschiebung der Investitionen hin zu anderen Schadstoffen erklären, was teilweise durch die Anzahl und Auswahl der in der technischen Datenbank definierten Minderungsmaßnahmen bedingt und damit modellspezifisch ist.

### V.2.2.3. Ökosteuer

In dem Szenario mit einer Verfünffachung der Steuersätze zeigt sich auf makroökonomischer Seite ein Anstieg des Verbraucherpreisindizes. Dieser liegt 2030 3,3%-Punkte höher als im Basisszenario.

Während sich in den abgebildeten Industriesektoren, auch aufgrund der teilweise deutlichen Vergünstigungen für energieintensive Industrien, kaum eine Änderung einstellt, bewirken die höheren Steuersätze im Teilmodell Wohngebäude eine deutliche Minderung des Endenergiebedarfs um 220.704 TJ/a bzw. 11,7%. Die Nutzung von Kohle als Brennstoff wird fast vollständig aufgegeben, was die deutliche Minderung der Staubemissionen erklärt.

## V.3. Multikriterielle Bewertung

### V.3.1. Szenarioanalyse zum Umgang mit Unsicherheiten

Im Bereich der Luftreinhaltung sind Entscheidungsträger mit komplexen Situationen konfrontiert. Emissionsziele können durch Veränderungen der Produktionstechnik, des Produkt-Mixes oder durch den Einsatz von Minderungstechnologien (z. B. Filter) erreicht werden (French und Geldermann (2005)). Entscheidungen im Bereich Emissionsreduktion wirken sich also auf die komplexen und stark vernetzten Systeme Umwelt, Wirtschaft, Bevölkerung und Gesellschaft aus. Die große Komplexität des Entscheidungsprozesses rührt zunächst von den divergierenden Interessen verschiedenster Akteure und Stakeholder, die berücksichtigt werden müssen, her (Petit und van der Werf (2003)). Darüber hinaus sind die Informationen und Modelle, auf denen die Entscheidung beruht, mit unterschiedlich schwerwiegenden Unsicherheiten behaftet (bspw. Unsicherheiten bzgl. der Modellparameter, Modellunsicherheiten etc., vgl. Morgan und Henrion (1990)). Während einige Ursache-Wirkungs-Mechanismen bekannt und gut modellierbar sind (bspw. die Konsequenzen des Einbaus eines Filters), müssen für die Modellierung weiterer Interdependenzen oder Entwicklungen subjektive Experteneinschätzungen eingeholt oder komplexe oder gar unbekannte Wechselwirkungsbeziehungen möglichst sinnvoll abgeschätzt werden (Owens (1996)). Gerade bei großen komplexen Problemen sind die Unsicherheiten häufig so fundamental, dass es nicht möglich ist, sie exakt zu quantifizieren (bspw. mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Mahmoud u. a. (2009)). Während einerseits die Fortsetzung der Grundlagenforschung unerlässlich ist, um Unsicherheiten soweit wie möglich zu reduzieren, müssen viele Entscheidungen auf Basis ihrer *möglichen* und *plausiblen* Folgen bewertet werden (Webster u. a. (2003)).

Szenariobasierte Methoden (Scenario-Based Reasoning, SBR) untersuchen mehrere Entwicklungen der Situation ohne auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen zurückzugreifen. Insbesondere im Bereich der Politik- und Strategiebewertung für die Umweltgesetzgebung liefern Szenarios eine fundierte Diskussionsgrundlage, auf deren Basis die Wahl von Instrumenten erörtert werden kann (Alcamo (2001); Girod u. a. (2009); Scholz und Tietje (2002); Schöpp u. a. (1998)). Da Szenarios in der Regel als leicht verständlich empfunden werden (Mahmoud u. a. (2009); Wright und Goodwin (2009)), entlasten sie Experten und Entscheidungsträger, wenn fundamentale, nicht quantifizierbare Unsicherheiten vorherrschen.

Handlungsalternativen werden im SBR unter mehreren möglichen Entwicklungen der Situation (d. h. Szenarios) bewertet. Daher rückt die *Robustheit* von Alternativen in den Mittelpunkt. Es wird nicht nach einer Alternative gesucht, die optimal für ein Szenario ist, sondern vielmehr wird die Alternative empfohlen, die unter verschiedenen Annahmen hinreichend gut bewertet wird (Comes u. a. (2010a,b)).

Um die Szenarios zu entwickeln, wurden im otello-Projekt zunächst verschiedene Faktoren, die einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der künftigen Entwicklung haben, identifiziert. Dabei wird – in Anlehnung an die Verwendung von Szenarios im Bereich der strategischen Unternehmensplanung – zwischen *internen* und *externen* Faktoren unterschieden (vgl. Coates (2000); Gausemeier u. a. (1998)). Während die Wahl von Instrumenten vom Entscheidungsträger bestimmt und kontrolliert werden kann, gibt es unsichere Variablen, die sich dem Einfluss der Entscheidungsträger entziehen (z. B. die demographische Entwicklung).

Die *Instrumente* sind weiterhin charakterisiert durch

- *Typ*: Art des eingesetzten Instruments, bspw. Einführung von Grenzwerten oder Steuern,
- *Ziel*: Schadstoff, auf dessen Reduktion das Instrument abzielt.
- *Zeitpunkt* der Einführung (und ggf. Dauer des Einsatzes) eines Instruments.

- *Ausgestaltung*: umfasst verschiedene Parameter, bspw. Modus der Vergabe von Zertifikaten, Höhe von Steuern etc.

Aufgrund der Vielfalt an Ausgestaltungsmöglichkeiten können nicht alle Instrumente (und alle Instrumentenbündel) einzeln bewertet werden. Daher wurden verschiedene, besonders relevante oder vielversprechende Instrumente zu Strategien gebündelt. Eine Strategie spezifiziert jeweils, welche Instrumente wann und in welcher Ausgestaltung eingesetzt werden. Tabelle V.3.1 fasst die betrachteten Strategien für den Bereich Industrie exemplarisch zusammen (vgl. auch Kapitel II.5).

Tab. V.3.1.: Beispielhafte Darstellung der untersuchten Instrumente im Bereich Industrie

Instrument	Ziel	Zeitpunkt	Ausgestaltung
Basis	alle	sofort	aktuelle Gesetzgebung
Zertifikatehandel	CO <sub>2</sub>	2012	10 EUR/t 50 EUR/t 100 EUR/t
	NO <sub>x</sub>	2012	1.000 EUR/t 10.000 EUR/t 20.000 EUR/t
	SO <sub>2</sub>	2012	1.000 EUR/t 5.000 EUR/t 10.000 EUR/t
Verschärfung BImSchG	NO <sub>x</sub>	2012	25 % 50 % 75 %
	SO <sub>2</sub>	2012	25 % 50 % 75 %
	Staub	2012	25 % 50 % 75 %
Ökosteuer	-	2012	Angleichung 200 % 500 %

Analog werden die externen Faktoren zu *storylines* gebündelt, die verschiedene mögliche und konsistente Entwicklungen der sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen beschreiben.

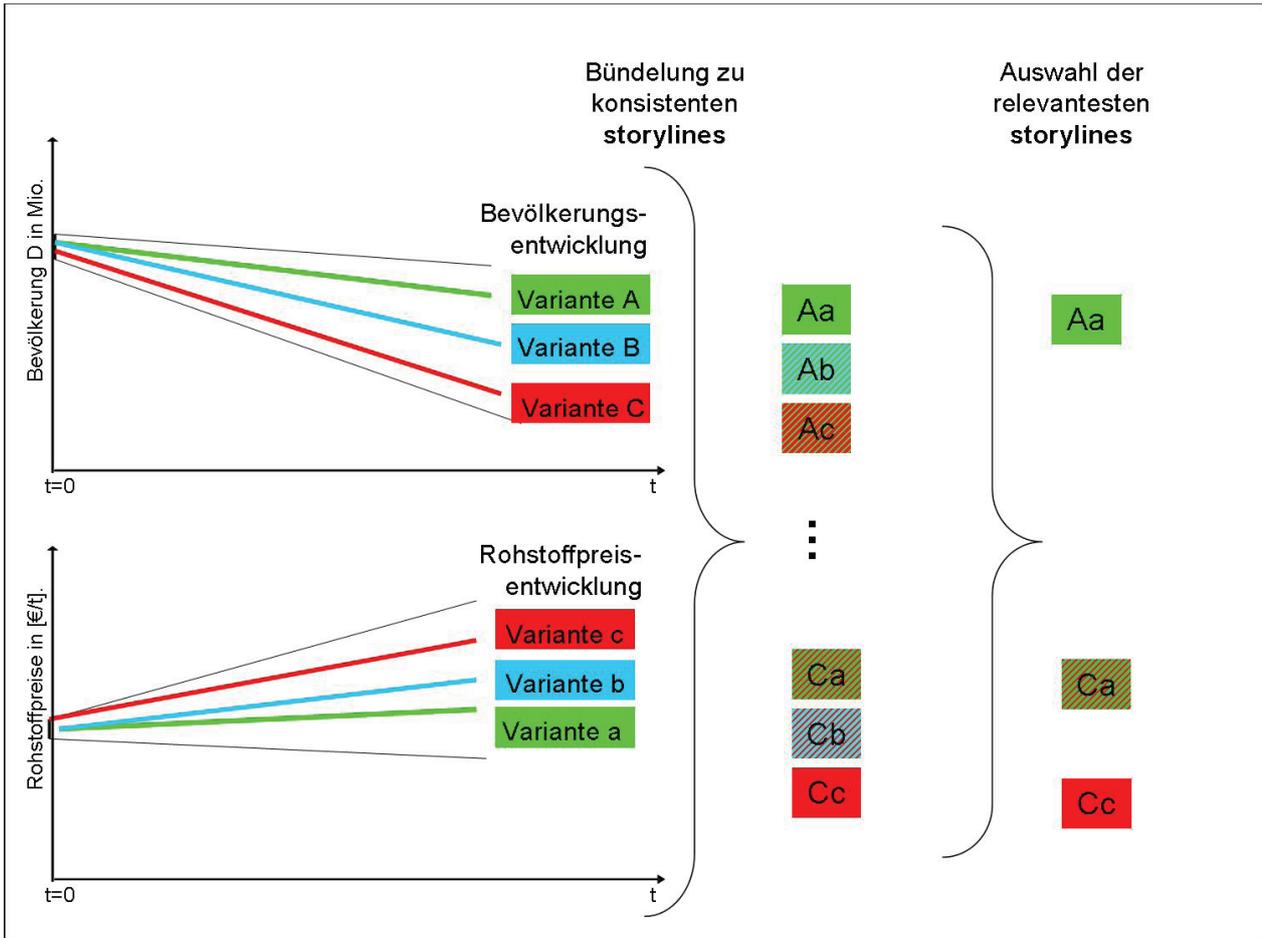


Abb. V.3.1.: Erstellung von relevanten konsistenten Storylines durch Variation der Einflussfaktoren

Im nächsten Schritt werden die Konsequenzen für verschiedene Kombinationen von Strategien und Storylines in Modelldurchläufen bestimmt. Auf diese Weise werden Szenarios, die (mögliche) Entwicklungen im Zeitraum bis 2030 beschreiben, generiert.

Diese Szenarios bilden die Grundlage der Entscheidungsunterstützung (vgl. Abschnitt V.3.2).

Erklärtes Ziel des Entscheidungsunterstützungssystems ist es, die Szenarien auszuwerten, um eine Entscheidung auf Basis einer umfassenden Analyse der Situation fällen zu können.

### V.3.2. Entscheidungsunterstützung

Die Wahl von Strategien zur Verbesserung der Luftqualität ist ein komplexes Problem, da die gewählte Strategie sich auf die komplexen und stark vernetzten Systeme Umwelt, Wirtschaft, Bevölkerung und Gesellschaft auswirkt (Kiker u. a. (2005)). Zudem sind kurz-, mittel- und langfristige Konsequenzen und Wirkungen, die möglicherweise erst verzögert auftreten, zu berücksichtigen. Dies betrifft einerseits die zeitverzögerte Umsetzung verschiedener Maßnahmen, aber auch Verzögerungseffekte von der Deposition (bzw. ihrer Verringerung) bis zur Wirkung auf das Ökosystem (Sverdrup u. a. (2005)).

Der in Abschnitt V.3.1 vorgestellte Ansatz, Szenarios zur Entscheidungsunterstützung bei Unsicherheit einzusetzen, bietet keine inhärente Möglichkeit, Instrumente unter verschiedenen Gesichtspunkten (bspw. ökologische, ökonomische und soziale Faktoren) zu bewerten. Um es den Entscheidungsträgern zu ermöglichen, mehrere Ziele in transparenter Art und Weise zu berücksichtigen, können Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (*Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA*) eingesetzt werden (Belton und Stewart (2002)).

Da in otello nur eine kleine Menge möglicher Strategien simuliert wurde, werden zur multikriteriellen Bewertung Techniken der Multiattributen Entscheidungsanalyse (*Multi-Attribute Decision Making, MADM*) eingesetzt. Weiterhin werden auftretende Unsicherheiten durch Szenarios erfasst. Die Strategien werden daher nicht mit der probabilistischen *Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)*, sondern mit Techniken der Nutzwertanalyse (*Multi-Attribute Value Theory (MAVT)*) bewertet. Dazu wird üblicherweise zusammen mit den involvierten Experten und Entscheidungsträgern eine Hierarchie entwickelt. Diese Hierarchie stellt dar, wie das strategische Gesamtziel in verschiedene Kriterien gegliedert werden kann, die sich auf der untersten Ebene aus verschiedenen messbaren Attributen zusammensetzen. Da in otello aber nur bestimmte Nachhaltigkeitsindikatoren berechnet und ausgewertet werden können, bestimmt sich die Zielhierarchie maßgeblich aus den verfügbaren Daten. Die nachfolgenden Tabellen stellen die Zielhierarchien für die Bereiche In-

dustrie & Energieversorgung (Tabelle V.3.2) und Wohngebäude (Tabelle V.3.3) dar.

Nach der Strukturierung des Problems werden die Präferenzen der Entscheidungsträger ermittelt. Dabei wird die relative Bedeutung der Kriterien durch Gewichte modelliert (*inter-kriterielle Präferenzen*). Die Wichtigkeit, einen Wert möglichst nahe beim bestmöglichen Wert (über alle Szenarios) zu erreichen, wird durch Nutzwertfunktionen modelliert (*intra-kriterielle Präferenzen*). Die Nutzwertfunktionen erlauben es außerdem, Vergleiche zwischen den Attributen, die auf verschiedenen Skalen gemessen werden und entsprechend unterschiedliche Wertbereiche annehmen, anzustellen. Auf diese Weise können die einzelnen Strategien für die jeweiligen Bereiche bewertet werden. Diese Ergebnisse erlauben bereits Rückschlüsse auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Strategien in verschiedenen Situationen. Um zu vermeiden, dass sich die Entscheidung nur auf wenige Szenarios stützt, kann die Aggregation zu einem Gesamtergebnis wertvolle Unterstützung liefern.

### **V.3.3. Exemplarische Ergebnisse**

Am Beispiel des Teilmodells Industrie & Energieversorgung wird eine mögliche Darstellung der Ergebnisse aus der multikriteriellen Bewertung aufgezeigt (Abbildung V.3.2).

Die Abbildung zeigt die Ergebnisse des Sektors Zement aggregiert zu einer Maßzahl. Dabei wurden neben den Emissionen der Schadstoffe CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub> das Produktionsniveau sowie der Verkaufspreis für Zement in die Bewertung einbezogen. Die vier Emissionswerte wurden zunächst gleichgewichtet zu einem ökologischen Indikator, ebenso die beiden übrigen Kriterien zu einem ökonomischen Indikator zusammen gefasst. Diese beiden Indikatoren sind in einem Verhältnis von 1:2 in die Gesamtbewertung eingeflossen.

Aufgrund der höheren Gewichtung des ökonomischen Indikators beeinflusst dieser die Gesamtbewertung sehr stark. Dabei zeigen sich bei den beiden ökonomischen Kriterien kaum Unterschiede in den verschiedenen Szenarios. Lediglich

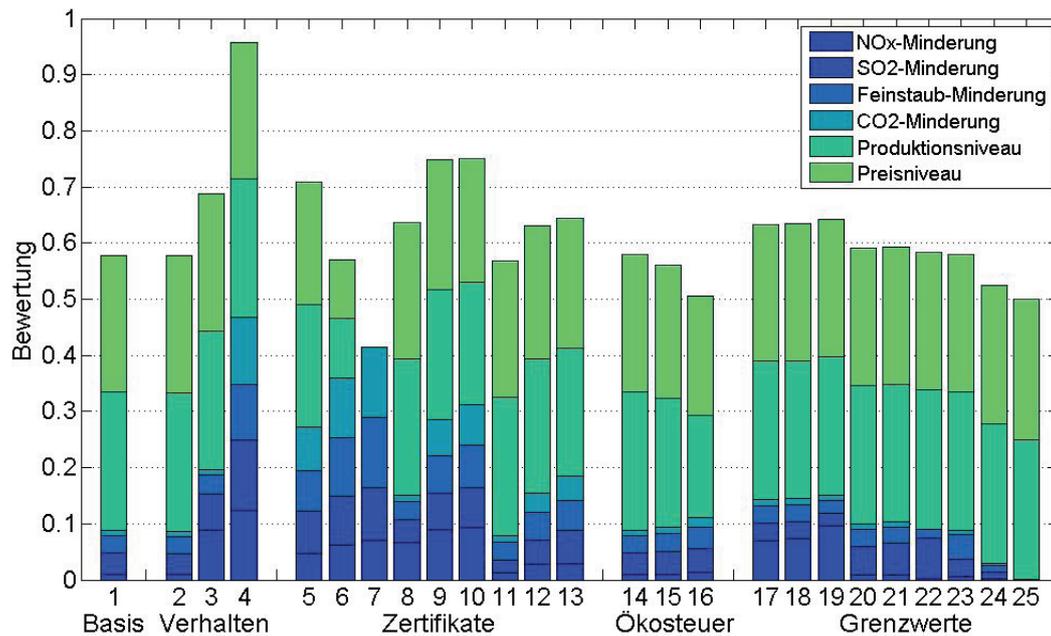


Abb. V.3.2.: Bewertung der Läufe für die Zementindustrie

die Szenarios 5-7, in denen 2012 CO<sub>2</sub>-Zertifikate zu den Preisen 10 EUR/t CO<sub>2</sub>, 50 EUR/t CO<sub>2</sub> und 100 EUR/t CO<sub>2</sub> eingeführt werden, weichen deutlich ab. Zwar erreicht Szenario 7 die höchsten Minderungen, schneidet dennoch in der Gesamtwertung schlecht ab, da die Einführung der sehr teuren Zertifikate zu einem deutlichen Produktionsrückgang und Preisanstieg führt. Dies zeigt, wie wichtig eine Abschätzung der Präferenzen des Nutzers bei der Bewertung der Kriterien ist. Das Szenario 4, in dem rein ökologisches Verhalten der Kunden unterstellt wird, schneidet bei den gegebenen Gewichtungen am besten ab, da die Emissionen vergleichsweise stark gemindert werden und der Preis sowie das Produktionsniveau gegenüber teuren CO<sub>2</sub>-Zertifikaten auf einem deutlich niedrigeren bzw. höheren Niveau bleiben.

Tab. V.3.2.: Zielhierarchie zur Nachhaltigkeitsbewertung von Strategien zur Luftreinhaltung im Bereich Industrie & Energieversorgung

Attribute	Subkriterien	Kriterien
spez. Energieverbrauch Stahlsektor		
Klinkerfaktor (Zement)	Ressourcenschonung	
Anteil fossile Brennstoffe Strom		
Anteil Kernenergie		
Primärenergieverbrauch pro Jahr		Generationen- gerechtigkeit
CO <sub>2</sub> -Emissionen Kraftwerke	THG-Emissionen	
CO <sub>2</sub> -Emissionen Stahlwerke		
CO <sub>2</sub> -Emissionen Zementwerke		
Anteil Sekundärbrennstoffe Zement	Erneuerbare Rohstoffe	
Anteil erneuerbare Energien Strom		
Investitionen Energieeffizienz	Wirtschaftliche	
Investitionen Emissionsminderung	Zukunftsvorsorge	
BIP	Wirtschaftlicher	
Verbraucherpreisindex	Wohlstand	
NO <sub>x</sub> -Emissionen	Luftqualität	Lebensqualität
SO <sub>2</sub> -Emissionen		
PM-Emissionen		

Tab. V.3.3.: Zielhierarchie zur Nachhaltigkeitsbewertung von Strategien zur Luftreinhaltung im Bereich Wohngebäude

Attribute	Subsubkriterien	Subkriterien	Kriterien
Energetische Vollsanierrungsrate	Energieeffizienz		
Energetische Anlagentechniksanierungsrate			
Flächenspez. Endenergiebedarf			
Gesamtenergiebedarf	Rohstoffeinsatz	Ressourcenschonung	Generationengerechtigkeit
Dämmstoffeinsatz Sanierung			
Fenster Sanierung			
Anlagentechnik Sanierung			
Dämmstoffeinsatz Neubau			
Fenster Neubau			
Anlagentechnik Neubau			
Endenergiebedarf Gas	Fossile Brennstoffe		
Endenergiebedarf Öl			
Endenergiebedarf Elektrizität			
Endenergiebedarf Braunkohle			
Endenergiebedarf Steinkohle			
Endenergiebedarf Fernwärme			
CO <sub>2</sub> -Emissionen		THG-Emissionen	
CH <sub>4</sub> -Emissionen			
Endenergiebedarf Erneuerbare		Erneuerbare	
Anteil Erneuerbare am Bedarf			
Aufwendungen Förderung Hülle		Staatsverschuldung	
Aufwendungen Förderung Anlagentechnik			
Durchschnitt Förderung Hülle			
Durchschnitt Förderung Anlagentechnik			
Energieeffizienzinvestitionen Sanierung		Energieeffizienzinvestitionen	
Energieeffizienzinvestitionen Neubau			
Auszahlungen energ. Modernisierung		Luftqualität	Lebensqualität
NO <sub>x</sub> -Emissionen			
SO <sub>2</sub> -Emissionen			
NMVOC-Emissionen			
PM-Emissionen			



## V.4. Zusammenfassung und Ausblick zu Teil V

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zahlreiche der bestehenden Wechselwirkungen durch das Modell abgebildet werden. Die Verknüpfung der drei Teilmodelle durch das makroökonomische Rahmenmodell ermöglicht eine Quantifizierung von Effekten sowohl ausgehend von der Industrie insbesondere durch Preisimpulse als auch ausgehend von den Teilmodellen Wohngebäude und Verkehr als Nachfrager von Energieträgern. Die Effekte sind in ihren quantitativen Ausmaßen nur gering, was jedoch auch darauf zurück zu führen ist, dass bisher nur wenige Industriesektoren abgebildet sind. Insbesondere im Bereich der Energieversorgung sind die Sektoren der Mineralölindustrie, Gasversorgung und Wärmeversorgung inkl. Fernwärme von Interesse und mit weiteren Schnittstellen verbunden. Die Abbildung kleiner dezentraler Anlagen zur Stromerzeugung etwa durch Photovoltaik kann durch eine enge Verbindung zwischen den privaten Haushalten aus dem Teilmodell Wohngebäude und dem Energiesektor des Teilmodells Industrie & Energieversorgung gelöst werden.

Weitere interessante Schnittstellen stellen sich im Bereich Bauwesen und Fahrzeugbau, da dort einerseits diffuse Emissionen zu erwarten sind (Staub im Bauwesen und Lösemittelverwendung im Fahrzeugbau), andererseits die Nachfrage beider Bereiche von den Teilmodellen Wohngebäude (Wohnungsbau) und Verkehr (Straßenbau, Erneuerung der Fahrzeugflotte) abgebildet ist.



## V.5. Literatur zu Teil V

- [Alcamo 2001] ALCAMO, Joseph: *Scenarios as tools for international environmental assessments*. Bd. 24. Copenhagen : European Environmental Agency, 2001
- [Belton und Stewart 2002] BELTON, Valerie ; STEWART, Theodor: *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002
- [Coates 2000] COATES, Joseph F.: Scenario Planning. In: *Technological Forecasting and Social Change* 65 (2000), Nr. 1, S. 115–123
- [Comes u. a. 2010a] COMES, Tina ; HIETE, Michael ; SCHULTMANN, Frank: A decision support system for multi-criteria decision problems under severe uncertainty in longer-term emergency management. In: ANTUNES, Carlos H. (Hrsg.) ; RÍOS INSUA, David (Hrsg.): *Proceedings of the 25th Mini EURO Conference on Uncertainty and Robustness in Planning and Decision Making*. Coimbra, 2010
- [Comes u. a. 2010b] COMES, Tina ; HIETE, Michael ; WIJNGAARDS, Niek ; SCHULTMANN, Frank: Enhancing Robustness in Multi-Criteria Decision-Making: A Scenario-Based Approach. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, 2010
- [French und Geldermann 2005] FRENCH, Simon ; GELDERMANN, Jutta: The varied contexts of environmental decision problems and their implications for decision support. In: *Environmental Science & Policy* 8 (2005), Nr. 4, S. 378–391

- [Gausemeier u. a. 1998] GAUSEMEIER, Juergen ; FINK, Alexander ; SCHLAKE, Oliver: Scenario Management: An Approach to Develop Future Potentials. In: *Technological Forecasting and Social Change* 59 (1998), Nr. 2, S. 111–130. – ISSN 0040-1625
- [Girod u. a. 2009] GIROD, Bastien ; WIEK, Arnim ; MIEG, Harald ; HULME, Mike: The evolution of the IPCC's emissions scenarios. In: *Environmental Science & Policy* 12 (2009), Nr. 2, S. 103–118
- [Kiker u. a. 2005] KIKER, Gregory A. ; BRIDGES, Todd S. ; VARGHESE, Arun ; SEAGER, Thomas P. ; LINKOV, Igor: Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. In: *Integrated Environmental Assessment and Management* 1 (2005), Nr. 2, S. 95–108
- [Mahmoud u. a. 2009] MAHMOUD, Mohammed ; LIU, Yuqiong ; HARTMANN, Holly ; STEWART, Steven ; WAGENER, Thorsten ; SEMMENS, Darius ; STEWART, Robert ; GUPTA, Hoshin ; DOMINGUEZ, Damian ; DOMINGUEZ, Francina ; HULSE, David ; LETCHER, Rebecca ; RASHLEIGH, Brenda ; SMITH, Court ; STREET, Roger ; TICEHURST, Jenifer ; TWERY, Mark ; VAN DELDEN, Hedwig ; WALDICK, Ruth ; WHITE, Denis ; WINTER, Larry: A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. In: *Environmental Modelling & Software* 24 (2009), Nr. 7, S. 798–808
- [Morgan und Henrion 1990] MORGAN, Millet G. ; HENRION, Max: *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990
- [Owens 1996] OWENS, J.: LCA impact assessment categories. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 1 (1996), S. 151–158. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF02978944>. – 10.1007/BF02978944. – ISSN 0948-3349

- [Petit und van der Werf 2003] PETIT, Jean ; VAN DER WERF, Hayo M.: Perception of the environmental impacts of current and alternative modes of pig production by stakeholder groups. In: *Journal of Environmental Management* 68 (2003), Nr. 4, S. 377–386
- [Scholz und Tietje 2002] SCHOLZ, Roland W. (Hrsg.) ; TIETJE, Olaf (Hrsg.): *Embedded Case Study Methods. Integrating Quantitative and Qualitative Knowledge*. Thousand Oaks : Sage Publications, 2002
- [Schöpp u. a. 1998] SCHÖPP, Wolfgang ; AMANN, Markus ; COFALA, Janusz ; HEYES, Chris ; KLIMONT, Zbigniew: Integrated assessment of European air pollution emission control strategies. In: *Environmental Modelling and Software* 14 (1998), Nr. 1, S. 1–9. – ISSN 1364-8152
- [Sverdrup u. a. 2005] SVERDRUP, Harald ; MARTINSON, Liisa ; ALVETEG, Mattias ; MOLDAN, Filip ; KRONNÄS, Veronika ; MUNTHE, John: Modeling Recovery of Swedish Ecosystems from Acidification. In: *Ambio* 34 (2005), Nr. 1, S. 25–31
- [Webster u. a. 2003] WEBSTER, Mort ; FOREST, Chris ; REILLY, John ; BABIKER, Mustafa ; KICKLIGHTER, David ; MAYER, Monika ; PRINN, Ronald ; SAROFIM, Marcus ; SOKOLOV, Andrei ; STONE, Peter ; WANG, Chien: Uncertainty Analysis of Climate Change and Policy Response. In: *Climatic Change* 61 (2003), Nr. 3, S. 295–320
- [Wright und Goodwin 2009] WRIGHT, George ; GOODWIN, Paul: Decision making and planning under low levels of predictability: Enhancing the scenario method. In: *International Journal of Forecasting* 25 (2009), Nr. 4, S. 813–825



## **Teil VI.**

# **Zusammenfassung und Ausblick**



## VI.1. Zusammenfassung

Trotz großer Erfolge der Luftreinhaltepolitik der vergangenen Jahrzehnte führen Emissionen klassischer Luftschadstoffe wie Schwefeloxide, Stickoxide, Feinstaub und flüchtige organische Verbindungen nach wie vor zu beträchtlichen Gesundheits- und Umweltschäden in Deutschland und seinen Nachbarstaaten. Zudem steigen die Emissionen einzelner Luftschadstoffe aufgrund aktueller Entwicklungen wie des zunehmenden Einsatzes von Holz in Kleinfeuerungsanlagen erneut an. Für die Luftreinhaltepolitik gestaltet sich die Erschließung weiterer Minderungspotentiale zunehmend anspruchsvoll. So sind bspw. leicht und kosteneffektiv realisierbare Minderungspotentiale, z. B. in großen Punktquellen, weitgehend ausgeschöpft, so dass eine Vielzahl kleinerer, häufig auch flächenhafter Quellen an Bedeutung gewinnen. Wechselwirkungen zwischen Luftreinhalte- und Klimaschutzpolitik sind einzubeziehen, nicht-technische (bspw. marktbasierter oder auf die Änderung des Konsumverhaltens abzielende) Maßnahmen haben an Bedeutung gewonnen, und angesichts der Globalisierung von Märkten sollen negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit minimiert werden.

Auf internationaler Ebene werden seit langem vergleichsweise stark aggregierte Integrated Assessment Modelle (IAMs) zur Ableitung und Bewertung von Strategien zur Luftreinhaltung eingesetzt. Für die Ableitung nationaler Emissionshöchstmengen des UNECE Multieffektprotokolls und der EU Direktive zu nationalen Emissionshöchstmengen (NEC) wurde bspw. auf Ergebnisse der IAMs RAINS/GAINS (Regional Air Pollution Information and Simulation bzw. Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies) von IIASA zurückgegriffen. Als Optimiermodell bestimmt RAINS/GAINS eine kostenminimale Kombination von Maßnahmen zur Erzielung einer gewünschten

Emissionsreduktion für exogen vorgegebene ökonomische Aktivitätsraten. Anschließend werden die damit verbundenen Minderungskosten und nachgelagert die Immissionssituation und Gesundheits- und Umweltschäden analysiert. Bei den nationalen IAM in der EU, die sich im Netzwerk NIAM (Network for Integrated Assessment Modelling) zusammengeschlossen haben, dominieren nationale Adaptionen von RAINS/GAINS, die vornehmlich eingesetzt werden, Ergebnisse von RAINS/GAINS zu kontrollieren und auf die nationale Ebene herunterzuberechnen.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes otello („Entwicklung eines integrierten, optimierenden Bewertungs- und Allokationsmodells für ein nationales Emissionsmanagement“) wurde ein IAM für Deutschland mit dem Ziel entwickelt, nationalen Umweltbehörden Entscheidungsunterstützung bei der Ableitung von Luftreinhaltestrategien und speziell der Einhaltung der nationalen Emissionshöchstmengen zu geben. Statt eines Optimieransatzes wie in RAINS/GAINS wurde hierfür ein Simulationsansatz gewählt, da dieser die dynamische Entwicklung der Emissionen und komplexen Wechselwirkungen im System besser zu berücksichtigen vermag und sich auch die Diffusion neuer Technologien abbilden lässt. So kann der Nutzer die komplexen Auswirkungen verschiedener umweltpolitischer Instrumente simulieren und anschließend die Instrumente hinsichtlich verschiedener Kriterien der Nachhaltigkeit bewerten.

Das otello-Modellsystem setzt sich aus drei Bereichsmodellen für Energieversorgung und Industrie, Wohngebäude und Verkehr und einem übergeordneten makroökonomischen Input-Output-Modell (IOM) zusammen. Ergänzt werden diese um ein Modul zur Auswahl bzw. Definition von Szenarios sowie ein Auswertungsmodul zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung.

Das IOM simuliert makroökonomische Parameter und stellt über die Aktivitäten den wirtschaftlichen Rahmen für die Bereichsmodelle dar. Hierfür bildet es auf Basis der IO-Tabellen des Statistischen Bundesamts alle Lieferverflechtungen der deutschen Volkswirtschaft untergliedert in 65 Produktionsbereiche ab. Während die staatlichen Anteile an der Endnachfrage, der staatliche Konsum und staatli-

---

che Investitionen sowie Exporte exogen vorgegeben werden, bildet der über ein „linear-expenditure-model“ abgebildete Konsum der privaten Haushalte die treibende Kraft im Modell. Aus den Ausgabeparametern können Indikatoren wie das BIP, der Primärenergieverbrauch und die Beschäftigtenzahlen abgeleitet werden.

Die implementierten Bereiche Energieversorgung und Industrie (Stahl- und Zementindustrie), Wohngebäude und Verkehr basieren auf technisch-fundierten Abbildungen der Aktivitäten und folgen bottom-up-Ansätzen. Sie umfassen zusammen 73% der CO<sub>2</sub>, 75% der NO<sub>x</sub>, 60% der SO<sub>2</sub> und 45% der Feinstaubemissionen in Deutschland. Berücksichtigt sind sowohl technische (end-of-pipe und prozessintegrierte) als auch nicht-technische Maßnahmen zur Emissionsreduktion bzw. Verhaltenssteuerung.

Im Bereich Industrie & Energieversorgung sind die Produktionsbereiche Elektrizitätsversorgung, Eisen- und Stahlindustrie sowie Zementindustrie mit Hilfe von mehrstufigen Referenzprozessen abgebildet. Einzelne Betriebe werden als eigenständige Akteure simuliert. Die Entscheidung über die Implementierung von Maßnahmen zur Emissionsminderung basiert auf einer statischen Investitionsrechnung. Instrumente zur Emissionsreduktion werden direkt über Kosten oder indirekt über Preise und Nachfragesignale abgebildet und die Grenzwerteinhaltung über ökonomische Strafterme.

Im Bereich Wohngebäude wird der Wohngebäudebestand auf Basis einer nach Gebäudetyp, Baualtersklasse, Sanierungsvariante der Gebäudehülle und Variante der Anlagentechnik differenzierenden Gebäudetypologie bis auf die kommunale Ebene simuliert. Entscheidungen der Eigentümer hinsichtlich der energetischen Verbesserung von Gebäudehülle und Anlagentechnik (Heizung und Warmwasserbereitung) werden für verschiedene Typen von Eigentümern modelliert. Diese Entscheidungen werden durch verschiedene umweltpolitische Instrumente beeinflusst, wie bspw. durch die Veränderung der mit der Annuitätenmethode quantifizierten Wirtschaftlichkeit oder der „Legalität“ unterschiedlicher Sanierungsvarianten.

Der Bereich Verkehr wird durch das eigenständige System-Dynamics-Modell ASTRA mit integriertem Fahrzeugflottenmodell abgebildet. In einer detaillierten

Technologiedatenbank sind Emissionseinsparpotentiale einzelner technischer Maßnahmen abhängig von der Beförderungsart hinterlegt, aus denen Emissionsminderungskurven für das ASTRA Modell generiert werden. Hierfür werden verschiedene unabhängige Maßnahmen und Instrumentenbündel definiert und priorisiert.

Für alle drei Teilbereichsmodelle wurden neben Basisszenarios, die die aktuelle Gesetzgebung abbilden, Szenarios entwickelt, um die Implementierung alternativer Strategien zur Luftreinhaltung zu analysieren. Dabei zeigte sich die Vorteilhaftigkeit des gewählten Simulationsansatzes, da es häufig zu komplexen Wirkmechanismen mit unerwünschten Folgen wie z. B. Rebound-Effekten bei einzelnen Instrumenten im Bereich Verkehr und teilweise starken Preissteigerungen bei Stahl kam. In bereichsübergreifenden Simulationen konnten zudem die Wechselwirkungen zwischen den Bereichen simuliert werden.

Grundsätzlich zeigen die Modellergebnisse ein sehr differenziertes Bild. So können Emissionsreduktionen in einem Unterbereich durch Zuwächse in einem anderen überkompensiert werden, z. B. bei den Beförderungsarten im Verkehrsbereich, und das Instrument Emissionshandel führt für verschiedene Schadstoffe zu stark unterschiedlichen Reaktionen in den einzelnen Industriesektoren. Insgesamt ist im Basisszenario bei  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  eine deutliche Emissionsminderung festzustellen, während die Emissionen von  $\text{CO}_2$  und  $\text{PM}_{10}$  auf ähnlichem Niveau verbleiben bzw. nur geringfügig sinken.

Im Bereich Energieversorgung und Industrie zeigt sich, dass die Verschärfung einzelner Grenzwerte tendenziell zur Implementierung sekundärer Minderungsmaßnahmen führt, während bei Emissionshandelssystemen Schadstoff-Synergieffekte auftreten können. Im Zementsektor werden die  $\text{SO}_2$ -Emissionen bspw. bereits umfassend durch den  $\text{CO}_2$ -Zertifikatehandel gemindert. Die Ökosteuer zeigt in den betrachteten Sektoren eine deutlich geringere Wirkung, da sie einen kleineren Kostenfaktor darstellt als der Zertifikatehandel. Der Stahlsektor reagiert auf weitergehende Instrumente nur gering, da bereits im Basisszenario umfangreiche Investitionen zur Emissionsminderung getätigt werden.

---

Im Bereich Wohngebäude führen die langen Sanierungszyklen von Gebäuden zu einer geringen Dynamik. Entsprechend ist ein wesentlicher Hebel zur Emissionsminderung die Erhöhung der Sanierungsrate. Eine reine Verschärfung der ordnungspolitischen Instrumente ohne vollständige Durchsetzungskontrolle wird als ineffektiv identifiziert, während eine gleichzeitige Verschärfung der ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und des Vollzugs die höchsten Emissionsreduktionen bei nur geringfügig erhöhten kumulierten Gesamtausgaben ergibt. Klimaschutz und Luftreinhaltung stehen teilweise im Widerspruch, da der Umstieg auf den Brennstoff Holz in Kleinf Feuerungsanlagen die Emissionen, vor allem von Feinstaub, stark ansteigen lässt.

Im Bereich Verkehr führen die gewählten Instrumentenbündel der Preispolitik, u. a. Einführung km-bezogener Straßenbenutzungsgebühren, Streichung der Entfernungspauschale, stärkere Besteuerung von Kraftstoffen bei Flugzeugen und Schiffen, Einfahrtgebühren für Großstädte, Einführung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels in der Luftfahrt, verglichen mit jenen der Regulierungspolitik wie z. B. strengerer Abgasnormen, der Verschärfung von CO<sub>2</sub>-Verpflichtungen für Fahrzeughersteller und ein Tempolimit auf Bundesautobahnen zu stärkeren Reduktionen bei NO<sub>x</sub>, aber geringeren bei CO<sub>2</sub>, CO und VOC. Als bedeutsam wurden Rebound-Effekte identifiziert. So führt eine verschärfte CO<sub>2</sub>-Verpflichtung für Fahrzeughersteller zu einem kostengünstigeren Betrieb, wodurch der Anteil des individuell motorisierten Verkehrs an der gesamten Personenverkehrsleistung ansteigt. Bei der Abgasnorm Euro 6 stehen Klimaschutz und Luftreinhaltung im Widerspruch, da die Emissionsreduktionen bei Luftschadstoffen durch höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen erkaufte werden.

Zusammenfassend wurde mit dem otello-Modellsystem ein nützliches Werkzeug geschaffen, um einzelne Instrumente bzw. Kombinationen von Instrumenten auf ihre komplexen Wirkungen hin zu untersuchen und abschließend unter verschiedenen Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit sowie unter Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik zu bewerten. Auf diese Weise werden Entscheidungsträger bei der Auswahl geeigneter Strategien zur Luftreinhaltung unterstützt.



## VI.2. Ausblick

Im Ausblick ergeben sich für das otello-Modellsystem verschiedene Möglichkeiten der Erweiterung. So kann der verfolgte Ansatz in allen Bereichsmodellen weiter verfeinert und erweitert werden. Exemplarisch sei die Definition weiterer Entscheidertypen im Teilbereichsmodell Wohngebäude genannt. Im Bereich Industrie können weitere Sektoren abgebildet werden. Für den Luftschadstoff VOC ist bspw. die Lösemittelanwendung von zentraler Bedeutung. Daneben wäre der Bereich Landwirtschaft für die Emissionen von  $\text{NH}_3$  und für Lachgas von Interesse. Die Verbesserung der zugrunde liegenden Datenbasis ist eine dauerhafte Aufgabe. Von hohem Interesse ist zudem die Anbindung eines Ausbreitungsmodells, da das otello-Modellsystem im Vergleich zu anderen IAM bereits die Energieversorgung und Industrie als Punktquellen und die Emissionen im Bereich Wohngebäude auf Ebene der Kommunen räumlich differenziert abbildet. Dadurch könnten den Emissionen Immissionen zugeordnet werden, wodurch auch regionale Unterschiede bei Brennstoffen für Kleinfeuerungen und räumlich differenzierende Instrumente abgebildet werden könnten, z. B. Verbote für Holzfeuerungen in Ballungszentren.



## A. Abbildungsverzeichnis

I.2.1	Minderung der Gesamtemissionen in Deutschland bezogen auf das Jahr 1990 . . . . .	8
I.2.2	Anteile einzelner Quellkategorien an den Industrieemissionen (Jahr 2008) . . . . .	10
I.2.3	Rechtlicher Rahmen der Umweltgesetzgebung im Bereich Luftreinhaltung und Klimaschutz . . . . .	14
I.4.1	Struktur des otello-Modellsystems . . . . .	26
II.2.1	Übersicht über die Modellstruktur des Teilmodells Industrie .	52
II.3.1	Grundschemata einer IO-Tabelle . . . . .	89
II.3.2	Schematische Darstellung der verwendeten IO-Tabelle . . . .	101
II.4.1	Schematische Darstellung der Referenzprozessfolge im Zementsektor . . . . .	129
II.4.2	Schematische Darstellung der Referenzprozessfolgen im Stahlsektor . . . . .	141
II.6.1	Entwicklung makroökonomischer Kenngrößen im Basisszenario . . . . .	175
II.6.2	Entwicklung der sektorspezifischen Vorgaben im Basisszenario: a) Produktionswerte in Mio. EUR, b) Preisindizes (2001=1), c) Produktionsindizes (2001=1) . . . . .	176
II.6.3	Verlauf der a) Emissionen und b) Emissionsfaktoren im Zementsektor im Basisszenario . . . . .	178

II.6.4	Verlauf des a) Klinkerfaktors und des b) Einsatzes der Sekundärbrennstoffe im Zementsektor im Basisszenario . . . . .	178
II.6.5	Verlauf der a) Emissionen und b) Emissionsfaktoren im Stahlsektor im Basisszenario (RS=Rohstahl) . . . . .	179
II.6.6	Entwicklung der Produktionsanteile im Basisszenario (RS=Rohstahl) . . . . .	180
II.6.7	Entwicklung des Energieeinsatzes je t Rohstahl (RS) im Basisszenario . . . . .	180
II.6.8	Simulierter Strommix im Basisszenario, unter sonstige Kraftwerkstypen fallen die Industriekraftwerke sowie die mit schwerem und leichtem Heizöl betriebenen Kraftwerke . . . . .	181
II.6.9	Verlauf der a) Emissionen und b) Emissionsfaktoren im Energiesektor im Basisszenario . . . . .	181
II.6.10	Anzahl der implementierten EMM im Energiesektor im Basisszenario . . . . .	182
II.6.11	Anteil der Produktionsmenge der Werke mit den implementierten EMM . . . . .	182
II.6.12	Maximale Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	183
II.6.13	Einfluss der CO <sub>2</sub> -Emissionszertifikate auf die Stückkosten der Sektoren bei einem Preis von 10 EUR/t CO <sub>2</sub> im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	184
II.6.14	Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor durch Einführung von CO <sub>2</sub> -Zertifikaten zu einem Preis von 10 EUR/t CO <sub>2</sub> im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	185
II.6.15	Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor durch Einführung von NO <sub>x</sub> -Zertifikaten zu einem Preis von 10 EUR/kg NO <sub>x</sub> im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	185

---

II.6.16	Minderung der Emissionsfaktoren im Zementsektor durch Einführung von SO <sub>2</sub> -Zertifikaten zu einem Preis von 10 EUR/kg SO <sub>2</sub> im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	185
II.6.17	Minderung des NO <sub>x</sub> -Emissionsfaktors (EF) im Zementsektor bei unterschiedlichen Instrumenten im Vergleich zum Basisszenario (Preis CO <sub>2</sub> -Zertifikate: 10 EUR/t, Preis NO <sub>x</sub> -Zertifikate: 10 EUR/kg) . . . . .	186
II.6.18	Minderung des SO <sub>2</sub> -Emissionsfaktors (EF) im Zementsektor bei unterschiedlichen Instrumenten im Vergleich zum Basisszenario (Preis CO <sub>2</sub> -Zertifikate: 10 EUR/t, Preis SO <sub>2</sub> -Zertifikate: 10 EUR/kg) . . . . .	186
II.6.19	NO <sub>x</sub> -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	189
II.6.20	SO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	189
II.6.21	NO <sub>x</sub> -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Grenzwertverschärfungen im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	190
II.6.22	SO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren bei verschiedenen Grenzwertverschärfungen im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	190
II.6.23	Verlauf der CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren bei verschiedenen CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario . . .	193
II.6.24	Durch fossilthermische Kraftwerke (KW fossil) erzeugter Strom bei verschiedenen CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	194
II.6.25	Bereitgestellter Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) bei verschiedenen CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreisen im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	194
II.6.26	Anzahl der implementierten EMM im Energiesektor bei einem NO <sub>x</sub> -Zertifikatspreis von 20.000 EUR/t . . . . .	195

II.6.27	Anteil der Produktionsmenge mit den implementierten EMM bei einem NO <sub>x</sub> -Zertifikatspreis von 20.000 EUR/t . . . . .	195
II.6.28	Verlauf der NO <sub>x</sub> - und SO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren bei einer NO <sub>x</sub> -Grenzwertverschärfung von 25% im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	196
II.6.29	Anzahl der implementierten EMM im Energiesektor bei einer NO <sub>x</sub> -Grenzwertverschärfung um 25% . . . . .	196
II.6.30	Anteil der Produktionsmenge mit den implementierten EMM bei einer NO <sub>x</sub> -Grenzwertverschärfung um 25% . . . . .	196
III.1.1	Daten mit jährlicher Auflösung, die die Wechselwirkung des Teilmodells Wohngebäude mit den Teilmodellen Input-Output und Konsum charakterisieren (Endenergiepreise brutto inkl. MwSt. und Ökosteuer) . . . . .	230
III.1.2	Abstrahierte Übersicht über das Teilmodell Wohngebäude . .	231
III.2.1	Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtkehrbezirken . . .	271
III.2.2	Typische Altersverteilung für Heizölwärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtkehrbezirken . . .	272
III.2.3	Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtrandkehrbezirken	273
III.2.4	Typische Altersverteilung für Heizölwärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Stadtrandkehrbezirken	273
III.2.5	Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Kleinstadtkehrbezirken	274
III.2.6	Typische Altersverteilung für Heizölwärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Kleinstadtkehrbezirken	275
III.2.7	Typische Altersverteilung für Erdgaswärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Landkehrbezirken . . .	276

---

III.2.8	Typische Altersverteilung für Heizölwärmeerzeuger mit einer Nennleistung von höchstens 25 kW in Landkehrbezirken . . .	276
III.3.1	Zulässige Wechsel der Energieträger (links) und der Zentralität (rechts) der Anlagentechnik im Teilmodell Wohngebäude . .	285
III.5.1	Gegenüberstellung der Wohnflächen des Teilmodells Wohngebäude (otello) im Jahr 2006 und der vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) im Jahr 2007 veröffentlichten Wohnflächen differenziert nach Gebäudetyp (ohne Sonderbauten) und Baualtersklasse . . . . .	298
III.5.2	Gegenüberstellung der Altersverteilung der Gebäudetypen (ohne Sonderbauten) im Teilmodell Wohngebäude (otello) im Jahr 2006 mit den vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) im Jahr 2007 veröffentlichten Daten . . . . .	299
III.5.3	Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Energieträgern differenzierten Endenergiebedarfen der privaten Haushalte in Deutschland für Raumwärme sowie Warmwasser für das Jahr 2006 mit den entsprechenden von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) veröffentlichten Werten . . . . .	301
III.5.4	Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Baualtersklassen (bis 1968) differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH im Jahr 2006 mit den entsprechenden von Weiß et al. veröffentlichten Werten . . . . .	303
III.5.5	Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH der Baualtersklasse 1969-1978 im Jahr 2006 mit dem entsprechenden von Weiß et al. veröffentlichten Wert	303

III.5.6	Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Baualtersklassen (zwischen 1979 und 1994) differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH im Jahr 2006 mit den entsprechenden von Weiß et al. veröffentlichten Werten . . . . .	304
III.5.7	Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten, nach Baualtersklassen (zwischen 1995 und 2006) differenzierten spezifischen Heizwärmebedarfen für RH und EFH im Jahr 2006 mit den entsprechenden von Weiß et al. veröffentlichten Werten . . . . .	304
III.5.8	Im Teilmodell Wohngebäude berechnete spezifische Heizwärmebedarfe für das Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetypen (ohne Sonderbauten in den neuen Bundesländern) und Baualtersklassen . . . . .	305
III.5.9	Im Teilmodell Wohngebäude berechnete spezifische Heizwärmebedarfe der Sonderbauten in den neuen Bundesländern für das Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetypen und Baualtersklassen . . . . .	306
III.5.10	Gegenüberstellung von im Teilmodell Wohngebäude (otello) berechneten direkten verbrennungsbedingten Emissionen an Luftschadstoffen und Treibhausgasen der Wohngebäude in Deutschland im Jahr 2006 mit den vom Umweltbundesamt veröffentlichten Werten . . . . .	308
III.5.11	Gegenüberstellung des im Teilmodell Wohngebäude berechneten Anteils energetisch sanierter Gebäude(hüllen) im Jahr 2006 differenziert nach Gebäudetyp sowie energetisch saniertem Gebäudehüllenelement und der von Diefenbach (Referenz RH-HH) und Kretschmer (Referenz NBL) veröffentlichten Werte . . . . .	309

---

III.5.12	Gegenüberstellung von dem im Teilmodell Wohngebäude prognostizierten Wohnflächenbestand mit der in der Raumordnungsprognose prognostizierten Wohnflächennachfrage und dem vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen Wohnflächenbestand . . . . .	311
III.5.13	Gegenüberstellung des im Teilmodell Wohngebäude prognostizierten Endenergiebedarfs der privaten Haushalte für Raumheizung und Warmwasser in Deutschland mit den vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlichten Werten . . . . .	312
III.6.1	Räumliche Verteilung der Anteile [kWh/kWh] von Gas und Heizöl am Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Wohngebäudebestand in Deutschland für das Jahr 2007 . .	316
III.6.2	Räumliche Verteilung der Anteile [kWh/kWh] von Kohle (Briketts oder Braunkohle, Koks oder Steinkohle) und Fernwärme am Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Wohngebäudebestand in Deutschland für das Jahr 2007 . . .	317
III.6.3	Entwicklung des Endenergiebedarfs der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 differenziert nach Endenergieträgern im Szenario <i>Basis</i> . . . . .	318
III.6.4	Entwicklung der direkten Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 im Szenario <i>Basis</i> . . . . .	319
III.6.5	Direkte gebietsflächenspezifische PM-Emissionen für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung in Wohngebäuden in Deutschland auf Kreisebene im Jahr 2007 und im Jahr 2030 für die Szenarios <i>Strenges Recht</i> und <i>Ökomodernisierer</i> . . .	320
III.6.6	Entwicklung der direkten PM-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios . . . . .	321

III.6.7	Entwicklung der direkten NO <sub>x</sub> -Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios . . . . .	323
III.6.8	Entwicklung der direkten SO <sub>2</sub> -Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios . . . . .	325
III.6.9	Gebietsflächenspezifische SO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland auf Kreisebene im Jahr 2007 und im Jahr 2030 für die Szenarios <i>Strenges Recht</i> und <i>Ökomodernisierer</i> . . . . .	326
III.6.10	Entwicklung der direkten NMVOC-Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios . . . . .	327
III.6.11	Entwicklung der direkten CH <sub>4</sub> -Emissionen der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios . . . . .	329
III.6.12	Entwicklung der direkten CO <sub>2</sub> -Emissionen (inkl. Emissionen durch die Verbrennung von Biomasse) der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser von 2007 bis 2030 in den betrachteten Szenarios . . . . .	331
III.6.13	Anteile der verschiedenen Gebäudehüllenvarianten (m <sup>2</sup> Wohnfläche/m <sup>2</sup> Wohnfläche) an allen seit 2007 sanierten Hüllen von 2007 bis 2030 im Szenario <i>Stufenweises Recht</i> . . . . .	332
III.6.14	Kumulierte Auszahlungen von 2007 bis 2030 für Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie Energie differenziert nach den betrachteten Szenarios . . . . .	333
III.6.15	Kumulierte Auszahlungen von 2007 bis 2030 für Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie Energie differenziert nach Investitionsbestandteilen, Energieträgern und den betrachteten Szenarios . . . . .	333

---

IV.2.1	Entwicklung der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr in Deutschland 1991 bis 2008 nach Verkehrsträgern . . .	352
IV.2.2	Reduktion der Schadstoffklassen nach Wirtschaftssektoren 2007 im Vergleich zu 1997 . . . . .	354
IV.2.3	Variation externer Kosten des Straßenverkehrs nach zentralen Einflussgrößen . . . . .	358
IV.2.4	Vergleich durchschnittlicher externer Kosten im Personenverkehr . . . . .	359
IV.2.5	Vergleich durchschnittlicher externer Kosten im Güterverkehr	360
IV.2.6	CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenziale der Verkehrsträger . . . . .	364
IV.2.7	Prognose der CO <sub>2</sub> -Emissionen schwerer Lkw bis 2020 . . . .	366
IV.3.1	Überblick über die Szenarien im Bereich Verkehr . . . . .	368
IV.3.2	Schema der Einpassung des Verkehrsbereichs in das otello-Gesamtmodell . . . . .	377
IV.4.1	Ergebnisse der Maßnahmen-Datenbank: Reduktionspotenziale nach Verkehrsträgern . . . . .	384
IV.4.2	Ergebnisse der Maßnahmen-Datenbank: Reduktionspotenziale im Schienenverkehr . . . . .	385
IV.5.1	Struktur und Interaktionen des ASTRA-Modells . . . . .	389
IV.5.2	Interdependenzen im makro-ökonomischen Modul von ASTRA (MAC) . . . . .	391
IV.5.3	Abbildung des Verkehrssystems durch Differenzierung von Verkehrsträgern, Fahrtzwecken und Entfernungsbändern in ASTRA . . . . .	398
IV.5.4	Struktur des Personenverkehrsmodells in ASTRA . . . . .	399
IV.5.5	Struktur des Güterverkehrsmodells in ASTRA . . . . .	399
IV.5.6	Simulation der Technologiewahl beim Pkw-Kauf in ASTRA .	402
IV.6.1	Makroökonomische Trends im REF . . . . .	407

---

IV.6.2	Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel im REF . . . . .	409
IV.6.3	Güterverkehrsaufkommen pro Verkehrsmittel im REF . . . . .	409
IV.6.4	Motorisierung und Diffusion alternativer Antriebe im REF . . . . .	411
IV.6.5	Direkte CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel im REF . . . . .	412
IV.6.6	Direkte NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel im REF . . . . .	413
IV.6.7	Direkte CO-Emissionen pro Verkehrsmittel im REF . . . . .	414
IV.6.8	Direkte VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel im REF . . . . .	415
IV.6.9	Veränderung der Personen-km pro Verkehrsmittel in PP1 . . . . .	419
IV.6.10	Veränderung der gefahrenen Personen-km nach Distanzen in PP1 . . . . .	419
IV.6.11	Veränderung der Güterverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP1 . . . . .	421
IV.6.12	Veränderung der Güterverkehrsleistung nach Distanzen in PP1 . . . . .	422
IV.6.13	Veränderung der Pkw-Flotte nach Antriebsart in PP1 . . . . .	423
IV.6.14	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1 . . . . .	424
IV.6.15	Veränderung der NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1 . . . . .	425
IV.6.16	Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1 . . . . .	425
IV.6.17	Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP1 . . . . .	426
IV.6.18	Veränderung der Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP2 . . . . .	428
IV.6.19	Veränderung der Güterverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP2 . . . . .	429
IV.6.20	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2 . . . . .	430
IV.6.21	Veränderung der NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2 . . . . .	431
IV.6.22	Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2 . . . . .	432
IV.6.23	Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP2 . . . . .	432
IV.6.24	Veränderung der Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP3 . . . . .	434
IV.6.25	Veränderung der Güterverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP3 . . . . .	435

---

IV.6.26	Veränderung der Pkw-Flotte nach Kraftstoffart in PP3 . . . . .	436
IV.6.27	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3	437
IV.6.28	Veränderung der NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3	439
IV.6.29	Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3 .	439
IV.6.30	Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP3	440
IV.6.31	Veränderung der Personenverkehrsleistung pro Verkehrsmittel in PP4 . . . . .	442
IV.6.32	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4	443
IV.6.33	Veränderung der NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4	444
IV.6.34	Veränderung der CO-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4 .	445
IV.6.35	Veränderung der VOC-Emissionen pro Verkehrsmittel in PP4	445
V.2.1	Entwicklung der Gesamtemissionen der verschiedenen Szena- rios im Vergleich zum Basisszenario . . . . .	464
V.2.2	Entwicklung der Emissionen aus den Teilmodellen im Basissze- nario . . . . .	466
V.3.1	Erstellung von relevanten konsistenten Storylines durch Varia- tion der Einflussfaktoren . . . . .	474
V.3.2	Bewertung der Läufe für die Zementindustrie . . . . .	477



## B. Tabellenverzeichnis

I.2.1	Berichtete Emissionen der Jahre 1990 und 2008 für die betrachteten Teilbereiche . . . . .	8
I.2.2	Gegenüberstellung der berichteten Emissionen mit den Zielwerten aus der NEC-Richtlinie bzw. dem Minderungsziel im Rahmen der EU-Lastenverteilung . . . . .	17
II.1.1	Anteile der abgebildeten Sektoren an den Gesamtemissionen im Jahr 2008 . . . . .	46
II.4.1	Anlagentypen im Zementsektor und charakteristische Kenngrößen . . . . .	130
II.4.2	Emissionsminderungsmaßnahmen im Zementsektor . . . . .	135
II.4.3	Emissionsminderungsmaßnahmen im Eisen & Stahl-Sektor . . . . .	142
II.4.4	Aufteilung der installierten Leistung verschiedener Kraftwerkstypen in Deutschland entsprechend der PERSEUS-Datenbank (aufgenommen sind nur Kraftwerke mit einer installierten Leistung, die größer als 70 MW ist) . . . . .	155
II.4.5	Aufteilung der installierten Leistung verschiedener Energieträger in Deutschland entsprechend der angegebenen Quellen und Datenbanken . . . . .	156
II.4.6	Durchschnittliche Volllaststunden der Kraftwerkstypen, nach Konstantin (2009) . . . . .	157

II.4.7	Aufteilung der (theoretisch) eingespeisten Energie nach verschiedenen Energieträgern in Deutschland entsprechend der angegebenen Quellen und Datenbanken . . . . .	158
II.4.8	Verwendete Investitionsdaten der EMM im Energiesektor, unterteilt nach Brennstoffen . . . . .	161
II.5.1	Untersuchte Ausprägungen der Instrumentenmerkmale im Rahmen der analysierten Szenarios im Vergleich zum Basisszenario	173
II.10.1	Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche . . . .	221
II.10.1	Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche . . . .	222
II.10.1	Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche . . . .	223
II.10.1	Gegenüberstellung der Güter und Produktionsbereiche . . . .	224
III.1.1	Ausprägungen der Indizes GT, BA, QG, QA, RE, ZA, BL, GGK und ES; EnEV steht für Energieeinsparverordnung . . . . .	233
III.1.2	Hauptdatenquellen des Teilmodells Wohngebäude . . . . .	234
III.1.3	Hauptindikatoren des Teilmodells Wohngebäude . . . . .	236
III.2.1	Faktoren für die Aufteilung der Wohnfläche der Baualtersklassen des Statistischen Bundesamtes auf die Baualtersklassen des IWU für die alten Bundesländer . . . . .	243
III.2.2	Faktoren für die Aufteilung der Baualtersklassen des Statistischen Bundesamtes auf die Baualtersklassen des IWU für die neuen Bundesländer für Gebäude mit mindestens drei Wohneinheiten, sofern die Aufteilung von den alten Bundesländern abweicht . . . . .	243
III.2.3	Zuordnung der Ausprägungen des Merkmals Anzahl der Wohneinheiten (Statistisches Bundesamt) zu den IWU-Gebäudetypen in Abhängigkeit der Baualtersklasse (IWU) für die alten Bundesländer . . . . .	244

---

III.2.4	Aufteilungsfaktoren zur strukturellen Anpassung der resultierenden Gebäudeverteilung an die vom IWU veröffentlichten Daten . . . . .	245
III.2.5	Zuordnung der Ausprägungen des Merkmals Anzahl der Wohneinheiten (Statistisches Bundesamt) zu den IWU-Gebäudetypen in Abhängigkeit der Baualtersklasse (IWU) für die neuen Bundesländer für Gebäude mit mindestens drei Wohneinheiten, sofern die Aufteilung von den alten Bundesländern abweicht . .	245
III.2.6	Vereinfachte Darstellung relevanter Kennzahlen der im Teilmodell Raumwärme definierten Sanierungsepochen . . . . .	246
III.2.7	Bauteilflächenspezifische Investitionen (einschließlich Montage) für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in den Varianten 2007-2008 (+), 2007-2030a (++), 2007-2030b (+++), 2007-2030c (++++) im Jahr 2007 . . . . .	248
III.2.8	Alternative bauteilflächenspezifische Investitionen (einschließlich Montage) für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in den Varianten 2007-2008 (+), 2007-2030a (++), 2007-2030b (+++), 2007-2030c (++++) im Jahr 2009 . . . . .	248
III.2.9	Bruttogrundflächenspezifische Investitionen für die Kosten- gruppe 300 (Bauwerk - Baukonstruktionen) nach DIN 276 des Neubaus der Baualtersklasse 2007-2030 differenziert nach Gebäudetyp und Qualität der Gebäudehülle im Jahr 2008 . .	249
III.2.10	Anteil energetisch modernisierter Gebäude an den Gebäuden mit Baujahr vor 1990 bzw. 1968 differenziert nach Fenstern, oberem Gebäudeabschluss, Außenwänden und unterem Gebäu- deabschluss . . . . .	250
III.2.11	Leerstandsquoten von Wohnungen im Jahr 2006 differenziert nach Bundesländern . . . . .	252

III.2.12	Im Teilmodell Wohngebäude je Leistungsklasse (<25kW, 25-50kW, 50-1.000kW) differenzierte Anlagentechnikvarianten für den Wohngebäudebestand 2006 und die jeweiligen Kombinationen von Merkmalsausprägungen des Mikrozensus, die diesen zugeordnet werden; * steht für beliebige Merkmalsausprägungen, WW für Warmwasser . . . . .	255
III.2.13	Verwendete, auf die Endenergie bezogene Emissionsfaktoren für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung des Startbestandes 2007; berechnet auf Basis von Struschka et al. . . .	257
III.2.14	Im Teilmodell Wohngebäude für alle Leistungsklassen verwendete Jahresnutzungsgrade des Gesamtsystems (inkl. Erzeugungs-, Verteil- und Speicherverluste) für den Wohngebäudebestand 2006 . . . . .	257
III.2.15	Im Teilmodell Wohngebäude verwendete endenergiebezogene CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung in Abhängigkeit des Energieträgers . . . . .	258
III.2.16	Im Teilmodell Wohngebäude je Leistungsklasse (<25kW, 25-50kW, 50-1.000kW) differenzierte Anlagentechnikvarianten beim Ersatz der Anlagentechnik . . . . .	259
III.2.17	Im Teilmodell Wohngebäude verwendete Investitionen (netto) für die Anlagentechnik differenziert nach Leistungsklasse (<25kW, 25-50kW, 50-1.000kW), Anlagentechnikvariante und Investitionsbestandteil bei dem Ersatz der Anlagentechnik ohne Energieträgerwechsel und ohne Wechsel von dezentraler zu zentraler Raumwärmeversorgung im Jahr 2006 . . . . .	260
III.2.18	Durch Energieträgerwechsel verursachte Investitionen beim Wechsel der Anlagentechnik je Wohnfläche und je Gebäude im Jahr 2006 . . . . .	261

---

III.2.19	Im Teilmodell Wohngebäude verwendete endenergiebezogene Emissionsfaktoren für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung bei einem Ersatz bzw. Wechsel der Anlagentechnik; berechnet auf Basis von Struschka et al.; PM-Abscheidegrad von 75% . . . . .	262
III.2.20	Im Teilmodell Wohngebäude verwendete bruttogrundflächen-spezifische Investitionen für die Kostengruppen 300 (Bauwerk - Baukonstruktionen) und 420 (Wärmeversorgungsanlagen) nach DIN 276 des Neubaus der Baualtersklasse 2007-2030 differenziert nach Gebäudetyp und Qualität der Gebäudehülle im Jahr 2008 . . . . .	264
III.2.21	Im Teilmodell Wohngebäude für alle Leistungsklassen verwendete Jahresnutzungsgrade des Gesamtsystems (inkl. Erzeugungs-, Verteil- und Speicherverluste) beim Ersatz der Anlagentechnik in Wohngebäuden . . . . .	264
III.2.22	Begrenzung der Abgasverluste nach 1. BImSchV . . . . .	270
III.3.1	Zuordnung der Anlagentechnikvarianten im Neubau zu den Anlagentechnikvarianten in der Baualtersklasse 2002-2006 im Teilmodell Wohngebäude . . . . .	280
III.3.2	Kombinationen von Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen, die im Teilmodell Wohngebäude nicht vom Abriss ausgeschlossen sind . . . . .	281
III.3.3	Transformationsmatrix zur Zuordnung selbstnutzender Eigentümer zu Entscheidertypen im Basisszenario . . . . .	288
III.3.4	Transformationsmatrix zur Zuordnung von Mietern zu Bewirtschaftungsstrategien im Basisszenario . . . . .	289
III.4.1	Übersicht über die im Teilmodell Wohngebäude betrachteten Storylines . . . . .	292

III.4.2	Investitionszuschuss [in % der Investition] in finanziellen Förderprogrammen für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in Abhängigkeit von ordnungsrechtlichen Instrumenten; n. m. steht für nicht möglich bzw. nicht betrachtet . . . . .	293
III.4.3	Investitionszuschuss [in % der Investition] bei finanziellen Förderprogrammen für den Ersatz der Anlagentechnik in Abhängigkeit von ordnungsrechtlichen Instrumenten; n. m. steht für nicht möglich bzw. nicht betrachtet . . . . .	294
III.4.4	Übersicht über die im Teilmodell Wohngebäude betrachteten Bündel umweltpolitischer Instrumente; Bei den Mindestanforderungen sind (falls abgestuft) Jahr der Verschärfung und Intensität angegeben . . . . .	295
III.4.5	Übersicht über die betrachteten Szenarios im Teilmodell Wohngebäude . . . . .	296
IV.2.1	Schadstoff-Emissionsfaktoren für Lkw . . . . .	365
IV.3.1	Euro-Emissionsstandards für Pkw (g/km) . . . . .	370
IV.4.1	Umfang der otello-Maßnahmen-Datenbank . . . . .	382
IV.7.1	Vergleich der Luftschadstoffeinsparungen in PP1 bis PP4 . .	448
V.2.1	Änderung der Emissionsfrachten von 2007 bis 2020 in den verschiedenen Szenarios . . . . .	465
V.3.1	Beispielhafte Darstellung der untersuchten Instrumente im Bereich Industrie . . . . .	473
V.3.2	Zielhierarchie zur Nachhaltigkeitsbewertung von Strategien zur Luftreinhaltung im Bereich Industrie & Energieversorgung .	478
V.3.3	Zielhierarchie zur Nachhaltigkeitsbewertung von Strategien zur Luftreinhaltung im Bereich Wohngebäude . . . . .	479





In der Emissionsminderung, vor allem hinsichtlich der Luftschadstoffe, wurden bereits erhebliche Fortschritte erzielt. Dennoch sind weitere Verbesserungen notwendig. Auf internationaler Ebene wurden Ziele zur Minderung von Luftschadstoffemissionen und klimarelevanten Emissionen vereinbart, deren Umsetzung den jeweiligen Unterzeichnerstaaten obliegt. Hierzu existieren zahlreiche umweltpolitische Instrumente, deren Effektivität und Effizienz jedoch schwer abschätzbar sind. Daher ist es u. a. das Anliegen sogenannter Integrated Assessment Modelle (IAM) solche politischen Instrumente in ihren ökologischen und ökonomischen Wirkungsmechanismen zu bewerten. Das im vorliegenden Buch beschriebene otello-Modellsystem, ein nationales IAM für Deutschland, betrachtet hierzu die Sektoren Industrie & Energieversorgung, Wohngebäude und Verkehr. Die Ergebnisse der Anwendung zeigen, dass eine quantitative Abschätzung der Auswirkungen umweltpolitischer Instrumente eine integrierte Betrachtung der verschiedenen Emissionen und Bereiche voraussetzt, um die Wechselwirkungen zu berücksichtigen.

