

Forschungsbericht

**Die Energienachfrage  
privater Haushalte und  
ihre Bedeutung für den  
Klimaschutz –**

Volkswirtschaftliche  
Analysen zur deutschen  
und europäischen  
Klimapolitik mit einem  
technologiefundierten  
Allgemeinen  
Gleichgewichtsmodell

**Robert Beestermöller**



**Die Energienachfrage privater Haushalte und  
ihre Bedeutung für den Klimaschutz –**

Volkswirtschaftliche Analysen zur deutschen und europäischen Klimapolitik mit  
einem technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Robert Beestermöller**

aus Herne

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß

Mitberichter: Prof. Dr. rer. pol. Wolf Fichtner

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Januar 2017

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart

2017

**ISSN: 0938-1228**



**D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)**



## **Danksagung**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart.

Ohne die Hilfe vieler verschiedener Menschen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Aus diesem Grund möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation unterstützt und so maßgeblich zu ihrer Entstehung beigetragen haben. Zunächst danke ich Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß für die Betreuung und vertrauensvolle Zusammenarbeit sowie Prof. Dr. rer. pol. Wolf Fichtner für die Übernahme des Koreferats. Weiterhin danke ich Dr. rer. pol. Ulrich Fahl für seine kontinuierliche Unterstützung und fachlich kompetente Begleitung meiner Arbeit, sowohl persönlich als auch als Lektor, Abteilungsleiter und Volkswirt. PD Dr.-Ing. Markus Blesl danke ich für Ansporn und Zuspruch. Allen Mitarbeitern und Mitstreitern am IER gilt mein besonderer Dank für den einzigartigen kollegialen Zusammenhalt sowie spannende Diskussionen, insbesondere, aber nicht nur zu Energiethemen. Dazu zählen Johann Gottschling, Sebastian Bothor, Dr.-Ing. Ninghong Sun, Jürgen Apfelbeck, Daniel Müller, Dr.-Ing. Thomas Eberl, Erhard Haiser, Martin Spengler, Lukasz Brodecki und alle weiteren, die wissen, dass sie gemeint sind, aber deren Namen aus Platzgründen nicht in diesen Abschnitt passen.

Eine wichtige Etappe in der Entstehung meiner Dissertation war auch mein Gastaufenthalt am DIW Berlin. Mein herzlicher Dank geht an Prof. Dr. Christian von Hirschhausen, der mich in seine Forschungsgruppe eingeladen hat und Dr. Jan Abrell, der mir mit Geduld und Übersicht den Weg in die CGE-Forschungswelt bereitet hat. Hierzu haben auch meine „NEWAGE“-Vorgänger durch ihre Arbeiten einen entscheidenden Beitrag geleistet, insbesondere Dr. rer. pol. Robert Küster und Dr. rer. pol. Marcel Zürn. Darüber hinaus danke ich Freunden und Wegbegleitern außerhalb des IER für fachliche Diskussionen, unter anderem auf Konferenzen und in Mail-Verteilern.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, insbesondere meiner Frau Verena, die mir mit klugem Rat und liebevollem Zuspruch stets zur Seite steht, und meinen Eltern, die mir durch ihre bedingungslose Unterstützung meine gesamte Ausbildung überhaupt erst ermöglicht haben.

Mannheim, im Januar 2017

Robert Beestermöller





## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XXI</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Zielsetzung .....	1
1.2 Aufbau, Struktur und Vorgehensweise der Arbeit.....	2
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Die Energienachfrage privater Haushalte .....	5
2.2 Klimapolitische Rahmenbedingungen .....	10
2.2.1 Internationale Klimapolitik.....	10
2.2.2 Deutsche und europäische Klimapolitik.....	13
2.2.2.1 Ziele .....	13
2.2.2.2 Europäisches Emissionshandelssystem (EU-ETS) .....	19
2.2.2.3 Weitere Instrumente und Maßnahmen.....	21
2.2.3 Klimapolitische Regulierung privater Haushalte in Deutschland .....	23
2.2.3.1 Direkte, regulatorische Betroffenheit .....	24
2.2.3.2 Indirekte, finanzielle Betroffenheit.....	26
2.3 Umweltökonomische Theorie .....	31
2.3.1 Externe Effekte, Marktversagen und öffentliche Güter.....	31
2.3.2 Umweltökonomische Bewertung klimapolitischer Instrumente .....	36
2.4 Methodische Vorgehensweise.....	42
2.4.1 Kostenwirksamkeitsanalyse.....	42
2.4.2 Anforderungen an die Methodik.....	44
2.4.3 Wahl der Methodik.....	45
2.5 Stand der Forschung .....	49
<b>3 Entwicklung eines technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodells</b> .....	<b>53</b>
3.1 Grundlagen der Modellentwicklung .....	53
3.1.1 Allgemeine Gleichgewichtstheorie.....	53
3.1.2 Mathematische Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen .....	54
3.1.3 CES-Funktionen .....	60
3.2 Statisches Grundmodell .....	63
3.2.1 Datengrundlage und Lösungssoftware .....	63
3.2.2 Regionale, sektorale und faktorale Auflösung .....	64

3.2.3	Modellformulierung und -struktur .....	66
3.2.3.1	Produktion .....	67
3.2.3.2	Handel .....	71
3.2.3.3	Konsum und Investitionen .....	73
3.2.3.4	Unvollkommene Arbeitsmärkte .....	74
3.2.3.5	Wettbewerbsfähigkeit .....	76
3.3	Wachstum und Dynamik .....	77
3.4	Technologiefundierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte .....	82
3.4.1	Modellformulierung und -struktur .....	82
3.4.1.1	Konsumstruktur .....	82
3.4.1.2	Fahrzeug- und Gebäudetechnologien .....	85
3.4.1.3	Nesting-Struktur des motorisierten Individualverkehrs .....	86
3.4.1.4	Nesting-Struktur für Raumwärme und Warmwasser .....	88
3.4.2	Datensatz und Parametrisierung .....	90
3.4.3	Dynamik der Fahrzeug- und Gebäudebestände .....	96
3.5	Modellierung von energie- und klimapolitischen Instrumenten für private Haushalte .....	98
<b>4</b>	<b>Modellgestützte Szenarioanalyse.....</b>	<b>103</b>
4.1	Vergleich klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich .....	103
4.1.1	Szenariodefinition und Modellierung .....	103
4.1.2	Ergebnisse .....	108
4.1.3	Zwischenfazit .....	122
4.2	Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte in einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel .....	123
4.2.1	Szenariodefinition und Modellierung .....	123
4.2.2	Ergebnisse .....	126
4.2.3	Zwischenfazit .....	137
4.2.4	Exkurs: Keine technologisch disaggregierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte .....	138
<b>5</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>145</b>
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	145
5.2	Grenzen der Analyse .....	148
5.3	Diskussion wirtschaftspolitischer Handlungsoptionen.....	151
5.4	Weiterer Forschungsbedarf .....	153
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>175</b>
A.1	Substitutionselastizitäten und Wachstumstreiber .....	175
A.2	Technologiefundierte Darstellung der Stromerzeugung .....	180
A.3	Technologiefundierte Darstellung der Energienachfrage privater Haushalte .....	182
A.4	Modellergebnisse.....	184

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Aufbau, Struktur und Vorgehensweise der Arbeit.....	4
Abbildung 2-1:	Endenergieverbrauch in Deutschland und der EU nach Sektoren im Rahmen der Energiebilanz nach Eurostat und AGEBA (Jahr 2013).....	6
Abbildung 2-2:	Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Produktionsbereichen im Rahmen der UGR (Jahr 2012) .....	7
Abbildung 2-3:	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland nach Produktionsbereichen und Emissionsquellen in privaten Haushalten im Rahmen der UGR (Jahr 2012) .....	9
Abbildung 2-4:	Relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen ausgewählter Länder und weltweit im Zeitraum 1990 bis 2012 im Vergleich zum Niveau von 1990 .....	13
Abbildung 2-5:	Zielarchitektur der deutschen Energiewende (Zielwerte für 2020) .....	17
Abbildung 2-6:	Preis- und Mengeneffekte bei Vorliegen externer Kosten.....	33
Abbildung 2-7:	Optimales Emissionsniveau als Schnittpunkt von Grenzschaadens- und Grenzvermeidungskosten.....	35
Abbildung 2-8:	Einführung einer Pigou-Steuer zur wohlfahrtsoptimalen Internalisierung negativer externer Effekte .....	39
Abbildung 2-9:	Sozialer Wohlfahrtsgewinn marktbasierter Instrumente im Vergleich zu Auflagen .....	41
Abbildung 2-10:	Umweltökonomische Strukturierung klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich .....	42
Abbildung 2-11:	Unterschiedliche Modellansätze für die Kostenwirksamkeitsanalyse von klimapolitischen Instrumenten.....	46
Abbildung 2-12:	Dreidimensionale Beurteilung von Bottom-up- und Top-down-Modellen .....	49
Abbildung 3-1:	Grafische Illustration des geschlossenen Einkommenskreislaufs im statischen Grundmodell .....	60
Abbildung 3-2:	Krümmung der Isoquanten in Spezialfällen der CES-Funktion .....	62
Abbildung 3-3:	Schematische Darstellung der Kreislaufzusammenhänge im Modell .....	67
Abbildung 3-4:	Nesting-Struktur der Nicht-Energiesektoren (inklusive Mineralölindustrie) .....	69
Abbildung 3-5:	Nesting-Struktur der erschöpfbaren Energieressourcen .....	70
Abbildung 3-6:	Nesting-Struktur der Stromerzeugung .....	70
Abbildung 3-7:	Nesting-Struktur der Armington-Aggregation.....	72
Abbildung 3-8:	Nesting-Struktur des Konsums (ohne disaggregierte Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland) .....	73

Abbildung 3-9:	Relativer Welthandelsanteil (RWA) für ausgewählte Sektoren in Deutschland und der EU-28 im Basisjahr 2007 .....	77
Abbildung 3-10:	Relativer Welthandelsanteil (RWA) der Chemie- und Mineralölindustrie in ausgewählten Ländern im Basisjahr 2007 .....	77
Abbildung 3-11:	Nesting-Struktur der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland inklusive ihrer Verknüpfung mit der restlichen Wirtschaft in schematischer Darstellung.....	83
Abbildung 3-12:	Nesting-Struktur der Energiedienstleistung „Motorisierter Individualverkehr“ in Deutschland .....	87
Abbildung 3-13:	Nesting-Struktur der Energiedienstleistung „Raumwärme und Warmwasser“ in Deutschland .....	89
Abbildung 4-1:	Anzahl der Neuwagenkäufe der einzelnen Fahrzeugtechnologien in den Jahren 2007 und 2030 in Deutschland im Szenarienvergleich.....	109
Abbildung 4-2:	Bestandsstruktur nach Fahrzeugtechnologie in den Jahren 2007 und 2030 in Deutschland im Szenarienvergleich .....	111
Abbildung 4-3:	Entwicklung der Wohnfläche und ihre Zusammensetzung nach Gebäudeklassen pro Szenario in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030.....	112
Abbildung 4-4:	Entwicklung der Sanierungsrate im Zeitraum 2007 bis 2030 in Deutschland pro Szenario.....	113
Abbildung 4-5:	Veränderungen der Wohnfläche nach Heizungstyp und Gebäudeklasse im Jahr 2030 in Deutschland (Differenz zum Basisjahr 2007, in Mio. m <sup>2</sup> ).....	113
Abbildung 4-6:	Veränderungen der Wohnfläche nach Heizungstyp in den Jahren 2020 und 2030 in Deutschland als relative Differenz zum Basisjahr 2007 im Szenariovergleich.....	114
Abbildung 4-7:	Modellendogene Entwicklung der Energieträgerpreise für Haushalte im Zeitraum 2007 bis 2030 in Deutschland im Szenario „Standards“ .....	114
Abbildung 4-8:	Entwicklung der EU-ETS-Zertifikatspreise im Zeitraum 2015 bis 2030 pro Szenario (in € <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub> ) .....	116
Abbildung 4-9:	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen privater Haushalte in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 im Vergleich zum Jahr 1990 (in %).....	118
Abbildung 4-10:	CO <sub>2</sub> -Produktivität in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 in den Szenarien im Vergleich zum Szenario „Standards“ (in %).....	121
Abbildung 4-11:	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen innerhalb der EU im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in Mio. t CO <sub>2</sub> ).....	127
Abbildung 4-12:	Sektorale Veränderungen der CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO <sub>2</sub> ).....	130

Abbildung 4-13: Sektorale Veränderungen der CO <sub>2</sub> -Emissionen innerhalb der EU-28 im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO <sub>2</sub> ) .....	131
Abbildung 4-14: Preisdifferenzen ausgewählter Produktionsgüter im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ in der EU (in %).....	132
Abbildung 4-15: Änderungen des relativen Welthandelsanteils (RWA) ausgewählter Produktionsgüter und Modellregionen im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 .....	133
Abbildung 4-16: Änderungen der weltweiten CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO <sub>2</sub> ).....	134
Abbildung 4-17: Absolute Veränderung des realen BIP innerhalb der EU im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in Mrd. € <sub>2007</sub> ).....	135
Abbildung 4-18: Relative Veränderung des realen BIP innerhalb der EU im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in %) .....	135
Abbildung 4-19: Absolute und relative Veränderung der sektoralen, realen Bruttowertschöpfung in Deutschland im Jahr 2030 im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ (in Mrd. € <sub>2007</sub> und %) .....	136
Abbildung 4-20: Relative Veränderung des realen BIP weltweit im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ (in %).....	137
Abbildung 4-21: Nesting-Struktur des Konsums in Deutschland (Exkurs: ohne technologisch disaggregierte Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland) .....	139
Abbildung 4-22: Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen innerhalb der EU im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in Mio. t CO <sub>2</sub> ; Exkurs).....	140
Abbildung 4-23: Sektorale Veränderungen der CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO <sub>2</sub> ; Exkurs).....	142
Abbildung 4-24: Relative Veränderung des realen BIP innerhalb der EU im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in %; Exkurs) .....	143

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Verwendung von Energie in privaten Haushalten (inkl. private PKW) nach Energieträgern in Deutschland im Jahr 2012 nach UGR (in TJ und %) .....	8
Tabelle 2-2:	Treibhausgasemissionsreduktionsziele im Rahmen der deutschen, europäischen und internationalen Klimapolitik im Zeitraum 2012 bis 2050 jeweils in Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 .....	14
Tabelle 2-3:	Klimapolitische Ziele der EU und aktueller Stand relativ zum Jahr 1990 (in %).....	15
Tabelle 2-4:	Politischer Rahmen und Kernziele der Energiewende in Deutschland bis 2050 im Vergleich zum aktuellen Stand (in %).....	17
Tabelle 2-5:	Steuerungsziele der deutschen Energiewende in den Handlungsfeldern Strom, Wärme und Verkehr bis 2050 im Vergleich zum aktuellen Stand (in %) .....	18
Tabelle 2-6:	Klimapolitische Regulierung privater Haushalte nach direkter (regulatorischer) und indirekter (finanzieller) Betroffenheit in Deutschland .....	23
Tabelle 2-7:	Durchschnittswert der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen aller neu zugelassenen PKW in der EU im Zeitraum 2000 bis 2020 in g CO <sub>2</sub> /km (historische Werte und Zielwerte).....	27
Tabelle 2-8:	Preise, Kosten und CO <sub>2</sub> -Gehalt einzelner Energieträger im Jahr 2015.....	29
Tabelle 2-9:	Bestandteile des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises in Deutschland im Februar 2015 (bei 3.500 kWh Jahresverbrauch).....	30
Tabelle 3-1:	Paarweise Zuordnung von Gleichgewichtsbedingungen und Variablen des Arrow-Debreu-Gleichgewichtsmodells im MCP-Format .....	56
Tabelle 3-2:	Regionale Auflösung des Modells: 17 Länder und Regionen.....	64
Tabelle 3-3:	Sektorale Auflösung des Modells: 18 Produktionssektoren.....	65
Tabelle 3-4:	Faktorale Auflösung des Modells: 4 Produktionsfaktoren plus mögliche CO <sub>2</sub> -Zertifikate .....	65
Tabelle 3-5:	Kostenkomponenten der Stromerzeugungstechnologien in Deutschland 2007 .....	71
Tabelle 3-6:	Arbeitslosenraten bei qualifizierten und gering-qualifizierten Erwerbepersonen in den Modellregionen im Basisjahr 2007.....	74
Tabelle 3-7:	Übersicht über die grundsätzlichen Dynamisierungsmöglichkeiten in CGE-Modellen .....	78

Tabelle 3-8:	Wachstum und Dynamik von Arbeitsangebot, totaler Faktorproduktivität und Energieproduktivität im Zeitraum 2007 bis 2030 (Durchschnittswachstum p.a.).....	81
Tabelle 3-9:	Definition der im Modell unterschiedenen Fahrzeug- und Gebäudetechnologien.....	85
Tabelle 3-10:	Anzahl privat zugelassener Fahrzeuge in Deutschland im Jahr 2007 (in Tsd.) und verwendete Referenzmodelle pro Fahrzeugtechnologie .....	91
Tabelle 3-11:	Technische Merkmale der Fahrzeugtechnologien (Deutschland, 2007) .....	92
Tabelle 3-12:	Energie- und Kapitalkosten pro Fahrzeugtechnologie (Deutschland, 2007) .....	93
Tabelle 3-13:	Wohnfläche und Energieverbrauch pro Gebäudetechnologie (Deutschland, 2007).....	94
Tabelle 3-14:	Energie- und Kapitalkosten pro Gebäudetechnologie (Deutschland, 2007) .....	96
Tabelle 3-15:	Die Zusammensetzung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland im Jahr 2007 gemäß Destatis, 2010 und eigenem Modell (in TWh).....	96
Tabelle 3-16:	Brennstoffspezifische CO <sub>2</sub> -Steuersätze bei 7 €/t CO <sub>2</sub> , 30 €/t CO <sub>2</sub> und 50 €/t CO <sub>2</sub> .....	100
Tabelle 4-1:	Szenariodefinition zum Vergleich klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich .....	103
Tabelle 4-2:	Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionsberechtigungen im EU-ETS bis zum Jahr 2030.....	104
Tabelle 4-3:	Vorgabe der Effizienzstandards für Fahrzeuge und Gebäude in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 im Szenario „Standards“ .....	104
Tabelle 4-4:	Unterschiedliche Fördersätze im Szenario „Förderung“ .....	106
Tabelle 4-5:	Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionsberechtigungen in einem um die Energienachfrage der privaten Haushalte in Deutschland erweiterten EU-ETS bis zum Jahr 2030.....	107
Tabelle 4-6:	Brennstoffspezifische CO <sub>2</sub> -Steuersätze im Szenario „CO <sub>2</sub> -Steuer“ .....	108
Tabelle 4-7:	Modellendogene Entwicklung der Energieträgerpreise für Haushalte in Deutschland in den Jahren 2007 und 2030 im Szenariovergleich .....	115
Tabelle 4-8:	CO <sub>2</sub> -Äq-Emissionen in Deutschland pro Szenario im Zeitraum 2007 bis 2030.....	117
Tabelle 4-9:	Bruttoinlandsprodukt (real) in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 im Szenariovergleich .....	120
Tabelle 4-10:	CO <sub>2</sub> -Intensität und -Produktivität in Deutschland pro Szenario im Zeitraum 2007 bis 2030 .....	121

Tabelle 4-11:	Szenariodefinition zur Analyse der Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte in einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel.....	124
Tabelle 4-12:	EU-weite CO <sub>2</sub> -Emissionsreduktionspfade in den ETS- und Nicht-ETS-Sektoren in den Szenarien „EU-40“ und „Nat-40“ inklusive der einzuhaltenden Ziele bis 2020 und 2030 jeweils ggü. 2005 und 1990.....	125
Tabelle 4-13:	National differenzierte CO <sub>2</sub> -Emissionsreduktionspfade für die Nicht-ETS-Sektoren der einzelnen Länder bzw. Ländergruppen bis 2030 im Rahmen der „EU Effort Sharing Decision“ .....	126
Tabelle 4-14:	Entwicklung der im Modell berechneten EU-weiten Emissionsreduktionen in beiden Szenarien im Zeitraum 2015 bis 2030 und im Vergleich zu den EU-Zielen.....	126
Tabelle 4-15:	Entwicklung der szenariospezifischen CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreise in den einzelnen Teilsektoren und Ländern im Zeitraum 2020 bis 2030 (in € <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub> ) .....	128
Tabelle 4-16:	Szenariodefinition zur Analyse der Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte in einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel (Exkurs: keine technologische Disaggregation) .....	139
Tabelle 4-17:	Entwicklung der szenariospezifischen CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreise in den einzelnen Teilsektoren und Ländern im Zeitraum 2020 bis 2030 (in € <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub> ; Exkurs).....	141
Tabelle A-1:	Substitutionselastizitäten des Grundmodells.....	175
Tabelle A-2:	Substitutionselastizitäten in der technologisch disaggregierten Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland .....	176
Tabelle A-3:	Substitutionselastizitäten zwischen Primärenergieträgern und dem KLEM-Aggregat in der Produktion erschöpfbarer Energieressourcen ( $\sigma^{\text{RES}}$ ) .....	177
Tabelle A-4:	Wachstum des Erwerbspersonenpotenzials von qualifizierter Beschäftigung (Index) .....	178
Tabelle A-5:	Wachstum des Erwerbspersonenpotenzials von gering-qualifizierter Beschäftigung (Index) .....	178
Tabelle A-6:	Wachstum der totalen Faktorproduktivität (TFP, Index) .....	179
Tabelle A-7:	Wachstum der Energieproduktivität (Index) .....	179
Tabelle A-8:	Stromerzeugung pro Erzeugungstechnologie und Modellregion im Basisjahr 2007 (in TWh) .....	180
Tabelle A-9:	Stromgestehungskosten pro Erzeugungstechnologie und Modellregion im Basisjahr 2007 (EUR/MWh) .....	181
Tabelle A-10:	Übersicht über die Daten der Fahrzeug- und Gebäudetechnologien (Deutschland, Basisjahr 2007) .....	182
Tabelle A-11:	ADAC-Autokosten 2014.....	183



---

Tabelle A-12:	Anzahl Neuwagen pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (absolut in Tsd).....	184
Tabelle A-13:	Anzahl Neuwagen pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (relativ zum Standards-Szenario in %).....	184
Tabelle A-14:	Anzahl Fahrzeuge im Bestand pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (absolut in Tsd) .....	185
Tabelle A-15:	Anzahl Fahrzeuge im Bestand pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (relativ zum Standards-Szenario in %) ....	185
Tabelle A-16:	Wohnfläche im Gebäudebestand pro Szenario und Gebäudetechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (absolut in Mio. m <sup>2</sup> ).....	186
Tabelle A-17:	Wohnfläche im Gebäudebestand pro Szenario und Gebäudetechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (relativ zum Standards-Szenario in %).....	186
Tabelle A-18:	Energieträgerpreisentwicklung für Haushalte in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 in € <sub>2007</sub> /MWh und als relative Veränderung gegenüber dem Szenario „Standards“ (in %).....	187
Tabelle A-19:	CO <sub>2</sub> -äq-Emissionsentwicklung in den Szenarien „Nat-40“ und „EU-40“ in den EU-Mitgliedsstaaten im Zeitraum 1990 bis 2030 absolut und relativ im Vergleich zum Jahr 1990.....	188
Tabelle A-20:	Relativer Welthandelsanteil (RWA) in allen Produktionssektoren und allen Modellregionen im Basisjahr 2007 .....	189

**Abkürzungsverzeichnis**

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AtG	Atomgesetz
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BReg	Deutsche Bundesregierung
BTag	Deutscher Bundestag
BVEK	Bundesverband Emissionshandel und Klimaschutz
CCS	Carbon Capture and Storage
CES	Constant Elasticity of Substitution
CGE	Computable General Equilibrium
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> -äq	CO <sub>2</sub> -Äquivalent
COP	Conference of Parties
CPA	Classification of Products by Activity
CRTS	Constant Returns to Scale
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt
Destatis	Statistisches Bundesamt
EE	Erneuerbare Energien
EEA	European Environment Agency
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EG	Europäische Gemeinschaft
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
ENFP	Energieforschungsprogramm
ENVKG	Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz
EP	Energieproduktivität
ETS+	Szenariobezeichnung für eine Erweiterung des EU-ETS um private Haushalte in Deutschland
EU	Europäische Union
EU-28	Europäische Union (aktueller Stand mit 28 Mitgliedsstaaten)
EU-40	Szenariobezeichnung für einen EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel mit dem Ziel, die EU-weiten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 40 % gegenüber 1990 zu senken
EU-ETS	Europäisches Emissionshandelssystem

---

EU-KOM	EU-Kommission
GAMS	General Algebraic Modeling System
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GTAP	Global Trade Analysis Project
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaschutzprogramm
ILO	International Labour Organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVD	Immobilienverband Deutschland
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KfW	KfW Bankengruppe
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LKW	Lastkraftwagen
MCP	Mixed Complementarity Problem
MietNovG	Mietrechtsnovellierungsgesetz
MPSGE	Mathematical Programming System for General Equilibrium Analysis
NAP	Nationaler Allokationsplan
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz
Nat-40	Szenariobezeichnung für eine Fortführung des gegenwärtigen EU-ETS bis zum Jahr 2030 bei gleichzeitiger nationaler Regulierung der Nicht-ETS-Sektoren mit dem THG-Emissionsreduktionsziel von 40 % gegenüber 1990
INDC	Intended Nationally Determined Contributions
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
p.a.	Per annum
PKW	Personenkraftwagen
RCP	Representative Concentration Pathways
SAM	Social-Accounting-Matrix
StromStG	Stromsteuergesetz
SUV	Geländelimousine ( <i>Sport Utility Vehicle</i> )
THG	Treibhausgase
TFP	Totale Faktorproduktivität
UBA	Umweltbundesamt
UFOPLAN	Umweltforschungsplan
UGR	Umweltökonomische Gesamtrechnungen
UN	Vereinte Nationen ( <i>United Nations</i> )
UNCED	Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung ( <i>United Nations Conference on Environment and Development</i> )
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen ( <i>United Nations Environment Programme</i> )

UNFCCC	UN-Klimarahmenkonvention ( <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> )
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VGR	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen

## Kurzfassung

Private Haushalte tragen wesentlich zum Energieverbrauch und zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands bei. Im Jahr 2012 entfielen ca. 40 % des Endenergieverbrauchs und ca. 21 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland auf die Energienachfrage privater Haushalte in Wohngebäuden und privaten Fahrzeugen. CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen dort hauptsächlich durch den Einsatz fossiler Brennstoffe zur Befriedigung des Raumwärme-, Warmwasser- und Mobilitätsbedarfs.

Zur Erreichung der klimapolitischen Ziele in Deutschland und der EU sind in den letzten Jahren zahlreiche klimapolitische Instrumente entwickelt und implementiert worden, die eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen herbeiführen sollen. Bislang sind die privaten Haushalte nicht Teil des EU-weiten Emissionshandelssystems (EU-ETS), sondern unterliegen anderen Regulierungsmaßnahmen. Beispiele hierfür sind neben der Energiebesteuerung vor allem die Energieeinsparverordnung (EnEV), die Förderung energetischer Gebäudesanierung mittels KfW-Krediten oder die im Jahr 2016 beschlossene Kaufprämie für Elektroautos. Neben einer solchen direkten Regulierung sind private Haushalte aber auch in indirekter Form von der klimapolitischen Regulierung anderer Wirtschaftsbereiche betroffen (z. B. Energiewirtschaft), da diese ihre infolge der klimapolitischen Regulierung veränderten Produktionskosten über das volkswirtschaftliche Preisgefüge an die Endverbraucher weitergeben. Hier können insbesondere das EU-ETS, das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sowie die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Neuwagen angeführt werden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht stellt sich die Frage, welche gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen durch verschiedene klimapolitische Instrumente sowie den aktuellen Instrumentenmix ausgelöst werden und welchen Beitrag private Haushalte für einen kostengünstigen Klimaschutz im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren in Deutschland und der EU leisten bzw. leisten können.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Energienachfrage privater Haushalte technologisch fundiert in einen gesamtwirtschaftlichen Kontext einzuordnen, die aktuell implementierten und diskutierten klimapolitischen Instrumente im Haushaltsbereich auf ihre volkswirtschaftlichen Auswirkungen in Deutschland und der EU hin zu analysieren und wirtschaftspolitische Handlungsempfehlungen für einen effektiven und kostengünstigen Klimaschutz im Haushaltsbereich abzuleiten. Dazu wird ein multi-regionales, multi-sektorales Allgemeines Gleichgewichtsmodell mit einer technologisch disaggregierten Darstellung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland entwickelt, um die volkswirtschaftlichen Kosten verschiedener klimapolitischer Instrumente und Strategien quantifizieren zu können. Dies geschieht anhand einer modell- und szenariogestützten Kostenwirksamkeitsanalyse, die zum einen verschiedene klimapolitische Instrumente miteinander vergleicht und zum anderen die volkswirtschaftliche Verflechtung zwischen den privaten Haushalten und den anderen Wirtschaftsbereichen in einem sektorübergreifenden EU-weiten Emissionshandelssystem analysiert. Aufgrund des geschlossenen Einkommenskreislaufs des Allgemeinen Gleichgewichts-

ansatzes können dabei sowohl direkte als auch indirekte Effekte abgebildet, und Nettoeffekte quantifiziert werden.

Die Modellergebnisse des klimapolitischen Instrumentenvergleichs zeigen, dass die aktuell implementierten Energiestandards (z. B. EnEV, CO<sub>2</sub>-Grenzwerte) und Förderinstrumente (z. B. KfW-Kredite, Kaufprämien) im Hinblick auf ihre beabsichtigte CO<sub>2</sub>-emissionsmindernde Wirkung zwar effektiv, aber ökonomisch nicht effizient sind, da sie die klimapolitischen Ziele nicht direkt, sondern nur mittelbar über die induzierte Technologiewahl und dadurch mit vergleichsweise hohen ökonomischen Kosten erreichen. Dagegen sind marktba- sierte Instrumente, wie CO<sub>2</sub>-Steuern oder ein auf die privaten Haushalte erweiterter Emissionshandel ökonomisch überlegen, da sie die durch die CO<sub>2</sub>-Emissionen hervorgerufenen externen Effekte direkt bei der Nutzung einpreisen und somit verursachungsgerecht internalisieren. Unter den gegebenen Rahmenannahmen ist der Emissionshandel, aufgrund seiner steuerbaren Emissionsobergrenze, als kosteneffizientes Instrument anzusehen.

Die Modellierung eines EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandels zeigt zudem, dass die Nicht-ETS-Sektoren, inklusive der Energienachfrage privater Haushalte, höhere CO<sub>2</sub>-Grenzvermeidungskosten aufweisen als die im aktuellen EU-ETS teilnehmenden Sektoren der Stromerzeugung und der energieintensiven Industrie. Das bedeutet, dass es gegenwärtig kostengünstiger erscheint, CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Stromerzeugung oder der energieintensiven Industrie zu reduzieren als in der Energienachfrage privater Haushalte. Dort wiederum ist die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion insbesondere im motorisierten Individualverkehr, bzw. im Transportsektor allgemein, mit vergleichsweise hohen Nutzeneinbußen verbunden. Im Gebäudebereich ist die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion dagegen, aufgrund der leichteren Substituierbarkeit fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energien (inklusive kohlenstoffarm erzeugten Stroms), kostengünstiger als im Transportsektor.

Die Bedeutung der Modellergebnisse für die Ableitung politischer Handlungsoptionen ist schließlich vor dem Hintergrund der gewählten methodischen Rahmenannahmen zu beurteilen. Diese beruhen aufgrund des gewählten Allgemeinen Gleichgewichtsansatzes zu einem Großteil auf dem neoklassischen Modell der vollständigen Konkurrenz. Dennoch lässt sich aus der volkswirtschaftlichen Analyse schlussfolgern, dass Energiestandards und Förderinstrumente marktbasierter Instrumenten nur dann vorgezogen bzw. diese ergänzen sollten, wenn letztere aus gesellschaftspolitischen Gründen nicht durchsetzbar oder nicht akzeptabel sind. Dabei sollten klimapolitische Instrumente vor dem Hintergrund ökonomischer Kosteneffizienz so eingesetzt werden, dass sie den verschiedenen Grenzvermeidungskosten der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion unterschiedlicher Wirtschaftsbereiche Rechnung tragen.

## Abstract

Private households contribute substantially to the energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in Germany. In 2012, 40 % of final energy consumption and 21 % of CO<sub>2</sub> emissions in Germany were attributed to the energy demand of households in residential buildings and private cars. The latter mainly arise through the combustion of fossil fuels to satisfy households' needs for space heating, hot water and mobility.

In recent years, several climate policy instruments have been developed and implemented in Germany and the EU in order to reduce CO<sub>2</sub> emissions and achieve the aspired climate policy goals until 2020 and 2030, with a long term focus on 2050. So far, households are not part of the EU-wide emissions trading system (EU ETS), but are subject to other regulatory measures. In Germany these include, for instance, energy taxes, the Energy Saving Regulation (EnEV), the CO<sub>2</sub> building renovation program using KfW-loans or the recently agreed purchase premium for electric cars. In addition to such direct regulation, households are indirectly affected by the climate policy regulation of other sectors (e.g. the energy sector), as these usually pass on some of their production cost changes to the final consumer via the economic price structure. Production cost changes may stem from the EU ETS, the Renewable Energy Act (EEG) or the EU-wide CO<sub>2</sub> emission performance standards for new passenger cars. From a macroeconomic perspective, this raises two major questions: (1) what are the macroeconomic consequences of the different climate policy instruments as well as the existing mix of instruments in Germany? (2) How can households contribute, or should contribute, to a cost-effective climate protection in comparison to other sectors of the economy in Germany and the EU?

The objective of this thesis is to integrate the energy demand of households with its related utility-maximizing technology choice into a macroeconomic context, in order to analyze the economic impacts of existing and prospective climate policy instruments in Germany and the EU and to derive policy recommendations for cost-effective climate change mitigation. In this regard, a multi-regional, multi-sectoral computable general equilibrium (CGE) model with a technologically disaggregated representation of the energy demand of households in Germany will be developed, in order to quantify the economic costs of different climate change mitigation strategies and policy instruments. This will be done by a scenario based cost-effectiveness analysis, which is split into two parts. The first part entails a macroeconomic comparison of different climate policy instruments in the energy demand of households in Germany. The second part focuses on the economic interlinkages between households and other sectors of the economy by modelling and analyzing an EU-wide emissions trading system across the whole economy, i.e. covering all sectors of the economy including households, transport, industry, services and agriculture. Due to the closed of circle of income, all single direct and indirect effects of economic interventions can be captured, such that resulting net effects can be quantified.

The model results of the comparison of different climate policy instruments reveal that current energy standards (e.g. EnEV, CO<sub>2</sub> emission performance standards) and political incentive tools (e.g. KfW loans, purchase premiums) are indeed appropriate for reducing CO<sub>2</sub> emissions. However, they are not cost-efficient, because they only incentivize the purchase of a certain energy technology, but not its usage. This kind of indirect emission reduction involves relatively high economic costs. In contrast, market based instruments, such as CO<sub>2</sub> taxes or an emission trading system with extension to the household sector are superior in terms of economic cost-effectiveness, because they account for the CO<sub>2</sub> related external effects directly at its usage and origin. Under the given framework assumptions, and due to its cap-and-trade mechanism, an emissions trading system with extension to the household sector can be classified as the cost-effective climate policy instrument for regulating the energy demand of households.

The modeling of an economy-wide EU emissions trading system indicate that the non-ETS sectors (including households) exhibit higher marginal CO<sub>2</sub> abatement costs than the current ETS-sectors, i.e. electricity generation and energy-intensive industries. This means that it currently appears less cost intensive to mitigate CO<sub>2</sub> emissions in the electricity sector and energy-intensive industries than in the energy demand of households. There in turn, CO<sub>2</sub> emissions reductions are associated with relatively high costs especially in private transport – as well as in the transport sector in general. In space heating, CO<sub>2</sub> emissions reductions are less cost intensive, as fossil fuels can be more easily replaced by renewable energy sources, including low-carbon generated electricity.

Regarding the derivation of possible policy recommendations, the significance of the model results must be finally assessed in the light of the underlying methodological framework. This is largely based on the neoclassical model of perfect competition, which is an inherent characteristic of the chosen general equilibrium approach. Nevertheless, the economic analysis indicates that energy standards and political incentive tools shall only be preferred to market-based instruments, or complement these, if the latter are neither applicable nor acceptable for sociopolitical reasons. In the context of macroeconomic cost-effectiveness, climate policy instruments should be applied so that they accommodate the different marginal CO<sub>2</sub> abatement costs of the different economic sectors.



## 1 Einführung

Auf der Klimakonferenz im Dezember 2015 in Paris haben sich die Vertragsstaaten der UN-Klimarahmenkonvention erstmals einstimmig darauf geeinigt, die Erderwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf unter 2 °C gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen. Um ihren Beitrag zur Eindämmung des Klimawandels zu leisten, verfolgen Deutschland und die EU bereits seit einigen Jahren das Ziel, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren. Zur Erreichung der klimapolitischen Ziele wurden in den letzten Jahren zahlreiche Instrumente und Maßnahmen auf den Weg gebracht, die eine Reduktion der Treibhausgasemissionen durch verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien und Senkung des Energieverbrauchs auf den Weg bringen sollen. Hierzu zählt vor allem das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS), das die Treibhausgasemissionen in der Stromerzeugung und in größeren Industrieanlagen EU-weit reguliert.

### 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte fallen bislang nicht unter das EU-ETS. Sie machen aber einen erheblichen Teil der deutschen und europäischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Im Jahr 2012 entfielen 40 % des Endenergieverbrauchs und 21 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland auf die Energienachfrage privater Haushalte in Wohngebäuden und privaten Fahrzeugen.<sup>1</sup> Für das Ausmaß der Energienachfrage und den damit zusammenhängenden CO<sub>2</sub>-Emissionen spielen sowohl sozioökonomische Einflussfaktoren, wie Haushaltsgröße, Einkommen und Preise, als auch technologiebezogene Einflussfaktoren, wie Antriebsarten von Fahrzeugen, Heizungssysteme in und Wärmedämmung von Gebäuden, eine Rolle. Der Energiekonsum an sich stiftet privaten Haushalten dabei keinen direkten Nutzen. Dieser ergibt sich vielmehr aus der Nachfrage nach Energiedienstleistungen, die die privaten Haushalte durch die Kombination eines Energieträgers mit einer Energietechnik selbst herstellen. Dabei macht der Bedarf von Raumwärme und motorisiertem Individualverkehr den größten Anteil der nachgefragten Energiedienstleistungen aus. Im Jahr 2012 wurden mehr als 81 % des gesamten Energieverbrauchs privater Haushalte in Deutschland zur Deckung des Bedarfs an Raumwärme und motorisiertem Individualverkehr verwendet.<sup>2</sup>

Die Einbindung der vielen kleinteiligen, oft dezentralen und zum Teil mobilen Emissionsquellen in privaten Fahrzeugen und Wohngebäuden in das EU-ETS bedeutet einen erheblichen administrativen Aufwand, was ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte bislang nicht über den Emissionshandel reguliert werden. Stattdessen werden andere Instrumente und Maßnahmen eingesetzt, um eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu bewirken. Dazu zählen hauptsächlich steuerliche Anreize (z. B. Energie-

---

<sup>1</sup> Vgl. Destatis, 2014d und Destatis, 2014c.

<sup>2</sup> Vgl. Destatis, 2014c.

steuern), Förderprogramme (z. B. das CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm) und ordnungsrechtliche Auflagen (z. B. die Energieeinsparverordnung).

Über die volkswirtschaftlichen Preiszusammenhänge sind die privaten Haushalte aber nicht nur direkt, sondern auch indirekt von der klimapolitischen Regulierung in anderen Wirtschaftsbereichen betroffen. So sind sie über den Strompreis beispielsweise von den Stromerzeugungskosten (inkl. Kosten für das EU-ETS), von den Stromtransportkosten (Netzentgelte) sowie von den Kosten der Einspeisevergütung für erneuerbare Energien (EEG-Umlage) betroffen. Letztlich kann es infolge der klimapolitischen Regulierung zu einer nicht unerheblichen Kostenbelastung der privaten Haushalte kommen. Vor dem Hintergrund der Vielzahl klimapolitischer Instrumente, von denen private Haushalte entweder direkt oder indirekt betroffen sind, stellt sich die Frage nach einem effektiven und kostengünstigen Klimaschutz unter anderem und vor allem im Haushaltsbereich. Es ist nicht auszuschließen, dass sich die unterschiedlichen Instrumente gegenseitig behindern und somit einen kostengünstigen Klimaschutz verhindern.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Energienachfrage privater Haushalte technologisch fundiert in einen gesamtwirtschaftlichen Kontext einzuordnen, die aktuell implementierten und diskutierten klimapolitischen Instrumente im Haushaltsbereich auf ihre volkswirtschaftlichen Auswirkungen hin zu analysieren und wirtschaftspolitische Handlungsempfehlungen für einen effektiven und kostengünstigen Klimaschutz im Haushaltsbereich abzuleiten. Im Sinne des ökonomischen Prinzips geht es dabei zum einen um die Frage nach der nutzenoptimierenden Technologiewahl innerhalb der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland unter den klimapolitischen Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU sowie der Nebenbedingung eines geschlossenen volkswirtschaftlichen Einkommenskreislaufs. Zum anderen geht es um die Frage, welchen Beitrag private Haushalte für einen kostengünstigen Klimaschutz im Vergleich zu den anderen Wirtschaftssektoren in Deutschland und der EU leisten können. Der Fokus der methodischen Herangehensweise liegt dabei auf der Quantifizierung volkswirtschaftlicher Kosten und einer dadurch ermöglichten Bestimmung von Nettoeffekten, durch Saldierung sämtlicher, zum Teil gegenläufiger Bruttoeffekte, die als Folge klimapolitischer Eingriffe in einem volkswirtschaftlichen Kreislaufsystem ausgelöst werden.

## **1.2 Aufbau, Struktur und Vorgehensweise der Arbeit**

Die Untersuchung der volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Energienachfrage privater Haushalte und ihrer klimapolitischen Regulierung wird anhand einer modell- und szenariogestützten Kostenwirksamkeitsanalyse durchgeführt. Diese gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden verschiedene klimapolitische Instrumente im Haushaltsbereich auf ihre Kostenwirksamkeit untersucht, um die ökonomischen Transformationsmechanismen der gegenwärtig implementierten sowie diskutierten klimapolitischen Instrumente zu verstehen. Im zweiten Teil wird die Einführung eines EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandels simuliert,

um die Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte für den Klimaschutz in einem gesamteuropäischen Kontext herauszuarbeiten.

Für die Kostenwirksamkeitsanalyse der klimapolitischen Instrumente wird ein multi-regionales, multi-sektorales Allgemeines Gleichgewichtsmodell entwickelt, das technologische Details in der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland, wie Fahrzeug- und Gebäudetechnologien, berücksichtigt. Die Einbettung technologischer Details (bottom-up) in ein makroökonomisches Modell (top-down) ist erforderlich, um die ökonomischen Wirkungsmechanismen der klimapolitischen Regulierung privater Haushalte in Deutschland adäquat erfassen zu können. Aufgrund des geschlossenen Einkommenskreislaufs des Allgemeinen Gleichgewichtsansatzes können dabei sowohl direkte als auch indirekte Effekte abgebildet, und Nettoeffekte quantifiziert werden. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen lassen sich anhand verschiedener makroökonomischer Indikatoren analysieren, wie beispielsweise dem Bruttoinlandsprodukt, der Bruttowertschöpfung, dem Außenhandel oder der Wettbewerbsfähigkeit, die letztlich Ausdruck der zugrundeliegenden Veränderungen des relativen Preisgefüges und damit verbundener Einkommens- und Substitutionseffekte auf einzel- und gesamtwirtschaftlicher Ebene sind. Aufgrund der im Modell berücksichtigten globalen Handelsverflechtung finden sämtliche ökonomische Aktivitäten in Deutschland und der EU in einem geschlossenen ökonomischen System statt, wodurch internationale Rückkopplungseffekte automatisch mit erfasst werden.

Um diese Ziele mit der skizzierten methodischen Vorgehensweise zu erreichen, strukturiert sich die Arbeit, wie in Abbildung 1-1 dargestellt, in fünf Abschnitte. In Kapitel 2 werden die allgemeinen Grundlagen der Modellentwicklung und der späteren Szenarioanalyse beschrieben. Das beinhaltet zunächst die Vorstellung des Konzepts der Energiedienstleistungen sowie eine kurze, deskriptive Analyse der aktuellen Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und einzelnen Verwendungszwecke (Abschnitt 2.1). Anschließend werden die gegenwärtige klimapolitische Regulierung in Deutschland und der EU im Hinblick auf die direkte und indirekte Betroffenheit der privaten Haushalte beschrieben und die später zu analysierenden klimapolitischen Instrumente identifiziert (Abschnitt 2.2). Abschnitt 2.3 stellt die zentralen wissenschaftlichen Grundlagen vor, insbesondere die umweltökonomischen Bewertungskriterien, an denen sich der klimapolitische Instrumentenvergleich orientiert. In Abschnitt 2.4 werden die methodischen Grundlagen beschrieben und die Wahl der Methodik hergeleitet. Abschnitt 2.5 gibt einen Überblick über den aktuellen Stand vergleichbarer Forschungsarbeiten.

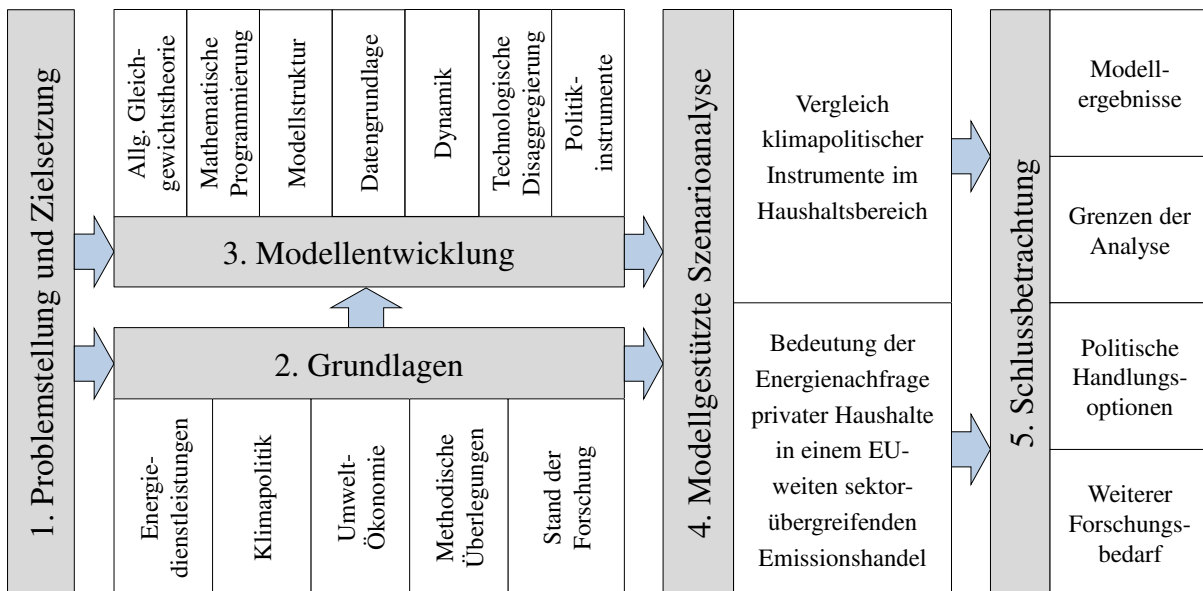
In Kapitel 3 erfolgt die Entwicklung des verwendeten technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodells. Nach einer Einführung in die Allgemeine Gleichgewichtstheorie (3.1) wird die mathematische Formulierung und Programmierung dargestellt. Anschließend wird die Struktur des statischen Grundmodells inklusive der verwendeten Datengrundlage erläutert (3.2.) und die Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs beschrieben (3.3). Darauf folgt die Entwicklung der technologisch disaggregierten Modellierung der Energienachfrage

privater Haushalte in Deutschland (3.4.) sowie die Implementierung der zu analysierenden energie- und klimapolitischen Instrumente (3.5).

In Kapitel 4 wird die modellgestützte Szenarioanalyse durchgeführt. Teil 1 beinhaltet den Vergleich klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich (4.1), Teil 2 die Analyse zur Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte in einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel (4.2.). Dabei werden zunächst die jeweils zu analysierenden Szenarien definiert sowie die dafür nötigen Modellierungsschritte beschrieben (4.1.1 / 4.2.1). Anschließend werden die zentralen Modellergebnisse erläutert (4.1.2 / 4.2.2). Beide Teile schließen mit einem kurzen Zwischenfazit (4.1.3 / 4.2.3). Um die modelltechnische Bedeutung der technologischen Disaggregation besser zu verstehen, wird der zweite Teil der Szenarioanalyse um einen kurzen Exkurs mit einer Modellversion ohne technologische Disaggregation der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland ergänzt (4.2.4).

Kapitel 5 arbeitet die Schlussfolgerungen aus der modellgestützten Szenarioanalyse heraus. Dabei werden zunächst die zentralen Modellergebnisse zusammengefasst (5.1) sowie die Grenzen der Analyse aufgezeigt (5.2). Anschließend werden politische Handlungsoptionen diskutiert (5.3) und weiterer Forschungsbedarf identifiziert (5.4).

**Abbildung 1-1:** Aufbau, Struktur und Vorgehensweise der Arbeit



## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der modellgestützten Analyse beschrieben. Dies umfasst Ausführungen zur Energienachfrage privater Haushalte, zur nationalen und internationalen Klimapolitik, zur umweltökonomischen Theorie sowie zur methodischen Herangehensweise.

### 2.1 Die Energienachfrage privater Haushalte

Ein Privathaushalt ist ein Begriff der amtlichen Statistik und bezeichnet nach der Definition des Statistischen Bundesamtes (Destatis) eine „zusammen wohnende und eine wirtschaftliche Einheit bildende Personengemeinschaft sowie Personen, die allein wohnen und wirtschaften (z. B. Einzeluntermieter). Zum Privathaushalt können verwandte und familienfremde Personen gehören (z. B. Hauspersonal).“<sup>3</sup> In Deutschland lebten im Jahr 2014 81,2 Mio. Menschen in 40,2 Mio. Haushalten, also im Schnitt rund 2 Personen pro Haushalt.<sup>4</sup>

Die Energienachfrage privater Haushalte wird in statistischen Erhebungen unterschiedlich abgegrenzt. Während in Energiebilanzen, beispielsweise von Eurostat auf europäischer Ebene oder der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) auf deutscher Ebene, mit dem Begriff Haushalt die Energienachfrage in Wohngebäuden gemeint ist, umfasst der Begriff in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) vom Statistischen Bundesamt (Destatis) den privaten Verbrauch von Energieträgern, wozu auch der Einsatz von Kraftstoffen (hauptsächlich Benzin und Diesel) im motorisierten Individualverkehr zählt.<sup>5</sup> Private Haushalte sind im volkswirtschaftlichen Sinne abzugrenzen von den Unternehmen, das heißt den Produktionsbereichen.<sup>6</sup>

Nach Daten von Eurostat und AGEB machte der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte (inklusive private PKW) im Rahmen der Energiebilanz in Deutschland und der EU im Jahr 2013 rund 40 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus.<sup>7</sup> Abbildung 2-1 zeigt den entspre-

---

<sup>3</sup> Destatis, 2015b, S. 16. Vgl. auch Gabler, 2015d. In der Volkswirtschaftstheorie werden Haushalte als Konsumenten verstanden, die auch als Sparer und Anbieter von Produktionsfaktoren auftreten (siehe Modellentwicklung unten in Kapitel 3). Sie sind abzugrenzen von den anderen Wirtschaftssubjektgruppen Staat, Unternehmen und Ausland.

<sup>4</sup> Vgl. Destatis, 2015b.

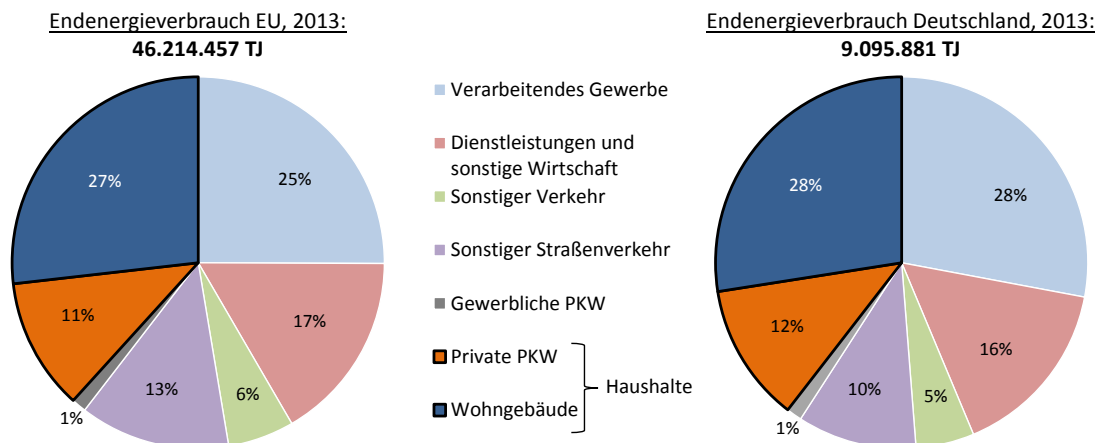
<sup>5</sup> Die AGEB liefert die Daten für Deutschland an Eurostat. In den Energiebilanzen der AGEB wird der Endenergieverbrauch unterschieden nach den Sektoren Haushalte, Verkehr, GHD (inkl. Landwirtschaft) und Verarbeitendes Gewerbe (inkl. Bergbau).

<sup>6</sup> Die Energienachfrage öffentlicher Einrichtungen wird in den UGR im Produktionssektor „Dienstleistungen der öffentlichen Verwaltung“ erfasst (Klassifizierungsnummer nach CPA [*Classification of Products by Activity*]: L75). Öffentliche Haushalte verstehen sich nach Gabler, 2015b, als „der Befriedigung von Kollektivbedürfnissen dienende Einrichtungen aller Gebietskörperschaften, die zu diesem Zweck öffentliche Güter anbieten“. Ein öffentlicher Haushalt i.e.S. bezeichnet das Rechnungswerk von Bund, Ländern und Gemeinden.

<sup>7</sup> Als Endenergieverbrauch wird die Verwendung von Primär- und Sekundärenergieträgern in einzelnen Verbrauchersektoren bezeichnet, sofern sie unmittelbar zur Erzeugung von Nutzenergie oder für Energiedienstleistungen eingesetzt werden (Definition nach AGEB; vgl. Ziesing et al., 2012, S. 42).

chenden Endenergieverbrauch in Deutschland und der EU nach Sektoren im Jahr 2013.<sup>8</sup> Der Endenergieverbrauch privater Haushalte ergibt sich als Summe des Endenergieverbrauchs des Sektors „Haushalte“ und dem Endenergieverbrauch desjenigen Teils des Straßenverkehrs, der auf private PKW entfällt.<sup>9</sup> Der Energieverbrauch von Bussen und Lastkraftwagen (LKW) ist in der Kategorie „Sonstiger Straßenverkehr“ enthalten. Die Kategorie „Sonstiger Verkehr“ umfasst Bahn-, Luft- und Schiffsverkehr.<sup>10</sup>

**Abbildung 2-1:** Endenergieverbrauch in Deutschland und der EU nach Sektoren im Rahmen der Energiebilanz nach Eurostat und AGEB (Jahr 2013)



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Eurostat, 2015d, EU-KOM, 2014a und KBA, 2014

In den UGR des Statistischen Bundesamtes werden die Daten der Energiebilanz mit den ökonomischen Aktivitäten der Wirtschaftsbereiche im Sinne der Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen (VGR) in Verbindung gebracht.<sup>11</sup> Dadurch können sowohl der Einsatz von Energie als auch die energiebedingten Emissionen in den Wirtschaftsbereichen der Volkswirtschaft, das heißt in den einzelnen Produktionssektoren und den privaten Haushalten, analysiert werden.

Neben dem Endenergieverbrauch ist der Primärenergieverbrauch eines Landes eine wichtige energiepolitische Größe.<sup>12</sup> Nach UGR-Abgrenzung berechnet sich der Primärenergiever-

<sup>8</sup> Die Kategorie ‚Wohngebäude‘ entspricht der Kategorie ‚Haushalte‘ in Eurostat, 2015d.

<sup>9</sup> Die Kategorie ‚Private PKW‘ in Abbildung 2-1 wurde aus der Kategorie ‚Straßenverkehr‘ in Eurostat, 2015d mit Hilfe der Daten ‚Private cars and motorcycles‘ des Jahres 2010 von EU-KOM, 2014a, S. 87 bzw. S. 111, und dem Anteil privater Halter am gesamten Fahrzeugbestand (90 %) nach KBA, 2014 abgeleitet. Da der Anteil privater Haushalte auf EU-Ebene nicht verfügbar war, wurde der Wert der deutschen KBA-Statistik verwendet.

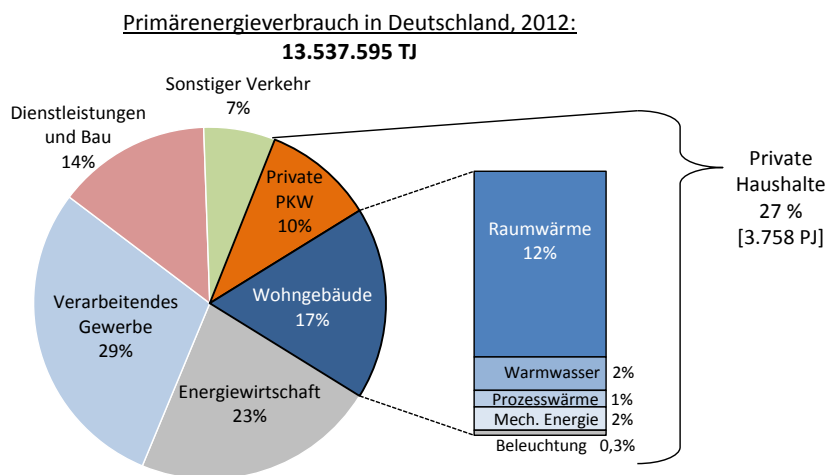
<sup>10</sup> Eine funktionale Unterteilung in Güter- und Personenverkehr ist anhand der hier dargestellten Daten nicht möglich. Eine Aussage zum indirekten Energieverbrauch privater Haushalte durch die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel kann hier somit nicht getroffen werden.

<sup>11</sup> Wesentliche Grundlage für die Berechnung des Energieverbrauchs nach Produktionsbereichen und privaten Haushalten im Rahmen der UGR sind die Daten der Energiebilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), die durch Daten aus weiteren Quellen ergänzt werden (Destatis, 2014b, S. 46).

<sup>12</sup> Vgl. Mayer, 2006. Primärenergieträger sind Energieträger, die keiner Umwandlung unterworfen wurden, das heißt Rohstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) und natürliche Energiequellen, wie Wasserkraft oder Sonnenenergie (Definition nach AGEB; vgl. Ziesing et al., 2012, S. 44).

brauch eines Landes aus der Summe von Endenergieverbrauch, nicht-energetischem Verbrauch, Eigenverbrauch der Umwandlungsbereiche sowie Umwandlungseinsatz abzüglich Umwandlungsausstoß.<sup>13</sup> Für die gesamte Volkswirtschaft gibt der Primärenergieverbrauch der UGR also den um Doppelzählungen aus der Umwandlung von Energie bereinigten Energieverbrauch an. Dieser wird gemäß Inländerkonzept gemessen, wonach die gesamte Verwendung von Gütern auch den Verbrauch der inländischen Wirtschaftseinheiten im Ausland umfasst. Der Verbrauch ausländischer Wirtschaftseinheiten im Inland wird entsprechend abgezogen.<sup>14</sup> Abbildung 2-2 stellt die Aufteilung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Produktionsbereichen im Rahmen der UGR im Jahr 2012 dar (insgesamt 13.538 PJ). Demnach waren 27 % des deutschen Primärenergieverbrauchs im Jahr 2012 auf die Energienachfrage privater Haushalte (inklusive private PKW) zurückzuführen. Davon wurden gut ein Drittel (36 %) für den motorisierten Individualverkehr mit privaten PKW verwendet. Die restlichen zwei Drittel (64 %) fielen in Wohngebäuden an. Dort wurde die Energie hauptsächlich für Raumwärme und Warmwasser eingesetzt (83 %). Die restliche Energie wurde für andere Anwendungszwecke, wie Beleuchtung, mechanische Energie und sonstige Prozesswärme verwendet.<sup>15</sup>

**Abbildung 2-2:** Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Produktionsbereichen im Rahmen der UGR (Jahr 2012)



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Destatis, 2014c (Tabellen 3.1.2, 3.3.4 und 3.3.6.1)

Der Energiebedarf privater Haushalte (inkl. private PKW) wird durch den Einsatz von Energieträgern, wie Mineralöl, Erdgas, Strom oder Fernwärme, befriedigt, deren Zusammensetzung in Deutschland im Jahr 2012 in Tabelle 2-1 (absolut und relativ) aufgelistet ist. Knapp

<sup>13</sup> Vgl. Destatis, 2014b, S. 45 sowie Staffelrechnung in Destatis, 2014c, Tabelle 3.1.2.

<sup>14</sup> Vgl. Destatis, 2014c, S. 16 f. In den Energiebilanzen wird dagegen das Inlandskonzept verwendet. Dies beinhaltet inländische Lieferungen von Energieträgern unabhängig davon, ob es sich bei den Abnehmern um inländische oder ausländische Wirtschaftseinheiten handelt. Die Energieverwendung von inländischen Wirtschaftseinheiten im Ausland bleibt dabei außer Betracht.

<sup>15</sup> Sonstige Prozesswärme fällt insbesondere beim Kochen an, einschließlich Warmwasser für Geschirrspüler und Waschmaschinen. Mechanische Energie wird für den Betrieb von Elektrogeräten benötigt, einschließlich Kühlen und Gefrieren sowie Geräte für Kommunikation und Unterhaltung.

die Hälfte entfiel demnach auf Mineralölprodukte, darunter wiederum knapp die Hälfte auf Ottokraftstoffe, ein Viertel auf Gase und 9 % auf erneuerbare Energien. Strom und Fernwärme machten 13 % bzw. 5 % aus. Der Kohleanteil ist mit unter 1 % sehr gering. Insgesamt betrug der Energieverbrauch privater Haushalte in Deutschland im Jahr 2012 nach UGR-Bilanzierung 3.758 Petajoule.

**Tabelle 2-1:** Verwendung von Energie in privaten Haushalten (inkl. private PKW) nach Energieträgern in Deutschland im Jahr 2012 nach UGR (in TJ und %)

	Absolut (TJ)	Anteil
Gase	924.740	25 %
Ottokraftstoffe	797.670	21 %
Strom	493.200	13 %
Dieselmkraftstoffe	480.175	13 %
Heizöl	477.633	13 %
Erneuerbare Energien	337.568	9 %
Fernwärme	170.756	5 %
sonstige Mineralöle	45.270	1 %
Kohle	31.079	1 %
Insgesamt	3.758.090	100 %

Quelle: Destatis, 2014c, Tabelle 3.2.3.3

Der Konsum von Energieträgern stiftet privaten Haushalten bisweilen keinen direkten Nutzen. Dieser entsteht vielmehr aus dem Konsum einer bestimmten Energiedienstleistung, das heißt dem Einsatz von Nutzenergie (z. B. mechanische Arbeit, Wärme, Licht) für einen bestimmten Verwendungszweck (z. B. 20 °C Raumtemperatur).<sup>16</sup> Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Energiedienstleistungen Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung, Prozesswärme (z. B. zum Kochen), Nutz-Elektrizität und Mobilität. Private Haushalte stellen die benötigten Energiedienstleistungen durch die Kombination aus einem Energieträger (z. B. Erdgas, Benzin) mit einer entsprechenden Energietechnologie (z. B. Gebäude mit bestimmter Heizungsanlage, PKW mit bestimmter Antriebsart) selbst her. In Wohngebäuden spielt dabei auch der Grad der Gebäudeisolierung eine Rolle, da diese die für die Herstellung von Raumwärme benötigte Menge an Heizwärme beeinflusst.<sup>17</sup>

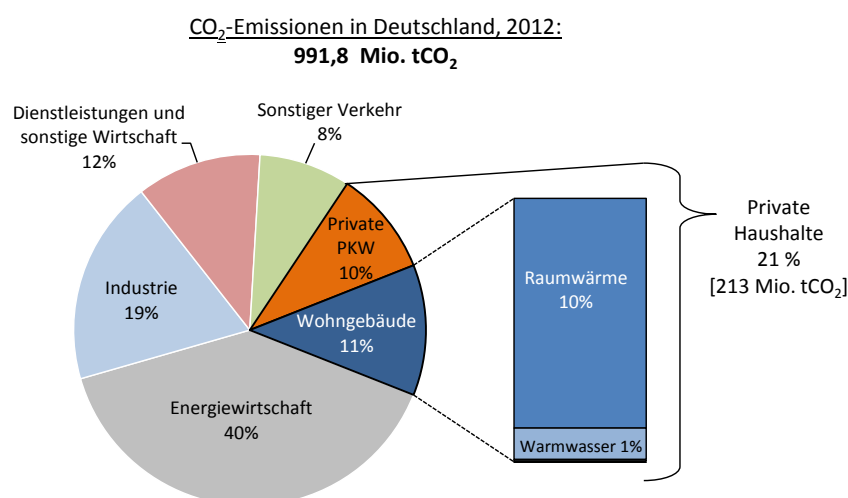
<sup>16</sup> Nach Voß, 2013 lassen sich Energiedienstleistungen als die aus dem Einsatz von Nutzenergie und anderen Produktionsfaktoren befriedigten Bedürfnisse bzw. erzeugten Güter verstehen (z. B. angenehm temperierte Räume, beleuchtete Flächen, beförderte Personen bzw. Güter, erwärmte bzw. gekühlte Stoffe, physikalisch bzw. chemisch gewandelte Stoffe, Information etc.). In der EU-Richtlinie 2006/32/EG über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen wird der Begriff „Energiedienstleistung“ definiert als der „physikalische Nutzeffekt, der Nutzwert oder die Vorteile als Ergebnis der Kombination von Energie mit energieeffizienter Technologie (...)“ (vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2006, S. 68).

<sup>17</sup> Das Konzept der Energiedienstleistung ist zentraler Bestandteil der Modellentwicklung in Abschnitt 3.4. Neben der eigenen Herstellung von Energiedienstleistungen seitens der privaten Haushalte besteht auch die Möglichkeit, diese im Sinne eines „Energie-Contracting“ von einem Dritten einzukaufen. Als spezifisches betriebswirtschaftliches Konzept ist Energie-Contracting nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Ähnliches gilt für das sogenannte „Prosumer“-Verhalten von Haushalten, wonach Haushalte Teile des konsumierten Strom selbst produzieren, was insbesondere für die Stabilität der Stromnetze von Bedeutung ist.



Bei der Herstellung von Energiedienstleistungen seitens der privaten Haushalte fallen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, wie Mineralöl, Erdgas oder Kohle, (direkte) CO<sub>2</sub>-Emissionen an.<sup>18</sup> Im Jahr 2012 waren private Haushalte für rund ein Fünftel (21 %) der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verantwortlich.<sup>19</sup> Abbildung 2-3 veranschaulicht die CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen der privaten Haushalte in Deutschland und stellt sie denen der anderen Produktionsbereiche gegenüber. Dabei machen die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Wohngebäuden einen geringeren Anteil (11 %) aus als beim Primärenergieverbrauch (17 %), was darauf hindeutet, dass der Energieverbrauch dort weniger CO<sub>2</sub>-intensiv ist als in anderen Bereichen, wie beispielsweise in der Energiewirtschaft. Dort fallen fast die Hälfte (40 %) der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland an, während der Anteil beim Primärenergieverbrauch nur 23 % beträgt (vgl. Abbildung 2-2).<sup>20</sup> Der Energie- und CO<sub>2</sub>-Anteil privater PKW am jeweiligen gesamtdeutschen Wert ist mit 10 % gleich.

**Abbildung 2-3:** CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland nach Produktionsbereichen und Emissionsquellen in privaten Haushalten im Rahmen der UGR (Jahr 2012)



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Destatis, 2014c (Tabelle 3.3.6.5) und Destatis, 2014d (Tabelle 4.2.1)

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass die privaten Haushalte in Deutschland rund 40 % des Endenergieverbrauchs (AGEB-Abgrenzung), 27 % des Primärenergieverbrauchs (UGR-Abgrenzung) und 21 % der (direkten) CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. Knapp zwei Drittel des Primärenergieverbrauchs fallen dabei in Wohngebäuden hauptsächlich für Raumwärme und Warmwasser an, der Rest im motorisierten Individualverkehr. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte entstehen jeweils zur Hälfte in Wohngebäuden und PKW. Aufgrund des größeren Anteils elektrischer Energieanwendungen im Raumwärme- und Warmwasserbe-

<sup>18</sup> Indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Konsum privater Haushalte von Strom und anderen Konsumgütern in den jeweiligen Produktionsbereichen anfallen, werden hier nicht den privaten Haushalten zugeordnet (vgl. hierzu Destatis, 2014b, S. 33 f). Sie sind aber Teil der Modellbildung in Abschnitt 3.

<sup>19</sup> Vgl. Destatis, 2014c.

<sup>20</sup> Diese Differenz ist auf die Strom- und Fernwärmeproduktion zurückzuführen, die den privaten Haushalten seitens der Energiewirtschaft zur Verfügung gestellt wird, deren CO<sub>2</sub>-Emissionen aber der Energiewirtschaft zugeschrieben werden. Aufgrund des größeren Kohleeinsatzes ist auch die CO<sub>2</sub>-Intensität im Umwandlungssektor höher.

reich (inkl. Fernwärme) im Vergleich zu elektrischen Antriebsarten von PKW, fällt der Anteil der Wohngebäude an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte dabei geringer aus als der Anteil der Wohngebäude am gesamten Energieverbrauch.

## 2.2 Klimapolitische Rahmenbedingungen

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Unternehmen und privaten Haushalten sind Gegenstand der gegenwärtigen klimapolitischen Regulierung. Im Folgenden werden die allgemeinen klimapolitischen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene geschildert und diejenigen klimapolitischen Instrumente und Maßnahmen identifiziert, die Gegenstand der volkswirtschaftlichen Analyse in Abschnitt 4 sind.

### 2.2.1 Internationale Klimapolitik

In seinem fünften Sachstandsbericht kommt der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) zu dem Schluss, dass es äußerst wahrscheinlich sei, dass der von Menschen verursachte Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, zusammen mit anderen menschlichen Einflussfaktoren, die Hauptursache der beobachteten globalen Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts war.<sup>21</sup> Laut dem Bericht ist die durchschnittliche Erdoberflächentemperatur von Atmosphäre und Ozeanen zwischen 1880 und 2012 um 0,85 °C angestiegen. Gleichzeitig wurde beobachtet, dass Schnee- und Eismengen zurückgegangen sind, der Meeresspiegel angestiegen ist und die Häufung extremer Wetterereignisse, wie Hitze, Dürren, Überschwemmungen oder Stürme zugenommen hat. Laut IPCC wirkt sich der Klimawandel negativ auf die Ökosysteme aus und erhöht die Risiken für Lebensgrundlagen, Ernährungssicherung und Gesundheit. Die Folgen des Klimawandels treten bereits heute auf und werden in Zukunft weiter zunehmen, je nachdem, wie sich die weltweiten Treibhausgasemissionen zukünftig entwickeln werden. Die diesbezüglich untersuchten Szenarien des IPCC reichen von strengem Klimaschutz bis zu ungebremsten Emissionen. Entsprechend würde sich die Erdoberflächentemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich um 0,9 bis 5,4 °C gegenüber vorindustriellen Bedingungen erhöhen.<sup>22</sup>

Vor diesem Hintergrund wurde auf der 21. Vertragsstaatenkonferenz (*21<sup>th</sup> Conference of Parties*, COP21) der UN-Klimarahmenkonvention im Dezember 2015 in Paris beschlossen, die Erhöhung der Erdoberflächentemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf deutlich

---

<sup>21</sup> “Human influence on the climate system is clear, and recent anthropogenic emissions of greenhouse gases are the highest in history.“ IPCC, 2014b, SPM 1. Im fünften Sachstandsbericht werden folgende Abstufungen für Wahrscheinlichkeitsaussagen verwendet: äußerst wahrscheinlich 95 bis 100%, sehr wahrscheinlich 90 bis 100% und wahrscheinlich 66 bis 100% (vgl. De-IPCC, 2014). Der IPCC ist ein wissenschaftliches zwischenstaatliches Gremium, das 1988 von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) ins Leben gerufen wurde (vgl. <http://www.de-ipcc.de>).

<sup>22</sup> Vgl. De-IPCC, 2014.

unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen.<sup>23</sup> Um dieses Ziel zu erreichen, dürfen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts nicht mehr Treibhausgase emittiert werden, als der Atmosphäre durch sogenannte Senken (z. B. Wälder), entzogen werden.<sup>24</sup> Nach dem Kyoto-Protokoll ist das Pariser Abkommen (*Paris Agreement*) das zweite weltweite Klimaabkommen der UN-Klimarahmenkonvention, aber das erste, das alle UN-Staaten unterzeichnet haben. Es beinhaltet allerdings keine verbindlichen Treibhausgasemissionsreduktionsziele, wie es im Kyoto-Protokoll der Fall war, sondern lediglich freiwillige Selbstverpflichtungen der Staaten.<sup>25</sup> Diese national gesteckten Ziele müssen alle fünf Jahre überprüft und neue, ambitioniertere Ziele vorgelegt werden. Zur Zielerreichung sind entsprechende Maßnahmen zu beschließen. Das Abkommen trat am 4.11.2016 in Kraft, nachdem es von mehr als 55 Staaten, die für mehr als 55 % der weltweiten Treibhausgasmissionen verantwortlich sind, ratifiziert wurde.<sup>26</sup>

Das Kyoto-Protokoll wurde im Jahr 1997 auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Kyoto (COP3) verabschiedet und ist im Jahr 2005 nach umfangreichem Verhandlungsprozess in Kraft getreten.<sup>27</sup> Es forderte die Industrieländer bzw. die sogenannten Annex-B-Länder in einer ersten Verpflichtungsperiode von 2008 bis 2012 auf, ihre Treibhausgasemissionen um mindestens 5 % unter das Niveau von 1990 zu senken.<sup>28</sup> Das Ziel gilt nicht für jedes Industrieland im Einzelnen, sondern als Durchschnittsziel der Staatengemeinschaft, um unterschiedlichen nationalen Gegebenheiten, u. a. hinsichtlich Treibhausgasemissionsniveau oder wirtschaftlichem Entwicklungsstadium, Rechnung zu tragen. Im Sinne einer weltweiten Lastenteilung (*Burden Sharing*) haben sich Deutschland und die EU auf weitergehende Treibhausgasemissionsreduktionen im Zeitraum 2008 bis 2012 in Hö-

---

<sup>23</sup> Vgl. UN, 2015. Die UN-Klimarahmenkonvention (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC) wurde 1992 im Rahmen der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio de Janeiro ins Leben gerufen und sieht vor, „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“ (UN, 1992). Es handelt sich dabei um die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoff (N<sub>2</sub>O), Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Um die mittlere globale Erwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 66 % auf weniger als 2 °C zu begrenzen, ist es laut IPCC notwendig, die (seit 1870) kumulativen Treibhausgasemissionen auf etwa 2.900 Gt CO<sub>2</sub> zu begrenzen (De-IPCC, 2014). Hierfür ist bis 2050 eine Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen von 41 bis 72 % gegenüber dem Niveau von 2010 notwendig (IPCC, 2014a, S. 23). Mithilfe von WRI, 2015 lässt sich berechnen, dass die globalen Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 dann entsprechend 12-25 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-äq) betragen müssten (das entspricht einer Reduktion von 17 bis 60 % gegenüber dem Niveau von 1990), vorausgesetzt die globalen Treibhausgasemissionen sinken spätestens ab 2020 (RCP2.6-Szenario).

<sup>24</sup> Vgl. BMUB, 2016a.

<sup>25</sup> Diese Selbstverpflichtungen werden *Intended Nationally Determined Contributions* (INDC) genannt. Sie reichen derzeit noch nicht aus, um die gesteckten Ziele zu erreichen (vgl. BMUB, 2016a).

<sup>26</sup> Dies entspricht der vertraglich vereinbarten Bedingung zum Inkrafttreten des Abkommens. Bislang wurde das Abkommen von insgesamt 94 Staaten ratifiziert (Stand: 3.11.2016, vgl. BMUB, 2016b).

<sup>27</sup> Vgl. UN, 1997.

<sup>28</sup> Vgl. UN, 1997, Art. 3, Abs. 1. Zu den Annex-B-Ländern zählen alle OECD-Länder (außer Südkorea, Mexiko und die Türkei) sowie alle osteuropäischen EU-28-Länder plus Monaco und Liechtenstein (vgl. UN, 1997, Anhang B).

he von 21 % (Deutschland) bzw. 8 % (EU) gegenüber dem Niveau von 1990 festgelegt. Dagegen haben andere Länder, wie Russland oder Australien, keine Emissionsreduktion bzw. eine Obergrenze der Emissionsausweitung um +/- 0 % (Russland) bzw. 8 % (Australien) ausgegeben.<sup>29</sup> Insgesamt summieren sich die einzelstaatlichen Emissionsreduktionsverpflichtungen dieser so genannten Annex-B-Länder zu einer durchschnittlichen Reduktionsverpflichtung von 5,2 % im Zeitraum 2008 bis 2012 gegenüber dem Niveau von 1990.<sup>30</sup>

Um die vorgegebenen Emissionsreduktionen zu erleichtern, wurden mit dem Kyoto-Protokoll so genannte „flexible Mechanismen“ eingeführt, die es den Industrieländern erlauben, Teile der Reduktion im Ausland zu erbringen. Neben gemeinschaftlich umgesetzten Klimaschutzprojekten zwischen Industrieländern (*Joint Implementation*) bzw. gemeinschaftlich umgesetzten Klimaschutzprojekten von Industrieländern in Entwicklungsländern (*Clean Development Mechanism*) ist der Handel mit Emissionszertifikaten (Emissionshandel) zwischen Industrieländern das zentrale klimapolitische Instrument des Kyoto-Protokolls.<sup>31</sup>

Abbildung 2-4 stellt die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen ausgewählter Länder im Zeitraum 1990 bis 2012 jeweils als prozentuale Veränderung im Verhältnis zum Niveau von 1990 dar. Insgesamt sind die Emissionen der Annex B-Länder bis zum Jahr 2012 vor dem Hintergrund der anvisierten 5,2 % im Vergleich zu 1990 um 14 % gesunken (Annex B inklusive USA). Demnach wurden die Kyoto-Ziele in den Annex-B-Ländern im Durchschnitt übererfüllt. In Deutschland beläuft sich die Emissionsreduktion auf 25 % (Ziel: 21 %), in der EU sind es 19 % (Ziel: 8 %). Weltweit kam es im gleichen Zeitraum zu einer deutlichen Zunahme der Treibhausgasemissionen um knapp die Hälfte der weltweiten Emissionen des Jahres 1990. Dies verdeutlicht das Tempo der Treibhausgasemissionszuwächse in Schwellen- und Entwicklungsländern (Nicht-Annex-B-Länder), unter anderem bzw. vor allem in China. Dort haben sich die Treibhausgasemissionen im Zeitraum 1990 bis 2012 vervierfacht, in Indien verdreifacht.<sup>32</sup>

Die Verlängerung des Kyoto-Protokolls für die Zeit nach 2012 wurde auf der 18. Vertragsstaatenkonferenz im Jahr 2012 in Doha (COP18) beschlossen. In einer zweiten Verpflichtungsperiode von 2013 bis 2020 sollen die Treibhausgasemissionen der Annex-B-Länder um insgesamt 18 % unter das Niveau von 1990 gesenkt werden.<sup>33</sup> Das globale Ziel, die Erhöhung

---

<sup>29</sup> Vgl. Anhang B in UN, 1997.

<sup>30</sup> Die USA haben sich zwar anfänglich zu einer Reduktion in Höhe von 7 % verpflichtet, sind aber 2001 aus dem Protokoll ausgestiegen. Bislang sind 191 Staaten dem Protokoll beigetreten. Kanada ist im Jahr 2013 ausgetreten.

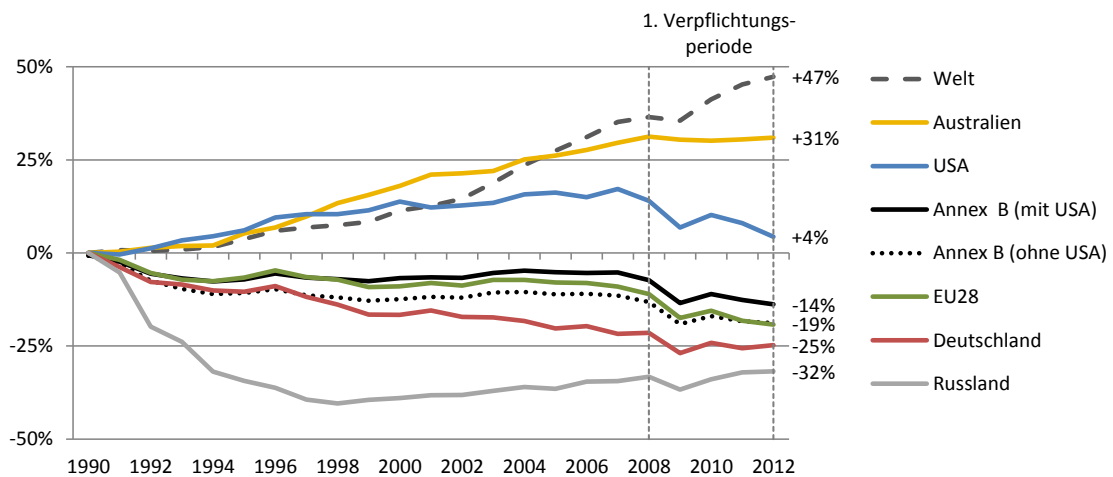
<sup>31</sup> Ausgestaltung und Umsetzung des Kyoto-Protokolls wurden 2001 auf der COP7 in Marrakesch beschlossen. („Marrakesch Accords“, vgl. UN, 2001). Neben den flexiblen Mechanismen gibt es außerdem die Möglichkeit, forst- und landwirtschaftliche Aktivitäten als „Kohlenstoffsinken“ anrechnen zu lassen, wenn diese Kohlenstoff in Ökosystemen aufnehmen und speichern.

<sup>32</sup> Vgl. Olivier et al., 2014.

<sup>33</sup> Vgl. UN, 2013. Die Europäische Union hat sich zu einer Verringerung von 20 Prozent verpflichtet (vgl. auch Abschnitt 2.2.2.1). Neben der EU haben nur Australien und einige weitere europäische Länder verbindliche

der globalen Durchschnittstemperatur auf 2 °C gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen wurde zwei Jahre zuvor auf der COP16 in Cancún formuliert, ohne zum damaligen Zeitpunkt konkrete Maßnahmen zur Zielerreichung zu nennen.<sup>34</sup>

**Abbildung 2-4:** Relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen ausgewählter Länder und weltweit im Zeitraum 1990 bis 2012 im Vergleich zum Niveau von 1990



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von UNFCCC, 2014 und WRI, 2015

## 2.2.2 Deutsche und europäische Klimapolitik

### 2.2.2.1 Ziele

Im Zuge der Umsetzung des Kyoto-Protokolls haben Deutschland und die EU eigene Ziele und Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beschlossen. Die Klimapolitik ist dabei eng verzahnt mit der Energiepolitik. Das Zieldreieck der deutschen und europäischen Energiepolitik umfasst neben der wirtschaftlichen und sicheren auch eine umweltverträgliche Energieversorgung.<sup>35</sup> Letzteres betrifft zu einem großen Teil die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Diesbezügliche Ziele sind in Tabelle 2-2 dargestellt. Auf die einzelnen Ziele wird im Folgenden eingegangen.

### *EU*

Die Reduktionsziele und Maßnahmen der EU beziehen sich zu einem Großteil auf die nähere und mittlere Zukunft bis 2020 und 2030, orientieren sich aber an der längerfristigen Entwicklung bis 2050. Der Europäische Rat hat im Juli 2009 das langfristige Ziel ausgegeben, die

---

Reduktionsziele formuliert. Russland, Japan, Neuseeland und Kanada nehmen an der zweiten Verpflichtungsperiode nicht mehr teil.

<sup>34</sup> Vgl. UN, 2011.

<sup>35</sup> Der Begriff des „Zieldreiecks“ zwischen Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit wird hauptsächlich in der deutschen Energiepolitik verwendet (vgl. hierzu BMWi, 2014a). Die EU-Energiepolitik verfolgt aber die gleichen Ziele: „People's well-being, industrial competitiveness and the overall functioning of society are dependent on safe, secure, sustainable and affordable energy.“ (EU-KOM, 2011, S. 2)

Treibhausgasemissionen der Industrieländer bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken, um sicherzustellen, dass das 2 °C-Ziel eingehalten wird.<sup>36</sup>

**Tabelle 2-2:** Treibhausgasemissionsreduktionsziele im Rahmen der deutschen, europäischen und internationalen Klimapolitik im Zeitraum 2012 bis 2050 jeweils in Prozent gegenüber dem Niveau von 1990

	2012 (Soll)	2012 (Ist)	2020	2030	2040	2050
<b>Deutschland</b>	-21 %	-25 %	-40 %	-55 %	-70 %	-80 bis -95 %
<b>EU</b>	-8 %	-19 %	-20 %	-40 %	-	-80 bis -95 %
<b>Annex-B</b>	-5,2 %	-14 %	-18 %	-	-	-
<b>Welt (2 °C)</b>	-	+47 %	-	-	-	-17 bis -60 % <sup>37</sup>

Quellen: UNFCCC, 2014 und WRI, 2015 für Ist-Werte; EU-Rat, 2009b, EU-Rat, 2014, BMWi, 2015b, IPCC, 2014a und UN, 1997 für Soll-Werte bzw. Ziele

Zwei Jahre zuvor hat der Europäische Rat eine Zieltrias für das Jahr 2020 verabschiedet - die so genannten 20-20-20-Ziele.<sup>38</sup> Demnach sollen bis 2020, erstens, die Treibhausgasemissionen in der EU um 20 % gegenüber dem Niveau von 1990 gesenkt werden. Zweitens soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch der EU auf 20 % erhöht werden. Und drittens soll die Energieeffizienz um 20 % gesteigert werden bzw. 20 % des EU-Primärenergieverbrauchs, gemessen an den Prognosen für 2020, durch Energieeffizienzmaßnahmen eingespart werden.<sup>39</sup>

Tabelle 2-3 beschreibt die klimapolitischen Ziele der EU und den aktuellen Stand relativ zum Jahr 1990. Vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der EU, erscheint es sehr wahrscheinlich, dass das Treibhausgasemissionsreduktionsziel für 2020 erreicht wird (vgl. auch Abbildung 2-4). Bei den Zielen zum Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) und der Reduktion des Primärenergieverbrauchs werden die EU-Ziele allerdings nur erreicht, wenn es gelingt, den Trend von 2005 bis 2012 bis ins Jahr 2020 fortzuschreiben.

Die Treibhausgasemissionsreduktionsziele werden zudem dahingehend unterschieden, dass die Sektoren, die unter das europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) fallen – im Folgenden als ETS-Sektoren bezeichnet – ihre Emissionen bis 2020 gegenüber dem Niveau von

<sup>36</sup> Vgl. EU-Rat, 2009b. Technische Machbarkeit und energiewirtschaftliche Auswirkungen eines derartigen Reduktionsziels in der EU werden in der „Energy Roadmap 2050“ analysiert und beschrieben (vgl. EU-KOM, 2011).

<sup>37</sup> Hierbei handelt es sich nicht um ein politisch verbindliches Ziel, sondern um eine ungefähre Bandbreite der notwendigen Emissionsreduktion zur Erreichung des avisierten 2 °C-Ziels (vgl. Herleitung in Fußnote 23).

<sup>38</sup> Vgl. EU-Rat, 2007. Streng genommen stand zum damaligen Zeitpunkt noch nicht fest, ob es eine Verlängerung des Kyoto-Protokolls nach 2012 geben wird. Aber faktisch beziehen sich die 20-20-20-Ziele auf die zweite Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls, welche auf der COP18 im Jahr 2012 in Doha beschlossen wurde.

<sup>39</sup> Dies entspricht -6 % gegenüber 1990, vgl. Tabelle 2-3.

2005 um 21 % reduzieren müssen.<sup>40</sup> In den so genannten Nicht-ETS-Sektoren, zu denen neben den privaten Haushalten das restliche Verarbeitende Gewerbe, das Transportwesen, der Dienstleistungssektor und die Landwirtschaft zählen, sollen die Emissionen bis 2020 um 10 % gegenüber dem Niveau von 2005 reduziert werden. Dies wurde in der so genannten „Effort Sharing“-Entscheidung im Rahmen des Klima- und Energiepakets der EU im Jahr 2008 festgelegt.<sup>41</sup> Die „Effort Sharing“-Entscheidung sieht dabei eine unterschiedliche Verteilung der Reduktionsanstrengungen zwischen den Mitgliedsstaaten vor. Die Spanne der länderspezifischen Emissionsreduktionen bzw. -ausweitungen in den Nicht-ETS-Sektoren im Vergleich zu 2005 reicht von -20 % in Luxemburg, Dänemark und Irland bis +19 % in Rumänien und +20 % in Bulgarien. Deutschland hat sich in diesem Rahmen auf eine Reduktion in den Nicht-ETS-Sektoren von 14 % im Vergleich zu 2005 festgelegt.

**Tabelle 2-3:** Klimapolitische Ziele der EU und aktueller Stand relativ zum Jahr 1990 (in %)

	2005	2012	2020	2030	2050
Treibhausgasemissionen	-7,9	-19,2	-20	-40	-80 bis -95
EE-Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	8,7	14,3	20	27	-
Primärenergieverbrauch	8,9	1,0	-6	-8	-

Quellen: Eurostat, 2015a, Eurostat, 2015b, Eurostat, 2015c, EU-Rat, 2009b und EU-Rat, 2014

Als Nachfolge der 20-20-20-Ziele hat der Europäische Rat am 24. Oktober 2014 den „Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030“ beschlossen, der eine Fortführung der Zieltrias vorsieht.<sup>42</sup> Demnach sollen bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um 40 % gegenüber dem Niveau von 1990 gesenkt werden. Diese Zielmarke teilt sich auf die ETS-Sektoren und Nicht-ETS-Sektoren auf, wo die Emissionen bis 2030 jeweils um 43 % (ETS) bzw. 30 % (Nicht-ETS) gegenüber dem Niveau von 2005 reduziert werden sollen. Darüber hinaus soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch der EU auf 27 % erhöht sowie die Energieeffizienz – gegenüber dem auf Basis bestimmter Kriterien prognostizierten künftigen Energieverbrauch – um 27 % gesteigert werden.<sup>43</sup> Bei letzterem handelt es sich um ein indikatives Ziel auf EU-Ebene, das für die einzelnen Mitgliedsstaaten nicht verbindlich ist. Das Ziel soll im Jahr 2020 überprüft werden und ggf. auf 30 % angehoben werden.

Die Lastenteilung zur Treibhausgasemissionsminderung der Nicht-ETS-Sektoren soll auch nach 2020 fortgeführt werden, wobei die nationalen Minderungsbeiträge dann auf Grundlage

<sup>40</sup> Näheres zum EU-ETS in Abschnitt 2.2.2.2. Das 2020-Ziel, die EU-weiten Treibhausgasemissionen um 20 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren, ist äquivalent mit einer 14-prozentigen Treibhausgasemissionsreduktion im Vergleich zum Niveau von 2005.

<sup>41</sup> Vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2009b, Anhang II.

<sup>42</sup> Vgl. EU-KOM, 2014c bzw. EU-Rat, 2014.

<sup>43</sup> Dies entspricht einer Reduktion des Primärenergieverbrauchs in der EU um 8 % gegenüber dem Niveau von 1990 (vgl. Tabelle 2-3).

des relativen BIP pro Kopf verteilt werden sollen. Die Ziele für die einzelnen Mitgliedsstaaten sollen dabei in einem Bereich zwischen 0 % und -40 % gegenüber dem Niveau von 2005 liegen.<sup>44</sup> Außerdem gibt es für die Mitgliedsstaaten für die Zeit nach 2020 die rechtliche Möglichkeit, auf nationaler Ebene den Verkehrssektor in das EU-ETS einzubeziehen.<sup>45</sup>

### **Deutschland**

Die Klimapolitik Deutschlands ist eingebettet in den klimapolitischen Rahmen der EU und des Kyoto-Protokolls. Im Zuge der so genannten Energiewende hat Deutschland langfristige Ziele bis 2050 formuliert, um im Sinne des energiepolitischen Zieldreiecks eine zuverlässige, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung sicherzustellen.<sup>46</sup> Als Energiewende werden die Ziele und Eckpunkte des im Jahr 2010 verabschiedeten Energiekonzepts in Verbindung mit den Kabinettsbeschlüssen vom 6. Juni 2011 bezeichnet, die insbesondere den Ausstieg aus der Kernenergie bis Ende 2022 enthalten.<sup>47</sup> Im Energiekonzept von 2010 wird die energiepolitische Ausrichtung Deutschlands bis 2050 beschrieben und Maßnahmen insbesondere zum Ausbau der Erneuerbaren Energien, der Netze und zur Energieeffizienz festgelegt.

Im Zuge der 2020-Ziele der EU und der deutschen Energiewende hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren, den Primärenergieverbrauch um 20 % gegenüber dem Niveau von 2008 bzw. 24 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken und den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch auf 18 % zu erhöhen. Diese Kernziele sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst. Die Ziele zur Senkung des Primärenergieverbrauchs sind aus Vergleichszwecken neben dem im Energiekonzept verwendeten Basisjahr 2008 auch zum Basisjahr 1990 dargestellt.

Neben den in Tabelle 2-4 genannten Zielen umfasst das Energiekonzept bzw. die Energiewende eine Reihe weiterer Ziele. Die Zielarchitektur gemäß BMWi (2011) mit Zielwerten für das Jahr 2020 ist in Abbildung 2-5 dargestellt. Auf oberster Ebene stehen die Senkung der Treibhausgasemissionen, der Ausstieg aus der Kernenergie sowie die Sicherstellung von Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit als politischer Rahmen. Hierfür werden zwei parallele Strategien verfolgt: 1. Substitution von CO<sub>2</sub>-intensiven durch CO<sub>2</sub>-arme Energieträger und 2. Energieeinsparung.<sup>48</sup> Auf der Strategieebene werden entsprechend zwei Kernziele

---

<sup>44</sup> Die konkreten nationalen Zielwerte waren diesbezüglich zum Zeitpunkt der Anfertigung der vorliegenden Arbeit noch nicht bekannt.

<sup>45</sup> Vgl. EU-Rat, 2014.

<sup>46</sup> Vgl. BReg, 2010.

<sup>47</sup> Die einzelnen Beschlüsse werden in BReg, 2011 beschrieben. Die Beschleunigung des Kernenergieausstiegs geschah vor dem Hintergrund der Kernschmelze in Fukushima im März 2011. Hierfür wurde das Atomgesetz (AtG) entsprechend angepasst (vgl. BTag, 2011).

<sup>48</sup> Eine dritte Möglichkeit besteht in der Abtrennung und Lagerung von CO<sub>2</sub> im Rahmen der CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage). Diese Möglichkeit wird von der deutschen Bundesregierung gegenwärtig nur am Rande verfolgt. Das im Jahr 2012 verabschiedete CCS-Gesetz (KSpG) regelt primär die Erforschung,



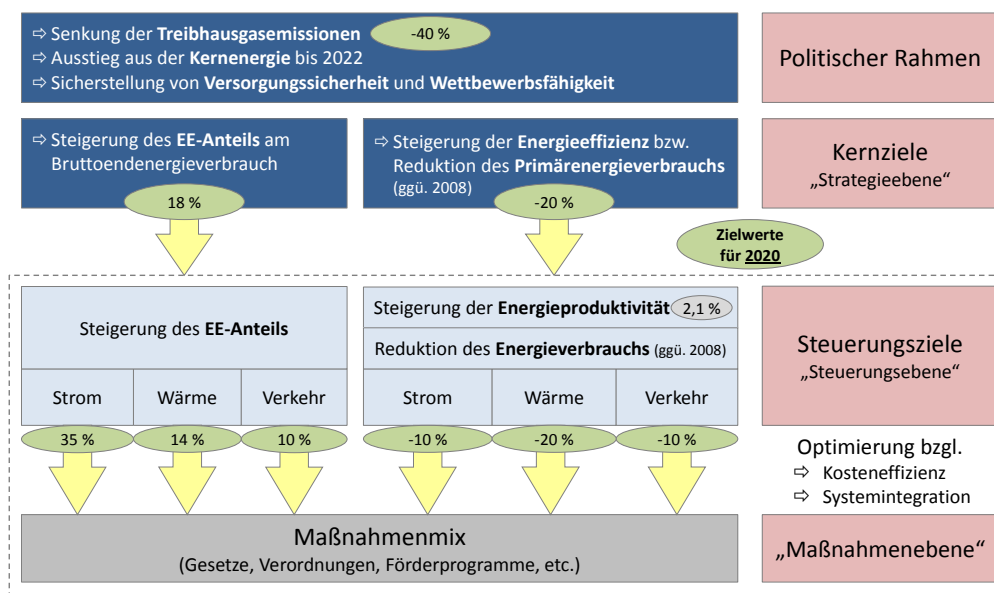
definiert, nämlich den Ausbau der erneuerbaren Energien (60 % Anteil am Bruttoendenergieverbrauch in 2050 bzw. 18 % in 2020) sowie die Senkung des Primärenergieverbrauchs (-60 % bis 2050 bzw. -24 % bis 2020 jeweils gegenüber dem Niveau von 1990; vgl. Tabelle 2-4).

**Tabelle 2-4:** Politischer Rahmen und Kernziele der Energiewende in Deutschland bis 2050 im Vergleich zum aktuellen Stand (in %)

	Basis	2005	2012	2014	2020	2030	2050
Treibhausgasemissionen	1990	-20,3	-24,8	-27,0	-40	-55	-80 bis -95
EE-Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	-	6,7	12,1	13,5	18	30	60
Primärenergieverbrauch	2008	+0,6	-5,8	-8,7	-20	-	-50
	1990	-4,8	-11,0	-13,7	-24	-	-60

Quellen: Eurostat, 2015a, Eurostat, 2015b, Eurostat, 2015c und BMWi, 2015b

**Abbildung 2-5:** Zielarchitektur der deutschen Energiewende (Zielwerte für 2020)



Quelle: Eigene Darstellung nach BMWi, 2015b, S. 9.

Die Erreichung der Kernziele soll durch die Formulierung so genannter „Steuerungsziele“ in den Handlungsfeldern Strom, Wärme und Verkehr erleichtert werden, die letztendlich durch einzelne Maßnahmen in Form von Gesetzen, Verordnungen oder ähnlichem erreicht werden sollen. Die Steuerungsziele im Zeitraum 2020 bis 2050 betreffen beispielsweise die Senkung des Stromverbrauchs, die Erhöhung des Anteils der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)<sup>49</sup> an der

Erprobung und Demonstration von Technologien zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsschichten.

<sup>49</sup> Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Umwandlung von Brennstoffen in elektrische Energie und Nutzwärme in einer ortsfesten technischen Anlage (Definition nach AGEB; vgl. Ziesing et al., 2012, S. 44).

Stromerzeugung, den Wärmebedarf in Gebäuden oder die Anzahl an Elektrofahrzeugen. Sie werden in Tabelle 2-5, auch im Vergleich zu ihrem aktuellen Stand, einzeln aufgeführt.<sup>50</sup>

Der aktuelle Stand der Zielerreichung ist je nach Ziel unterschiedlich. Während die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020 vor dem Hintergrund der beobachteten Entwicklung zwischen 2005 und 2012 erreichbar erscheint, ist für die Erreichung der Minderungsziele hinsichtlich Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch ein höheres Tempo als zwischen 2005 und 2012 nötig (vgl. Tabelle 2-4).<sup>51</sup> Auch die Steuerungsziele des Stromsektors scheinen bei linearer Fortschreibung des aktuellen Trends erreichbar (vgl. Tabelle 2-5). Dagegen stellt der vierte Monitoringbericht zur Energiewende fest, dass die Ziele zur Reduzierung des Wärmebedarfs in Gebäuden sowie des Energieverbrauchs im Verkehrssektor voraussichtlich nicht erreicht würden.<sup>52</sup> Angesichts dieser Entwicklungen sei davon auszugehen, dass weitere Anstrengungen erforderlich seien, um die Ziele zu erreichen. Auf die Problematik bei der Erreichung der deutschen 2020-Ziele wird in Abschnitt 2.2.2.3 gesondert eingegangen.

**Tabelle 2-5:** Steuerungsziele der deutschen Energiewende in den Handlungsfeldern Strom, Wärme und Verkehr bis 2050 im Vergleich zum aktuellen Stand (in %)

		<i>Basis</i>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Strom	Reduktion des Bruttostromverbrauchs	2008	-1,8	-1,9	-4,6	-10	-	-25
	EE-Anteil am Bruttostromverbrauch	-	20,4	23,6	27,4	35	50	80
	KWK-Anteil an der Stromerzeugung	-	17,0	17,3	-	25	-	-
Wärme	Wärmebedarf in Gebäuden	2008	-	-	-12,4	-20	-	-
	EE-Anteil am Wärmeverbrauch	-	-	-	12,0	14	-	-
	Primärenergieverbrauch in Gebäuden	2008	-	-	-14,8	-	-	-80
	Gebäudesanierungsrate	<i>p.a.</i>	≈ 1	≈ 1	≈ 1	Verdoppl. auf 2 % p.a.		
Verkehr	Endenergieverbrauch im Verkehr	2005	-0,7	-1,0	+1,7	-10	-	-40
	EE-Anteil im Verkehrsbereich	-	-	-	5,6	10	-	-
	Anzahl Elektrofahrzeuge (Tsd.)	-	6,5	10,5	28,3	1.000	6.000	-
Anstieg der Endenergieproduktivität		<i>p.a.</i>	1,7	1,1	1,6	2,1 p.a. (2008-2050)		

Quelle: Eigene Darstellung nach BMWi, 2014a, S. 11., BMWi, 2015b, S. 7, 42 f. und BReg, 2015d, S. 6.

<sup>50</sup> Hierbei ist nicht klar, ob die unterschiedlichen Ziele und Zielebenen miteinander im Einklang stehen oder es möglicherweise zu Zielkonflikten kommt. So könnte beispielsweise eine Dekarbonisierung des Stromsektors im Zuge der Senkung der Treibhausgasemissionen, und vor dem Hintergrund einer verstärkten Nutzung der Elektromobilität, zu einem Anstieg des Stromverbrauchs führen. Dem steht wiederum das Ziel zur Senkung des Stromverbrauchs entgegen. Für eine weiterführende Diskussion vgl. u. a. Joas et al., 2014, Groscurth & Bode, 2012 und Möst et al., 2013.

<sup>51</sup> Vgl. hierzu auch die Stellungnahme der Expertenkommission zum vierten Monitoring-Bericht der Bundesregierung (Löschel et al., 2015). Mit dem „Energiewende-Index“ bewertet McKinsey zudem regelmäßig den Stand der Erreichung der einzelnen Energiewende-Ziele. Details finden sich in Vahlenkamp et al., 2015.

<sup>52</sup> Vgl. BMWi, 2015b.

### 2.2.2.2 Europäisches Emissionshandelssystem (EU-ETS)

Zur Erreichung der klimapolitischen Ziele wurden auf nationaler und internationaler Ebene verschiedene Instrumente und Maßnahmen eingeführt. Als zentrales Instrument gilt hierbei das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS). Es ist ein marktorientiertes klimapolitisches Instrument mit dem Ziel einer möglichst kostengünstigen Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Der Emissionshandel wurde im Rahmen des Kyoto-Protokolls als flexibler Mechanismus zur Zielerreichung der Annex-B-Staaten eingeführt (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Die Funktionsweise des EU-ETS basiert auf der Idee des *cap-and-trade*. Das bedeutet, dass eine Höchstmenge an zugelassenen Treibhausgasemissionen in einer bestimmten Region in einem bestimmten Zeitraum festgelegt und einzelne Emissionsberechtigungen pro Tonne CO<sub>2</sub> (t CO<sub>2</sub>) in Form von Zertifikaten ausgegeben werden (*cap*). Diese werden nach einem bestimmten Verfahren auf die Marktteilnehmer aufgeteilt, welche die Zertifikate untereinander handeln können (*trade*). Das beabsichtigte Ziel einer kosteneffizienten Treibhausgasemissionsvermeidung wird letztlich dadurch erreicht, dass der im Rahmen des Zertifikatehandels entstehende Zertifikatspreis zu einer (theoretisch) optimalen Allokation von Treibhausgasemissionen bzw. deren Vermeidung führt, das heißt, die Emissionen dort vermieden werden, wo die Vermeidung am günstigsten ist.<sup>53</sup>

In der EU wurde zum 1. Januar 2005 das EU-ETS eingeführt.<sup>54</sup> Weltweit ist es das erste internationale Handelssystem für Treibhausgasemissionsrechte auf Unternehmensebene.<sup>55</sup> Das EU-ETS reguliert die Treibhausgasemissionen größerer Anlagen der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie. Dies betrifft Feuerungsanlagen mit einer Leistung ab 20 MW, Raffinerien, Anlagen zur Metallherzeugung und -verarbeitung, Anlagen der mineralverarbeitenden Industrie (Zement, Kalk, etc.) und andere Anlagen der energieintensiven Industrie (Chemie, Papier, usw.).<sup>56</sup> Gegenwärtig sind ca. 12.000 Energie- und Industrieanlagen der EU in das Handelssystem einbezogen. Seit 2012 zählt zudem der Flugverkehr dazu.<sup>57</sup>

Aktuell deckt das EU-ETS rund 43 % der gesamten Treibhausgasemissionen der EU-28 ab und befindet sich in der dritten Handelsperiode, die zeitgleich mit der zweiten Verpflich-

---

<sup>53</sup> Vgl. Ausführungen in Endres, 2012, S. 132 ff und 340 ff, sowie in Abschnitt 2.3 unten.

<sup>54</sup> Die Einführung des EU-ETS basiert auf der am 13. Oktober 2003 beschlossenen Emissionshandelsrichtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rats, die den Zusammenschluss der europäischen Mitgliedstaaten zum EU-ETS begründet (vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2003).

<sup>55</sup> Der Emissionshandel im Kyoto-Protokoll umfasst lediglich den übergreifenden Handel zwischen Staaten. Der Prototyp eines Emissionshandelssystems ist der US-amerikanische Emissionshandel für Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>), der im Rahmen des Programms zur Bekämpfung des sauren Regens (*Acid Rain Program*) im Zuge der 1991 in Kraft getretenen Novelle des „Clean Air Act“ eingeführt wurde (vgl. Endres, 2012, S. 141 ff).

<sup>56</sup> Vgl. Anhang I der Emissionshandelsrichtlinie 2009/29/EG (vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2009c).

<sup>57</sup> Vgl. DEHSt, 2014a.

tungsperiode des Kyoto-Protokolls von 2013 bis 2020 reicht.<sup>58</sup> Im Anschluss an eine Pilotphase zwischen 2005 und 2007 fand die zweite Handelsperiode des EU-ETS zeitgleich mit der ersten Verpflichtungsperiode im Kyoto-Protokoll von 2008 bis 2012 statt. Ab der dritten Handelsperiode muss der Stromsektor seinen Zertifikate-Bedarf vollständig am Markt decken, d. h. dort werden keine Zertifikate mehr kostenlos zugeteilt. In der Industrie findet dagegen ein schrittweiser Übergang von kostenlosen Zuteilungsmechanismen hin zu mehr Versteigerung statt.<sup>59</sup> Während das Verhältnis im Jahr 2013 noch 80 % (Zuteilung) zu 20 % (Versteigerung) beträgt, soll es im Jahr 2020 30 % (Zuteilung) zu 70 % (Versteigerung) betragen. Zudem gibt es keine Nationalen Allokationspläne (NAP) mehr, sondern lediglich ein EU-weites Cap, das zwischen 2013 und 2020 jährlich um 1,74 % reduziert wird.

Gegenwärtig wird die zukünftige Ausgestaltung des EU-ETS vor allem hinsichtlich der vierten Handelsperiode von 2021 bis 2030 diskutiert. Eine erste Modifikation wurde bereits im Oktober 2014, neben der Anhebung des jährlichen Reduktionsfaktors ab 2021 von 1,74 % auf 2,2 %, durch den Beschluss des Europäischen Parlaments und des Rates zur Einführung einer Marktstabilitätsreserve (MSR) vorgenommen, die den gegenwärtigen Zertifikatüberschuss im EU-ETS nach und nach beseitigen soll.<sup>60</sup> Die EU-Kommission sieht in dem bestehenden Zertifikatüberschuss bzw. in dem damit zusammenhängenden niedrigen EU-ETS-Zertifikatspreis von derzeit rund 8 €/tCO<sub>2</sub> eine Beeinträchtigung der Investitionsanreize in CO<sub>2</sub>-arme Technologien und dadurch eine Gefährdung der Kosteneffizienz des EU-ETS.<sup>61</sup> Im Juli 2015 hat sie einen Vorschlag für eine Änderung der Emissionshandelsrechtlinie zur „Verbesserung der Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und zur Förderung von Investitionen in CO<sub>2</sub>-effiziente Technologien“ vorgelegt, die im Rahmen der klimapolitischen 2030-Ziele, neben der Einführung einer MSR, weitere Reformvorschläge für die vierte EU-ETS-Handelsperiode zwischen 2021 und 2030 enthält, unter anderem auch Regelungen zur zukünftigen Vermeidung von Carbon Leakage.<sup>62</sup> Letzteres bezeichnet die Verlagerung von Produktion und damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Sektoren ins Ausland, die einerseits energieintensiv produzieren und andererseits starkem internationalen Wettbewerb ausgesetzt sind.<sup>63</sup>

---

<sup>58</sup> Nach Daten von UNFCCC, 2014 und EEA, 2015a. Das aktuellste verfügbare Jahr für UNFCCC-Daten ist 2012. Der Anteil der vom EU-ETS abgedeckten CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt in der EU rund 50 % (Wert für 2008, vgl. EU-KOM, 2008).

<sup>59</sup> Vgl. DEHSt, 2014a.

<sup>60</sup> Zum Hintergrund und zur genaueren Funktionsweise der Marktstabilitätsreserve vgl. DEHSt, 2014b.

<sup>61</sup> Vgl. EU-KOM, 2014d.

<sup>62</sup> Vgl. EU-KOM, 2015c oder auch Geres et al. (2016).

<sup>63</sup> Vgl. DEHSt, 2008, S. 4. In der Präambel (24) der EU-Emissionshandelsrichtlinie 2009/29/EG wird Carbon Leakage definiert als „(...) Anstieg von Treibhausgasemissionen in Drittländern, deren Industrien nicht an vergleichbare CO<sub>2</sub>-Auflagen gebunden sind, und zugleich eine wirtschaftliche Benachteiligung bestimmter energieintensiver, im internationalen Wettbewerb stehender Sektoren und Teilsektoren in der Gemeinschaft bedeuten.“

### 2.2.2.3 Weitere Instrumente und Maßnahmen

Um sicherzustellen, dass die klimapolitischen Ziele der EU erreicht werden, wurde vom Europäischen Parlament und Europäischen Rat im Dezember 2008 ein „Energie- und Klimapaket“ (*EU climate and energy package*) beschlossen, das mehrere Gesetzgebungsinstrumente beinhaltet.<sup>64</sup> Neben der Richtlinie zum Emissionshandel umfasst dies drei Richtlinien zum Ausbau erneuerbarer Energien, zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung sowie zur Kraftstoffqualität, eine Verordnung zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neuwagen sowie die „Effort-Sharing“-Entscheidung zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Nicht-ETS-Sektoren.<sup>65</sup>

Die Ziele der EU-Klima- und Energiepolitik bis 2030 werden neben der Reform der Emissionshandels-Richtlinie durch weitere Legislativinstrumente entsprechend umgesetzt, die auf dem Energie- und Klimapaket für 2020 aufbauen.<sup>66</sup> Dies umfasst unter anderem eine Novelle der Erneuerbaren-Richtlinie und der Energieeffizienz-Richtlinie.<sup>67</sup> Die EU-Kommission plant zudem gemäß der im Februar 2015 veröffentlichten Rahmenstrategie für eine „Energieunion“ die europäische Energie- und Klimapolitik zu harmonisieren, um die Energieversorgung der EU sicherer, bezahlbarer und nachhaltiger zu machen.<sup>68</sup> Die Ausgestaltung der Energieunion soll in den kommenden Jahren durch weitere Gesetzgebungsvorhaben und Maßnahmen konkretisiert werden. Aus Sicht der deutschen Bundesregierung soll der Schwerpunkt dabei primär auf der Stärkung des Energiebinnenmarktes und der Umsetzung der Klima- und Energieziele für 2030 liegen.<sup>69</sup> Für das Jahr 2016 wird in diesem Zusammenhang auch ein Legislativvorschlag der EU-Kommission zur Lastenteilung der Treibhausgasemissionsreduktion von privaten Haushalten und der anderen Nicht-ETS-Sektoren auf Ebene der Mitgliedsstaaten erwartet. Diese Ankündigung ist Teil des Fahrplans zur Energieunion.<sup>70</sup>

Deutschland hatte bereits vor Beginn des Emissionshandels in 2005 umfangreiche Maßnahmen zum Klimaschutz ergriffen. Hervorzuheben sind vor allem das im Jahr 2000 eingeführte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf Basis des zuvor gültigen Stromeinspeisegesetzes für erneuerbare Energien, die im Jahr 2001 eingeführte Energie-Einsparverordnung (EnEV), das im Jahr 2002 eingeführte Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) sowie die im Jahr 1999 eingeführte Ökosteuern. Im Jahr 2007 wurde mit dem „Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramm“ (IEKP) eine nationale Version des europäischen Energie- und Klimapakets be-

---

<sup>64</sup> Vgl. EU-Rat, 2009a.

<sup>65</sup> Vgl. EU-Parl. (2008). Die Regulierung im Verkehrsbereich sieht insbesondere vor, die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neufahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2015 auf durchschnittlich 120 g CO<sub>2</sub>/km und bis 2020 auf 95 g CO<sub>2</sub>/km zu reduzieren. Im Jahr 2013 lagen sie bei 127 g CO<sub>2</sub>/km (vgl. EEA, 2014). Die Treibhausgasemissionen aus Kraftstoffen sollen bis 2020 zudem um 6 % gesenkt werden. Dies betrifft hauptsächlich die Wertschöpfungskette von Kraftstoffproduzenten, die dieses Ziel durch Beimischung von Biodiesel oder Entwicklung effizienterer Produktionstechnologien erreichen können.

<sup>66</sup> Vgl. EU-Rat, 2014.

<sup>67</sup> Vgl. EU-KOM, 2014c.

<sup>68</sup> Vgl. EU-KOM, 2015b.

<sup>69</sup> Vgl. BReg, 2015a.

<sup>70</sup> Vgl. EU-KOM, 2015a.

schlossen. Es umfasst 29 Maßnahmen vor allem im Bereich Energieeffizienz und erneuerbare Energien, die von der Bundesregierung im August 2007 festgelegt wurden.<sup>71</sup> Dazu zählt auch das 2009 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG), das insbesondere den Ausbau erneuerbarer Energien in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden vorantreiben soll. Das Energiekonzept von 2010 bzw. die Energiewende von 2011 knüpft mit ihrem langfristigen Fokus an die bestehenden Gesetze, Instrumente und Maßnahmen an.

Das deutsche Ziel einer 40-prozentigen Treibhausgasemissionsreduktion bis 2020 gegenüber dem Niveau von 1990 erscheint vor dem Hintergrund der aktuellen Trendentwicklung allerdings kaum noch erreichbar (vgl. Tabelle 2-4 oben). Aus diesem Grund hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Juli 2015 ein energiepolitisches Eckpunktepapier vorgelegt, das in Verbindung mit dem „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) eine zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung in Deutschland bis 2020 in Höhe von 22 Mio. t CO<sub>2</sub> bewirken soll.<sup>72</sup> Dieser Zusatzbeitrag sei nötig, um das deutsche 2020-Ziel zu erreichen. Die angestrebten 22 Mio. t CO<sub>2</sub> sollen zu einem Großteil aus der vorzeitigen, schrittweise Stilllegung von Braunkohlekraftwerksblöcken kommen (insgesamt 12,5 Mio. t CO<sub>2</sub> bis 2020). Mit den Kraftwerksbetreibern sei im Oktober 2015 eine vorzeitige Stilllegung von Braunkohlekraftwerksblöcken mit einer Leistung von insgesamt 2,7 GW vereinbart worden. Die Braunkohlekraftwerksblöcke würden auf vertraglicher Basis in eine Kapazitätsreserve überführt und dann schrittweise stillgelegt. Hierfür erhielten die Betreiber eine entsprechende Entschädigung über die Netzentgelte.<sup>73</sup> Die restliche einzusparende CO<sub>2</sub>-Emissionsmenge in Höhe von 9,5 Mio. t CO<sub>2</sub> soll zu einem Teil aus der Reform der KWK-Förderung (4 Mio. t CO<sub>2</sub>) und zu einem anderen Teil aus zusätzlichen Energieeffizienzmaßnahmen aus dem „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ stammen (5,5 Mio. t CO<sub>2</sub>).<sup>74</sup>

Auch der Ende 2014 gleichzeitig mit dem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 verabschiedete Nationale Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) soll zu verstärkten Energieeinsparungen beitragen. Die deutsche Bundesregierung schätzt, mit dem NAPE 390 bis 460 PJ zusätzlich einzusparen.<sup>75</sup> Zentrale Bestandteile sind ein Vorschlag zur Einführung einer steuerlichen Förderung von energetischen Gebäudesanierungen, die Aufstockung des CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms und wettbewerbliche Ausschreibungen für Energiesparprojekte. Mit ihrer im November 2015 veröffentlichten „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ hat die Bundesre-

---

<sup>71</sup> Vgl. BReg, 2007b.

<sup>72</sup> Vgl. BReg, 2015c sowie BMUB, 2014.

<sup>73</sup> 230 Mio. € pro Jahr (vgl. BReg, 2015c).

<sup>74</sup> Ob diese Maßnahmen mit EU-Recht vereinbar sind bzw. ob sie überhaupt zu dem angestrebten Minderungsziel führen, wird von Fernahl et al., 2015 und Greenpeace, 2015 kritisch gesehen. Zudem ist zu sehen, dass nationale Emissionsreduktionen innerhalb des EU-ETS keine weitere Wirkung auf die gesamte Emissionsmenge des EU-ETS hätten. Vgl. auch die Stellungnahme der Expertenkommission zum vierten Monitoring-Bericht der Bundesregierung (Löschel et al., 2015).

<sup>75</sup> Vgl. BMWi, 2014b, S. 20.

gierung Teile des NAPE wieder überarbeitet bzw. erweitert. So wurde die ursprünglich geplante steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung durch das „Anreizprogramm Energieeffizienz“ ersetzt.<sup>76</sup> Zuschüsse und zinsverbilligte Darlehen für Neubauten und energetische Sanierungen im Rahmen des CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms werden über Förderkredite der KfW gewährt.<sup>77</sup>

### 2.2.3 Klimapolitische Regulierung privater Haushalte in Deutschland

Private Haushalte sind von der klimapolitischen Regulierung in vielfältiger Weise betroffen. Zum einen sind sie durch Gesetze und Verordnungen direkt bzw. regulatorisch beeinflusst (z. B. energetische Gebäudesanierung). Zum anderen sind sie über ihre Nachfrage nach Energie und anderen Konsumgütern durch die zugrundeliegenden Preismechanismen indirekt bzw. finanziell betroffen. Die Lenkungswirkung der klimapolitischen Instrumente entfaltet sich daher entweder per Zwang (regulatorisch) oder über eine preisgesteuerte Verhaltensanpassung (finanziell). Tabelle 2-6 listet die verschiedenen, aktuell implementierten bzw. diskutierten klimapolitischen Instrumente im Haushaltssektor sowohl in regulatorischer als auch in finanzieller Hinsicht auf und ordnet sie verschiedenen Kategorien oder Bereichen zu.

**Tabelle 2-6:** Klimapolitische Regulierung privater Haushalte nach direkter (regulatorischer) und indirekter (finanzieller) Betroffenheit in Deutschland

	Direkt (regulatorisch)	Indirekt (finanziell)	
<i>Fossile Brennstoffe</i>	Mögliche ETS-Ausweitung (downstream)	Energiesteuern, mögliche ETS-Ausweitung (upstream), mögliche CO <sub>2</sub> -Steuer ⇒ Mineralöl-, Erdgas- und Kohlepreise	} Direkte CO <sub>2</sub> -Emissionen
<i>Gebäude und Wohnungen (Eigentümer und Mieter)</i>	<u>Eigentümer:</u> Ordnungsrecht für energetische Gebäudesanierung (EnEV, EEWärmeG, EU-Richtlinie zu klimaneutralen Gebäuden)	<u>Eigentümer:</u> Förderprogramme (z. B. CO <sub>2</sub> -Gebäudesanierungsprogramm, KfW-Kredite, Steuerliche Förderung, Nationale Klimaschutzinitiative, Anreizprogramm Energieeffizienz) senken Investitionskosten  <u>Mieter:</u> Sanierungsbedingte Mietpreiserhöhung und (potentielle) Energiekostenreduktion	
<i>Fahrzeuge</i>	CO <sub>2</sub> -basierte Kfz-Steuer	CO <sub>2</sub> -Grenzwerte für neue PKW, Kaufzuschüsse für Elektrofahrzeuge („Kaufprämie“) ⇒ Fahrzeugpreise	
<i>Strom</i>	Einführung intellig. Stromzähler	EU-ETS, Stromsteuer, EEG, KWKG, Netzentgelte, Kernenergieausstieg, CCS ⇒ Strompreise	
<i>Sonstige Konsumgüter</i>	-	EU-ETS (Industrie), Ökodesign-Richtlinie, EU-Energielabel ⇒ Konsumgüterpreise	

Quelle: Eigene Zusammenstellung

<sup>76</sup> Vgl. BReg, 2015d, S. 78.

<sup>77</sup> Vgl. Diefenbach et al. (2013), KfW (2014), KfW (2015a) sowie KfW (2015b).

Demnach setzen manche klimapolitische Instrumente direkt an der CO<sub>2</sub>-Quelle privater Haushalte an, das heißt direkt beim Einsatz fossiler Brennstoffe in Fahrzeugen oder Gebäuden, die für die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Haushalte verantwortlich sind (z. B. Energiesteuern oder mögliche ETS-Ausweitung). Andere Instrumente bewirken eher eine Art Technologienregulierung (z. B. EnEV oder CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für neue PKW) oder adressieren indirekt die CO<sub>2</sub>-Emissionen in anderen Sektoren (Strom und sonstige Konsumgüter). Im Folgenden werden die einzelnen Instrumente und Maßnahmen der klimapolitischen Regulierung privater Haushalte näher beschrieben.

### 2.2.3.1 Direkte, regulatorische Betroffenheit

#### **Mögliche Ausweitung des EU-ETS**

Das bestehende EU-ETS umfasst die CO<sub>2</sub>-Emissionen großer stationärer Anlagen in der Stromerzeugung und der energieintensiven Industrie, allerdings nicht die CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte und anderer Nicht-ETS-Sektoren. Die Hauptursache für die Nicht-Einbeziehung von privaten Haushalten und anderen Kleinemittenten im Gebäude- und Verkehrssektor in das EU-ETS kann in der Vielzahl dezentraler und zum Teil mobiler Emissionsquellen in Fahrzeugen und Gebäuden gesehen werden, die einen Emissionshandel aus administrativen Gründen erschweren.<sup>78</sup>

Aufgrund dessen steht seit einiger Zeit der Vorschlag im Raum, nicht die Haushalte und Kleinemittenten in das EU-ETS direkt einzubeziehen, sondern die Lieferanten, Zwischenhändler, Importeure und Produzenten von fossilen Energieträgern mittels eines so genannten *Upstream*-Emissionshandels.<sup>79</sup> In Deutschland gibt es Akteure, die eine Einbeziehung des Straßenverkehrs per Upstream-Emissionshandel fordern.<sup>80</sup> Das Umweltbundesamt sieht dieses Konzept jedoch kritisch. Nach UBA (2014) würde die Ausweitung des Emissionshandels in der gegenwärtigen Situation keinen signifikanten Mehrwert leisten, weil u. a. das Preissignal bei den Kleinemittenten nur indirekt ankäme und dessen Wirksamkeit hinsichtlich der Investitionsanreize in CO<sub>2</sub>-arme Technologien vor dem Hintergrund der bestehenden klimapolitischen Regulierung in den Nicht-ETS-Sektoren beschränkt wäre. Die Wirkung wäre auch deshalb limitiert, weil im Gebäude- und Verkehrssektor hohe Vermeidungskosten bei vergleichsweise niedrigen Preiselastizitäten vorlägen. Dies könnte bedeuten, dass selbst hohe CO<sub>2</sub>-Preise nur geringfügige Emissionsminderungen in diesen Sektoren zur Folge hätten. Langfristig bliebe das Konzept jedoch insbesondere mit Blick auf die potentielle Angleichung sektorübergreifender CO<sub>2</sub>-Grenzvermeidungskosten eine mögliche Option. Eine Ein-

---

<sup>78</sup> So sieht es beispielsweise die Europäische Kommission (vgl. EU-KOM, 2014b).

<sup>79</sup> Vgl. Voß et al., 2008. Die Begriffe „upstream“, „midstream“ und „downstream“ sind aus der Beschreibung der Erdgas- und Erdölmärkte übernommen. Im strengen Sinne bezeichnet man mit upstream die Produzenten und Importeure von Energieträgern. Im weiteren Sinne werden manchmal auch die weiteren Verarbeitungsstufen und der Transport als Upstream-Stufen bezeichnet. In Kalifornien, Australien und Neuseeland gibt es bereits solche Upstream-Systeme (UBA, 2014, S. 20).

<sup>80</sup> Vgl. BVEK, 2015 oder Nader & Reichert, 2015.



beziehung der Nicht-ETS-Sektoren wurde von der Europäischen Kommission in ihrem Impact Assessment im Vorfeld der Beschlüsse zur europäischen Energie- und Klimapolitik für die Zeit nach 2020 zwar diskutiert.<sup>81</sup> Letztendlich war es aber nicht Teil der Ratsbeschlüsse vom Oktober 2014. Für die Mitgliedsstaaten besteht dennoch die Möglichkeit, den jeweils eigenen Verkehrssektor in das Emissionshandelssystem einzubeziehen.<sup>82</sup>

Ansonsten sieht die Europäische Kommission für Nicht-ETS-Sektoren eine Fortführung der gegenwärtigen Lastenteilung vor. Dabei sollen aber die Anstrengungen auf der Grundlage des relativen BIP pro Kopf verteilt werden, um „Kostenwirksamkeit in fairer und ausgewogener Weise“ herzustellen.<sup>83</sup>

### ***Andere regulatorische Maßnahmen***

Neben der möglichen Ausweitung des EU-ETS auf Haushalte und Kleinemittenten gibt es weitere regulatorische Maßnahmen, die private Haushalte direkt betreffen können. Im Bereich der energetischen Gebäudesanierung umfasst dies hauptsächlich das Energieeinsparungsgesetz (EnEG) und die dadurch ermächtigte Energieeinsparverordnung (EnEV) sowie das Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz (EEWärmeG). Auf EU-Ebene sind diese Vorschriften in die Energieeffizienz-Richtlinie 2012/27/EU, in die Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden sowie in die Erneuerbaren-Energien-Richtlinie 2009/28/EG eingebettet.<sup>84</sup> Daneben sollen gemäß der Richtlinie zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden (2010/31/EU) bis 31. Dezember 2020 alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude (*nearly zero-energy buildings*) sein.<sup>85</sup>

In Deutschland ist die EnEV eine Verordnung für energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Sie setzt Standards für den Transmissionswärmeverlust sowie den Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung in neu zu errichtenden Gebäuden.

Die EnEV soll dazu beitragen, die Ziele der deutschen Energiewende zu erreichen, insbesondere einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis zum Jahr 2050.<sup>86</sup> Das EEWärmeG schreibt für Neubauten vor, einen Teil des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien zu beziehen. Insbesondere soll das Gesetz dazu dienen, den Anteil erneuerbarer Energien am End-

---

<sup>81</sup> In dem Impact Assessment zieht die EU-Kommission eine Erweiterung des ETS nur in Kombination mit komplementären Maßnahmen in Betracht, beispielsweise durch eine Weiterentwicklung der bestehenden Regulierung. Gleichzeitig warnt sie aber auch vor Überregulierung (vgl. EU-KOM, 2014b, S. 233 f).

<sup>82</sup> Es geht dabei hauptsächlich um den Straßenverkehr. Einige EU-Mitgliedsstaaten, wie Dänemark und Luxemburg, haben angekündigt, den Verkehrssektor in das EU-ETS einbeziehen zu wollen, was jedoch zum Teil kritisch gesehen wird (vgl. T&E, 2014 sowie Coussy et al., 2015). Der europäische Luftverkehr ist bereits seit 2012 Teil des EU-ETS.

<sup>83</sup> Vgl. EU-Rat, 2014.

<sup>84</sup> Streng genommen wurde das deutsche EEWärmeG im Jahr 2007 vor der europäischen Erneuerbaren-Energien-Richtlinie des Jahres 2009 eingeführt.

<sup>85</sup> Für öffentliche Gebäude gilt diese Regelung bereits ab Ende 2018 (vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2010).

<sup>86</sup> Vgl. BReg, 2007a.

energieverbrauch für Wärme (Raum-, Kühl- und Prozesswärme sowie Warmwasser) bis zum Jahr 2020 auf 14 % zu erhöhen.<sup>87</sup>

Im Verkehrsbereich kann die CO<sub>2</sub>-basierte Kfz-Steuer als direkte regulatorische Maßnahme angesehen werden, da die Fahrzeughalter diese direkt an das zuständige Hauptzollamt abführen müssen. Seit 2009 bemisst sich die jährlich zu entrichtende Kfz-Steuer nicht mehr nur am Hubraum eines Fahrzeugs, sondern aus einer Kombination aus Hubraum und spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen (g CO<sub>2</sub>/km).<sup>88</sup> Im Strombereich kann dagegen die verpflichtende Einführung intelligenter Stromzähler (*Smart Meter Rollout*) als regulatorische Maßnahme betrachtet werden. Gemäß BMWi (2015a) soll es eine schrittweise Einführung bis zum Jahr 2032 geben. Die Kosten für Verbraucher sollen sich auf 20 € jährlich belaufen.<sup>89</sup>

### 2.2.3.2 Indirekte, finanzielle Betroffenheit

Neben der regulatorischen Betroffenheit für Gebäude- und Wohnungseigentümer, bestimmte Gesetze und Vorschriften (z. B. EnEV, EEWärmeG oder eine mögliche Ausweitung des EU-ETS) einzuhalten, bzw. der Möglichkeit, für Investitionen auf Förderprogramme zurückzugreifen (z. B. KfW-Kredite, Anreizprogramm Energieeffizienz), sind die privaten Haushalte von klimapolitischen Instrumenten über ihre Energie- und Konsumgüternachfrage auch indirekt bzw. finanziell betroffen.<sup>90</sup> Gesetze und Vorschriften in anderen Wirtschaftsbereichen drücken sich über dort veränderte Produktionskosten zu einem Teil in den Güterpreisen aus und wirken so auf das Budget der Haushalte mit entsprechend angepassten Nachfrageentscheidungen.<sup>91</sup>

Im Bereich der energetischen Gebäudesanierung richtet sich die Art und Weise, inwiefern private Haushalte betroffen sind, danach, ob es sich um Eigentümer oder Mieter handelt. Eigentümer können ihre Investitionskosten zu einem Teil durch Förderprogramme oder Mietpreiserhöhungen finanzieren. Mieter sehen sich in der Folge sowohl gestiegenen Mieten als auch einem geringeren Energiebedarf gegenüber, der sich je nach Ausmaß in einer höheren oder niedrigeren Warmmiete ausdrückt. Die Art und Weise, inwiefern Eigentümer die Kosten für energetische Gebäudesanierungsmaßnahmen auf Mieter weitergeben dürfen, wurde mit Einführung der Mietrechtsnovellierungsgesetz (MietNovG) am 1. Juni 2015 eingegrenzt, wonach Mietpreiserhöhungen von Bestandsimmobilien die ortsübliche Vergleichsmiete nur

---

<sup>87</sup> Vgl. BReg, 2008.

<sup>88</sup> Gemäß Kraftfahrzeugsteuergesetz (KraftStG) fallen ab einer bestimmten Freigrenze (95 g CO<sub>2</sub>/km seit 1.1.2014) 2 € pro g CO<sub>2</sub>/km an (vgl. Gawel, 2010). Die CO<sub>2</sub>-basierte Kfz-Steuer ließe sich auch in die Kategorie der finanziellen Betroffenheit einordnen. Klier & Linn, 2012 vergleichen die CO<sub>2</sub>-basierte Kfz-Steuer in Deutschland mit denen in Schweden und Frankreich.

<sup>89</sup> Durch die Einführung intelligenter Stromzähler soll gewährleistet werden, dass Strommarktakteure zeitnah über zuverlässige Informationen verfügen. Näheres in BMWi, 2015a.

<sup>90</sup> Das Anreizprogramm Energieeffizienz ersetzt die im Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) ursprünglich geplante steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung (vgl. BReg, 2015d, S. 78).

<sup>91</sup> Zu einem gewissen Grad ist diese Lenkungswirkung vom Gesetzgeber meist beabsichtigt. Näheres dazu in Abschnitt 2.3.2.

um maximal 10 % übersteigen dürfen.<sup>92</sup> Ob die energetische Gebäudesanierung für Eigentümer oder Mieter eine jeweils kostenbe- oder entlastende Wirkung entfaltet und im Idealfall zu warmmietenneutralen Mieterhöhungen führt, ist im Vorfeld nicht klar. Neben dem Grad der Mietpreiserhöhung hängt dies hauptsächlich von der zukünftigen Energiepreisentwicklung ab, die die resultierende Energiekostensparnis maßgeblich determiniert. Weitere Einflussgrößen für die Wirtschaftlichkeit energetischer Gebäudesanierungen im Mietwohnungsbestand sind u. a. der zugrunde liegende Kalkulationszins, der Betrachtungszeitraum und die ortsübliche Vergleichsmiete.<sup>93</sup>

Gesetze und Vorschriften im Sinne der EnEV und EEWärmeG lassen sich als Technologienregulierung im Wärmebereich einordnen. Im Verkehrsbereich stellen die EU-weit geregelten CO<sub>2</sub>-Grenzwerte ebenfalls eine Technologienregulierung dar. Gemäß Verordnung (EG) Nr. 443/2009 sollen die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte im Durchschnitt aller neu zugelassenen PKW in der EU im Jahr 2015 maximal 130 g CO<sub>2</sub>/km betragen und bis 2021 auf 95 g CO<sub>2</sub>/km weiter reduziert werden.<sup>94</sup> Der Zielwert von 130 g CO<sub>2</sub>/km gilt für jeden Hersteller und ist durch Verbesserungen bei der Motorentechnik sowie innovative Technologien zu erreichen. Für jeden Hersteller wird er als Durchschnitt der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen jedes neu in der EU zugelassenen PKW desselben Herstellers berechnet. Bei einer Überschreitung des Zielwertes sind Strafzahlungen fällig.<sup>95</sup>

Tabelle 2-7 zeigt den Durchschnittswert der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller neu zugelassenen PKW in der EU im Zeitraum 2000 bis 2013 und stellt sie den Zielen für 2015 und 2020 gegenüber. Demnach wurde der angestrebte Zielwert von 130 g CO<sub>2</sub>/km für das Jahr 2015 bereits im Jahr 2013 unterschritten.

**Tabelle 2-7:** Durchschnittswert der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller neu zugelassenen PKW in der EU im Zeitraum 2000 bis 2020 in g CO<sub>2</sub>/km (historische Werte und Zielwerte)

	<i>Historie</i>								<i>Ziele</i>	
	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2013	2015	2020
g CO <sub>2</sub> /km	172	167	164	162	154	140	132	127	130	95

Quelle: EEA, 2014

Je nachdem, inwiefern die Fahrzeughersteller sich gestiegenen Produktionsanforderungen gegenüber sehen und mögliche Zusatzkosten auf den Fahrzeugpreis aufschlagen und an die Endverbraucher weitergeben, sind die privaten Haushalte durch die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte von

<sup>92</sup> Das MietNovG trägt den Namen „Gesetz zur Dämpfung des Mietanstiegs auf angespannten Wohnungsmärkten und zur Stärkung des Bestellerprinzips bei der Wohnungsvermittlung“ (vgl. BReg, 2015b).

<sup>93</sup> Vgl. Discher et al., 2010.

<sup>94</sup> Vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2009a. Die Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 hat die bestehende Verordnung durch Festlegung von Modalitäten zur Zielerreichung erweitert.

<sup>95</sup> Vgl. auch BMUB, 2009.

PKW mehr oder weniger finanziell bzw. indirekt von der klimapolitischen Regulierung betroffen.

Ähnliches gilt auch für die Regelungen der EU-Ökodesign-Richtlinie und der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung, die sich unter Umständen in gestiegenen Konsumgüterpreisen niederschlagen können. Das EU-Energielabel wird über die europäische Energieverbrauchskennzeichnungsrichtlinie 2010/30/EU geregelt, die in Deutschland durch das Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz (ENVKG) umgesetzt wurde und unter anderem auch Gesetzesgrundlage für den Energieausweis von Gebäuden ist.

Aktuell sind als weitere klimapolitische Instrumente im PKW-Bereich ein staatlich gewährter Kaufzuschuss für Elektrofahrzeuge (sog. „Umweltbonus“ oder „Kaufprämie“) in Höhe von 5.000 € sowie eine verpflichtende Quote für Elektrofahrzeuge in der Diskussion.<sup>96</sup>

Im Vergleich zur Technologienregulierung, die sich eher langsam über neue PKW und neue Gebäude bzw. Heizungsanlagen (langlebige Gebrauchsgüter) auf die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte auswirkt, haben Energiepreisänderungen oft einen unmittelbareren Einfluss auf die Energienachfrage, da Energie nicht wie PKW oder Gebäude über längere Zeiträume verwendet, sondern meist direkt verbraucht wird und somit Kaufentscheidungen im Zeitverlauf häufiger getroffen werden.

Bei der Energienachfrage ist zunächst zu unterscheiden zwischen fossilen Brennstoffen mit direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Strom, bei dessen Verbrauch keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen in privaten Haushalten anfallen. Die Preise für Mineralöl, Erdgas und Kohle werden für private Haushalte durch unterschiedliche klimapolitische Instrumente beeinflusst. Neben der oben diskutierten möglichen Ausweitung des EU-ETS (upstream oder downstream) spielen hier vor allem Energiesteuern eine Rolle, die im Wesentlichen im Energiesteuergesetz (EnergieStG) geregelt werden. Das Gesetz wurde im Zuge der ökologischen Steuerreform im Jahr 1999 ins Leben gerufen und hat das Mineralölsteuergesetz (MinöStG) abgelöst.<sup>97</sup> Es regelt die Besteuerung des Verbrauchs von Mineralöl, Erdgas und Kohle.

Tabelle 2-8 stellt Preise und Kostenkomponenten verschiedener Energieträger im Haushaltsbereich gegenüber. Für Benzin und Diesel sind beispielsweise 65,45 ct/l (7,35 ct/kWh) bzw. 47,04 ct/l (4,80 ct/kWh) an Energiesteuern zu entrichten, für leichtes Heizöl 6,14 ct/l (0,61 ct/kWh) und für Erdgas 0,55 ct/kWh.<sup>98</sup> Die Stromsteuer gemäß Stromsteuergesetz

---

<sup>96</sup> Vgl. Hendricks, 2015 sowie DIE WELT, 26.02.16. Nachrichtliche Anmerkung: Am 27.04.2016 wurde eine Kaufprämie in Höhe von 4.000 € für reine Elektroautos bzw. 3.000 € für Plug-In Hybride beschlossen (vgl. BMWi, 2016). Dieser Beschluss konnte aber in der vorliegenden Arbeit nicht mehr berücksichtigt werden, da die Modellrechnungen in Abschnitt 4 vor Bekanntwerden des Beschlusses bereits fertig gestellt waren.

<sup>97</sup> Die ökologische Steuerreform sah vor, die zusätzlichen Einnahmen aus der Energiebesteuerung für eine entsprechende Senkung der Rentenversicherungsbeiträge zu verwenden. Durch diese aufkommensneutrale Umschichtung der Steuern und Abgaben vom Faktor Arbeit auf den Faktor Umwelt sollte eine sogenannte doppelte Dividende erzielt werden (vgl. Böhringer & Schwager, 2003).

<sup>98</sup> Energiesteuern sind Verbrauchssteuern im Sinne der Abgabenordnung. Für weitere Details vgl. BReg (2006).

(StromStG) beträgt 2,05 ct/kWh. In der Regel müssen die privaten Haushalte die Steuern und Abgaben aber nicht selbst an den Staat zahlen bzw. abführen – Steuerschuldner sind in der Regel die Energieproduzenten und Energiehändler – müssen sie aber über entsprechende Preisaufschläge letztlich wirtschaftlich tragen.

Darüber hinaus wird derzeit vermehrt eine (Mengen-)Steuer auf den Kohlenstoffanteil in fossilen Brennstoffen in die Diskussion eingebracht, die auch als „CO<sub>2</sub>-Steuer“ bezeichnet wird. Sie soll ähnlich der Zertifikatspreise im EU-ETS einen brennstoffneutralen Preis pro ausgestoßene Einheit CO<sub>2</sub> bzw. CO<sub>2</sub>-Äquivalent festlegen. Weltweit gibt es sie bereits in einigen Ländern, darunter Frankreich, Japan und das Vereinigte Königreich – in Deutschland bislang nicht.<sup>99</sup> Tabelle 2-8 gibt Aufschluss über die Höhe einer möglichen CO<sub>2</sub>-Steuer für die einzelnen Energieträger, unterschieden nach möglichen zugrunde liegenden CO<sub>2</sub>-Preisen in Höhe von 7 €/t CO<sub>2</sub> (aktuell) oder 50 €/t CO<sub>2</sub> (potentiell, langfristig). Für Benzin, Diesel, Heizöl und Erdgas läge eine CO<sub>2</sub>-Steuer dementsprechend bei rund 0,2 ct/kWh bzw. 1,0 bis 1,3 ct/kWh. Für Kohle läge sie mit 0,25 bzw. 1,76 ct/kWh deutlich höher.

**Tabelle 2-8:** Preise, Kosten und CO<sub>2</sub>-Gehalt einzelner Energieträger im Jahr 2015

	Einheit	Benzin	Diesel	Heizöl	Erdgas	Holz- pellets	Kohle
<b>Heizwert</b>	(kWh/Menge <sup>*</sup> )	8,9	9,8	10	8,8	4,9	8,4
<b>CO<sub>2</sub>-Gehalt</b>	(t CO <sub>2</sub> /TJ)	72	74	74	56	7	98
	(g CO <sub>2</sub> /kWh)	259	266	266	202	26	353
<b>Preis (brutto, ohne MWSt.)</b>	(ct/Menge <sup>*</sup> )	108,7	91,3	48,5	50,1	22,2	7,6
	(ct/kWh)	12,21	9,32	4,85	5,68	4,52	0,90
<b>Energiesteuer</b>	(ct/Menge <sup>*</sup> )	65,45	47,04	6,14	4,85	-	1,00
	(ct/kWh)	7,35	4,80	0,61	0,55	-	0,12
<b>Preis (netto)</b>	(ct/Menge <sup>*</sup> )	43,25	44,30	42,33	45,23	22,16	6,55
	(ct/kWh)	4,86	4,52	4,23	5,13	4,52	0,78
<b>CO<sub>2</sub>-Kosten bei 7 €/t CO<sub>2</sub></b>	(ct/Menge <sup>*</sup> )	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,03
	(ct/kWh)	0,18	0,19	0,19	0,14	0,02	0,25
<b>CO<sub>2</sub>-Kosten bei 50 €/t CO<sub>2</sub></b>	(ct/Menge <sup>*</sup> )	0,15	0,14	0,13	0,11	0,03	0,21
	(ct/kWh)	1,30	1,33	1,33	1,01	0,13	1,76

(\*) Liter bei Benzin, Diesel und Heizöl; m<sup>3</sup> bei Erdgas; kg bei Holzpellets und Kohle

Quellen: DEPI, 2016, Destatis, 2016 und Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2014

Der Stromverbrauch hat in privaten Haushalten keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge. Über den Strompreis sind private Haushalte aber mittelbar von der klimapolitischen Regulierung des Stromsektors betroffen. Relative Änderungen des Strompreises im Vergleich zu anderen Energiepreisen beeinflusst die Energienachfrage privater Haushalte und damit auch ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die stromverbrauchsbezogenen Kosten werden durch die Ausgestaltung des EU-ETS, des EEG sowie durch andere Maßnahmen beeinflusst.

<sup>99</sup> Vgl. Kossoy et al., 2015.

Tabelle 2-9 listet die Bestandteile des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises in Deutschland im Februar 2015 bei 3.500 kWh Jahresverbrauch auf.<sup>100</sup> Demnach setzte sich der durchschnittliche Strompreis für einen Privathaushalt mit einem Jahresverbrauch von 3.500 kWh wie folgt zusammen. Jeweils ein Viertel des Preises von 29 ct/kWh entfiel auf Erzeugungskosten (Beschaffung und Vertrieb) und Netzentgelte. Die Erzeugungskosten beinhalten auch Kosten für ETS-Zertifikate, die sich bei einem ETS-Zertifikatspreis von 7 €/t CO<sub>2</sub> und einem spezifischen jahresdurchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des deutschen Strommixes von 569 g CO<sub>2</sub>/kWh gemäß UBA (2015) auf schätzungsweise 0,4 ct/kWh beliefen. Dies entspricht 6 % der Erzeugungskosten und 1,4 % des Haushaltsstrompreises. Die andere Hälfte des Strompreises entfiel auf Steuern, Abgaben und Umlagen. Darunter machte die EEG-Umlage mehr als ein Drittel aller Steuern, Abgaben und Umlagen aus. Knapp die Hälfte entfiel auf Mehrwert- und Stromsteuer. Die Konzessionsabgabe machte 5,8 % vom Strompreis aus. Alle sonstigen Strompreisbestandteile (z. B. KWK-Aufschlag oder Offshore-Haftungsumlage) fielen mit zusammen 1,5 % weniger ins Gewicht.<sup>101</sup>

**Tabelle 2-9:** Bestandteile des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises in Deutschland im Februar 2015 (bei 3.500 kWh Jahresverbrauch)

	ct/kWh	Anteil	Veränderung ggü. 2006
Haushaltsstrompreis (02/2015)	28,81	100 %	48 %
Kosten für Erzeugung und Vertrieb	7,12	25 %	45 %
davon: CO <sub>2</sub> -Kosten bei 7 €/t CO <sub>2</sub>	0,40	1,4 %	-56 %
Netzentgelt	6,76	23 %	-2 %
Steuern, Abgaben, Umlagen:	14,93	52 %	96 %
- EEG-Umlage	6,17	21 %	601 %
- Mehrwertsteuer	4,60	16 %	72 %
- Stromsteuer	2,05	7,1 %	0 %
- Konzessionsabgabe	1,66	5,8 %	0 %
- KWK-Aufschlag	0,25	0,9 %	-25 %
- §19 StromNEV-Umlage	0,28	0,8 %	-
- Umlage für abschaltbare Lasten	0,01	0,0 %	-
- Offshore-Haftungsumlage	-0,05	-0,2 %	-

Quelle: BDEW, 2015; Stand: 02/2015; Die Offshore-Haftungsumlage ist wegen Nachverrechnung negativ

In Tabelle 2-9 wird auch deutlich, dass sich die Strompreiskomponenten in den letzten zehn Jahren unterschiedlich entwickelt haben. Am deutlichsten ist die Entwicklung der EEG-Umlage, die sich von 0,88 ct/kWh im Jahr 2006 auf 6,15 ct/kWh im Jahr 2015 versiebenfacht hat. Die Summe aus Steuern, Abgaben und Umlagen hat sich insgesamt verdoppelt. Die Erzeugungskosten sind um knapp die Hälfte gestiegen, während die impliziten indirekten CO<sub>2</sub>-Kosten, aufgrund des ETS-Preisrückgangs von rund 15 €/t CO<sub>2</sub> (Durchschnittspreis im Jahr

<sup>100</sup> Vgl. BDEW, 2015.

<sup>101</sup> Die Offshore-Haftungsumlage ist hier wegen Nachverrechnung negativ (vgl. BDEW, 2015).

2006) auf 7 €/t CO<sub>2</sub> und einem leicht gesunkenen jahresdurchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 605 auf 569 g CO<sub>2</sub>/kWh, um mehr als die Hälfte zurückgegangen sind.<sup>102</sup> Die Netzentgelte sind dagegen relativ konstant geblieben. Zwischen 2009 und 2015 sind die Erzeugungskosten dagegen um 3 % pro Jahr gesunken, während die Netzentgelte um 3 % pro Jahr gestiegen sind.<sup>103</sup> Stromsteuer und Konzessionsabgabe blieben in ihrer absoluten Höhe – aufgrund ihrer Eigenschaft als Mengensteuer – konstant.

### 2.3 Umweltökonomische Theorie

Die volkswirtschaftliche Analyse und Bewertung der in Abschnitt 2.2 beschriebenen klimapolitischen Ziele und Instrumente in Deutschland und der EU basieren auf der umweltökonomischen Theorie, deren Grundlagen im Folgenden beschrieben werden. Dazu wird zunächst auf die zentralen Begriffe Marktversagen, externe Effekte und öffentliche Güter eingegangen. Anschließend werden die verschiedenen Typen umweltökonomischer Instrumente sowie die umweltökonomischen Bewertungskriterien vorgestellt, die insbesondere für die Modellentwicklung und modellgestützte Analyse in Abschnitt 3.4 bzw. Abschnitt 4 von essentieller Bedeutung sind.

#### 2.3.1 Externe Effekte, Marktversagen und öffentliche Güter

Nach dem ökonomischen Prinzip sollte Klimaschutz möglichst effektiv und effizient, das heißt kostengünstig, sein.<sup>104</sup> Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde, ist die deutsche und europäische Klimapolitik allerdings geprägt durch eine Vielzahl klimapolitischer Instrumente, von denen nicht auszuschließen ist, dass sie sich gegenseitig behindern und somit einen kostengünstigen Klimaschutz verhindern. Im Folgenden sollen die Grundzüge der umweltökonomischen Theorie beschrieben werden, auf denen die Modellentwicklung und die modellgestützte Analyse der klimapolitischen Instrumente aufbauen.

#### *Marktversagen durch externe Effekte*

Die Notwendigkeit für staatliche Eingriffe in das allgemeine Wirtschaftsgeschehen und damit für wirtschaftspolitisches Handeln leitet sich aus einem bestimmten Ausmaß von Marktversagen her.<sup>105</sup> In der ökonomischen Theorie stellt der Markt eine Art Referenzsystem dar, des-

---

<sup>102</sup> Vgl. EEA, 2015b sowie UBA, 2015.

<sup>103</sup> Vgl. BDEW, 2015, S.3. Der Anstieg der Netzentgelte könnte auf die verstärkt dezentral stattfindende Stromerzeugung und die damit verbundenen technischen Herausforderungen an einen sicheren Netzbetrieb (inklusive Netzausbau) zurückzuführen sein, da der Strom unter anderem aus erneuerbaren Energiequellen bundesweit aufgenommen und oft über weite Strecken von den dezentralen Erzeugungsanlagen zu den Verbrauchszentren transportiert werden muss (BMW, 2014a, S. 56).

<sup>104</sup> Das ökonomische Prinzip besagt, dass ein bestimmter Erfolg mit dem geringstmöglichen Mitteleinsatz (Minimalprinzip) bzw. mit einem bestimmten Mitteleinsatz der größtmögliche Erfolg (Maximalprinzip) erzielt werden soll (Gabler, 2015f).

<sup>105</sup> Unter einem Markt sind sämtliche Austauschprozesse zu verstehen, die aus dem Zusammentreffen von eigennützig handelnden Anbietern und Nachfragern entstehen und nicht zentral geplant sind (Fritsch et al., 2005, S. 6 und 19).

sen Funktionsfähigkeit für ein soziales Wohlfahrtsoptimum von zentraler Bedeutung ist.<sup>106</sup> Dabei lassen sich verschiedene Funktionen unterscheiden, damit ein Markt als funktionsfähig eingestuft werden kann. Dazu zählt unter anderem die Lenkung der Produktionsfaktoren in ihre jeweils produktivste Verwendungsrichtung oder die Erstellung und Verteilung des Angebots an Gütern und Dienstleistungen entsprechend der Konsumentenpräferenzen.<sup>107</sup> In diesem Zusammenhang stellt ein perfekt funktionierender Markt ein soziales Optimum dar, das in der Wohlfahrtsökonomik auch als Pareto-Optimum bezeichnet wird. Eine gesellschaftliche Situation ist dann pareto-optimal, wenn es nicht möglich ist, die Wohlfahrt eines Individuums durch eine Re-Allokation der Ressourcen zu erhöhen, ohne gleichzeitig die eines anderen Individuums zu verringern.<sup>108</sup> Diese Situation ist in der Regel dann gegeben, wenn die Annahmen des Modells der vollständigen Konkurrenz erfüllt sind. Diese umfassen unter anderem eine atomistische Marktstruktur, vollständige Information, unbegrenzte Mobilität von Produktionsfaktoren sowie die Abwesenheit von Unteilbarkeiten und unfreiwilligen Austauschbeziehungen (externe Effekte).<sup>109</sup>

Marktversagen liegt schließlich vor, wenn (mindestens) eine der Annahmen des Modells der vollständigen Konkurrenz verletzt ist und die Funktionsfähigkeit des Marktes beeinträchtigt ist.<sup>110</sup> Als gängige Auslöser für Marktversagen und Begründer für wirtschaftspolitisches Eingreifen gelten vor allem externe Effekte, Unteilbarkeiten und Informationsmängel.<sup>111</sup>

Die Umweltpolitik, zu der auch die Klimapolitik zuzuordnen ist, zielt vor allem auf die Beseitigung von Umweltproblemen ab, die überwiegend durch negative externe Effekte hervorgerufen werden. Umweltprobleme bezeichnen Beeinträchtigungen für Menschen, Sachgüter und Produktionsbedingungen, die durch Übernutzung der natürlichen Umwelt als Aufnahmemedium für Schadstoffe entstehen.<sup>112</sup> Bei der Emission von Treibhausgasen kommt es zu einer Übernutzung der Atmosphäre, indem die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre im Zuge der weltweiten Treibhausgasemissionen in solch einem Maße steigt, dass es zu einer allgemeinen Klimaerwärmung mit damit zusammenhängenden Klimaschäden kommt (Klimawandel).

---

<sup>106</sup> Als soziale Wohlfahrt lässt sich die Summe der Nutzen aller Gesellschaftsmitglieder verstehen (Endres, 2012, S. 32).

<sup>107</sup> Vgl. Fritsch et al., 2005, S. 20.

<sup>108</sup> Vgl. Gabler, 2015c.

<sup>109</sup> Für eine vollständige Beschreibung vgl. Fritsch et al., 2005, S. 26 ff. Das Modell der vollständigen Konkurrenz wird in der Modellentwicklung unten in Abschnitt 3.4 erneut aufgegriffen.

<sup>110</sup> Die Entscheidung, ob Marktversagen vorliegt oder nicht, ist dabei immer ein Ergebnis argumentativer Überlegungen und lässt sich nicht mit wissenschaftlicher Exaktheit bestimmen (vgl. Fritsch et al., 2005, S. 81).

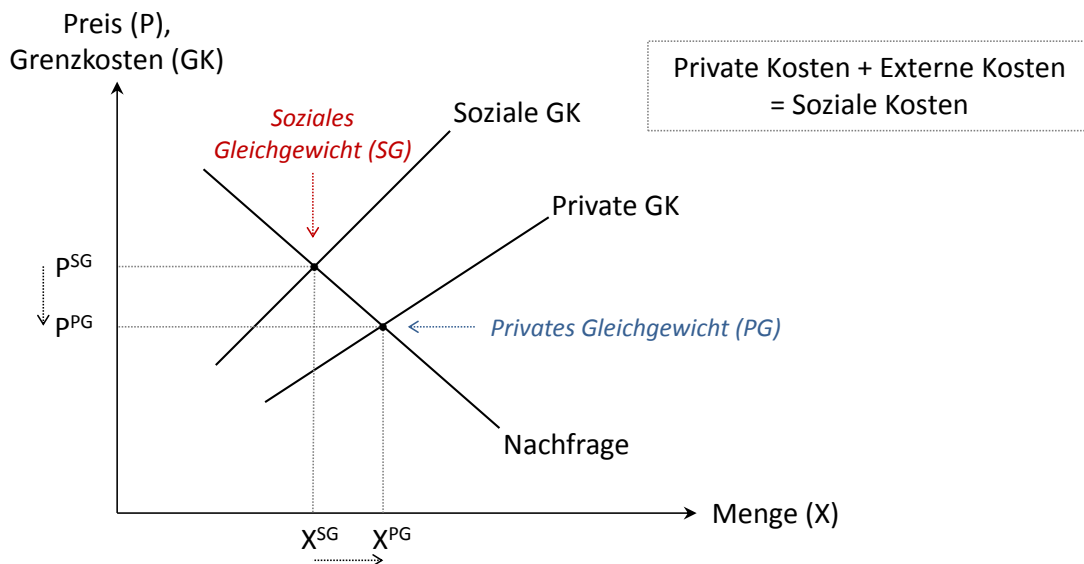
<sup>111</sup> Vgl. Fritsch et al., 2005, S. 81 ff.

<sup>112</sup> Gabler, 2015e.



Externe Effekte bezeichnen die Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten auf Dritte, die zu einem Teil nicht über Marktbeziehungen vergütet werden.<sup>113</sup> Das heißt, es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den Gewinn- bzw. Nutzenfunktionen mehrerer Wirtschaftsakteure, der nicht durch den Marktmechanismus erfasst wird und in einer preislichen Kompensation vergütet wird.<sup>114</sup> Dies kommt einer Verletzung des Verursacherprinzips gleich, wonach ein Dritter von einem Entscheidungsträger in seinem Nutzen/Gewinn beeinträchtigt wird, ohne dass die Folgen der Entscheidung auf den Verursacher zurückfielen.<sup>115</sup> Die Folge dieser „außermarktlichen“ Beziehung ist, dass die einzelwirtschaftlichen (privaten) Kosten von den gesamtgesellschaftlichen (sozialen) Kosten abweichen. Die sich daraus ergebende Differenz wird als externe Kosten bezeichnet, die auch aus einer Monetarisierung des externen Effekts resultieren. Mithilfe der mikroökonomischen Theorie kann gezeigt werden, dass bei Vorliegen externer Kosten die produzierte Menge eines Gutes aus gesamtgesellschaftlicher Sicht zu hoch und der Preis entsprechend zu niedrig ist.<sup>116</sup> Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Weichen soziale und private Kosten bei Vorliegen externer Kosten voneinander ab, ist die Produktionsmenge (X) im privaten Gleichgewicht höher und der Preis (P) des produzierten Gutes niedriger als im sozialen Gleichgewicht.

**Abbildung 2-6:** Preis- und Mengeneffekte bei Vorliegen externer Kosten



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Fritsch et al., 2005, S. 94 und Tietenberg & Lewis, 2012, S. 26.

Die anthropogen erhöhte Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und der dadurch begründete Klimawandel können als negativer externer Effekt betrachtet werden, weil die durch

<sup>113</sup> Hiermit sind technologische externe Effekte gemeint. Daneben gibt es noch pekuniäre und psychologische externe Effekte, die aber für die Umweltpolitik kein bzw. nur ein untergeordnetes Problem darstellen (vgl. Fritsch et al., 2005, S. 88 ff).

<sup>114</sup> Vgl. Fritsch et al., 2005, S. 89.

<sup>115</sup> Für die Umweltpolitik sind fast ausschließlich negative externe Effekte von Relevanz. Positive externe Effekte werden hier nicht weiter berücksichtigt.

<sup>116</sup> Vgl. Fritsch et al., 2005, S. 92 ff.

die Klimaerwärmung entstehenden Klimaschäden nicht in die privaten Kosten von Treibhausgasemittenten eingepreist sind. Stattdessen werden die Klimaschäden zu einem Großteil von anderen Wirtschaftsakteuren getragen. Diese sind sowohl in sachlicher, räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht zu unterscheiden. Innerhalb eines Landes sind zunächst die größten Treibhausgas-Emittenten, als primäre Verursacher von Klimaschäden, gleich stark betroffen wie andere, nicht bzw. weniger emittierende Produzenten und Konsumenten. Auf globaler Ebene gibt es zahlreiche Entwicklungsländer, die nur einen geringen Teil zur erhöhten Treibhausgaskonzentration beitragen, die aber von den Folgekosten stärker betroffen sind als viel emittierende Industrieländer.<sup>117</sup> In der zeitlichen Dimension wirken sich die Klimaschäden von heute getätigten Emissionen erst in der Zukunft aus, so dass zukünftige Generationen stärker betroffen sind als heutige.

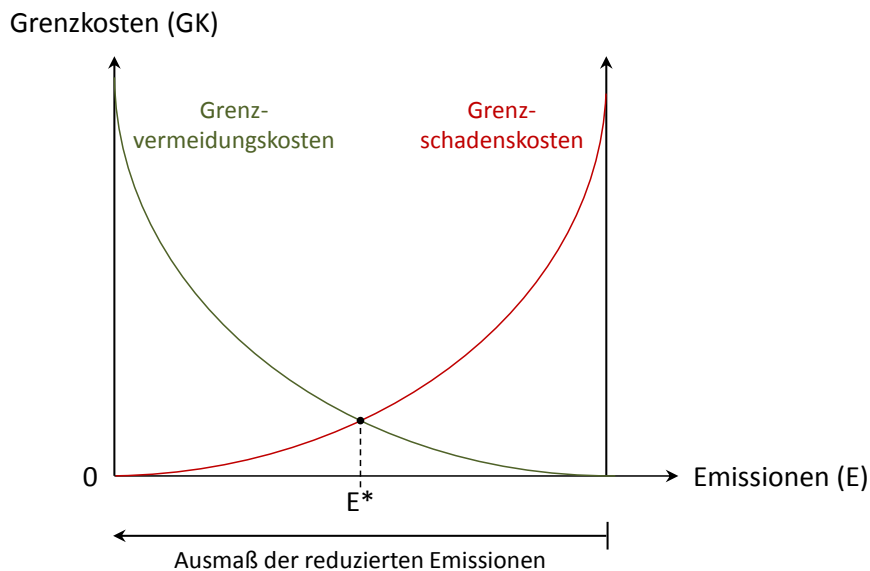
Obwohl externe Effekte zu unerwünschten Marktergebnissen führen, ist es aus ökonomischen Gründen nicht sinnvoll, die durch die externen Effekte hervorgerufene Schädigung vollständig zu vermeiden. Dies lässt sich am Beispiel von Treibhausgasemissionen und Klimawandel illustrieren. Unterstellt man, dass jede zusätzlich emittierte Einheit zu umso größeren Klimaschäden führt, je weiter der Klimawandel bereits fortgeschritten ist, ergibt sich eine gemäß Abbildung 2-7 dargestellte steigende Grenzschadenskostenfunktion. Unterstellt man zudem, dass jede zusätzlich vermiedene Emissionseinheit zu umso größeren Vermeidungskosten führt, je weiter die Treibhausgasemissionen bereits zurückgefahren bzw. vermieden worden sind, ergibt sich die in derselben Abbildung dargestellte steigende Funktion der Grenzvermeidungskosten, die auch als Opportunitätsgrenzkosten einer Verminderung des Produktionsniveaus interpretiert werden kann.<sup>118</sup> In einer Situation, wie in Abbildung 2-7, ist weder keine noch eine vollständige Schadensvermeidung ökonomisch sinnvoll. Das optimale Emissionsniveau liegt vielmehr dort, wo die Grenzkosten einer zusätzlichen emittierten Einheit dem Grenznutzen einer zusätzlich vermiedenen Emissionseinheit entsprechen (Grenzschadenskosten = Grenzvermeidungskosten). Eine über diesen Punkt hinaus gehende Emissionsvermeidung würde zu höheren Kosten führen als sie Nutzen in Form vermiedener Schäden stiften würde.

---

<sup>117</sup> Ein Beispiel hierfür sind die Malediven, die durch einen steigenden Meeresspiegel gefährdet sind (vgl. Schellnhuber, 2015).

<sup>118</sup> Das wiederum stellt den Nettonutzen dar, auf den die Konsumenten verzichten, wenn die Produktion des betrachteten Gutes eingeschränkt wird (vgl. Endres, 2012, S. 39).

**Abbildung 2-7:** Optimales Emissionsniveau als Schnittpunkt von Grenzschadens- und Grenzvermeidungskosten



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Fritsch et al., 2005, S. 97.

### Öffentliche Güter

Eine weitere Implikation externer Effekte ist, dass Eigentumsrechte des betreffenden Gutes nicht einwandfrei durchgesetzt werden können. Bei positiven externen Effekten bedeutet dies, dass Dritte von der Nutzung nicht vollständig ausgeschlossen werden können, das heißt, sie können das Gut zum Teil kostenlos nutzen. Bei negativen externen Effekten bedeutet dies im Umkehrschluss, dass Dritte ein bestimmtes Maß an Schädigung ohne Kompensation hinnehmen müssen. Güter, bei denen das Ausschlussprinzip nicht vollständig angewendet werden kann, werden als öffentliche Güter bezeichnet. Das Klima ist ein typisches öffentliches Gut, von deren Nutzung niemand ausgeschlossen werden kann, auch nicht in seiner negativen Ausprägung in Form von Nutzenverlusten durch Klimaschäden. Hinzu kommt eine Nicht-Rivalität im Konsum, das heißt, ein weiterer Nutzer (Geschädigter) beeinträchtigt (verbessert) nicht den Nutzen (Schaden) der anderen Nutzer (Geschädigten). Das Klima kann somit als reines öffentliches Gut eingestuft werden.<sup>119</sup>

Die Atmosphäre ist dagegen im Sinne einer Umweltdeponie zur Aufnahme von Schadstoffen kein reines öffentliches Gut, sondern ein quasi-öffentliches Gut, ein so genanntes Allmendegut, da es ab einem gewissen Nutzungsgrad zu einer Rivalität im Konsum kommt. Eine zu hohe Treibhausgaskonzentration führt zu einer Klimaerwärmung und in der Folge zu Klimaschäden. Umweltgüter sind typischerweise Allmendegüter, bei denen es zu der so genannten Tragik der Allmende kommt. Dieser Begriff bezeichnet eine Übernutzung von Allmendegütern, die dadurch entsteht, dass von den Nutzern bei steigender Rivalität im Konsum aufgrund der Nicht-Ausschließbarkeit keine Knappheitspreise „gezahlt“ werden müssen und

<sup>119</sup> Der Begriff *Gut* ist hier im weiteren Sinne zu verstehen. Klimaschäden sind streng genommen kein öffentliches Gut, sondern eine öffentliche Last (*Public Bad*).

dadurch die optimale Nachfragemenge aus privater Sicht höher liegt als die optimale Nachfragemenge aus sozialer Sicht (vgl. Abbildung 2-6). Individuell rationales Verhalten führt in dieser Situation zu kollektiver Schädigung, ein Phänomen, das auch als Gefangenendilemma bekannt ist.<sup>120</sup>

Das Ziel der Klimaschutzpolitik ist es daher, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, um unerwünschte Klimaschäden zu vermeiden.<sup>121</sup> Der Klimaschutz an sich kann wiederum als reines öffentliches Gut betrachtet werden, bei dessen Nutzung das Ausschließbarkeitsprinzip nicht angewendet werden kann und zudem keine Rivalität im Konsum besteht. Bei der international notwendigen Kooperation kommt es zum so genannten Trittbrettfahrerproblem, wonach die Gefahr besteht, dass manche Länder von den Klimaschutzanstrengungen anderer profitieren, ohne eine entsprechende Gegenleistung zu erbringen, weil sie keinen Anreiz haben, freiwillig die Vermeidungskosten zu tragen und nicht dazu gezwungen werden können. Aus wohlfahrtsoptimaler Sicht fällt in dieser Situation die bereitgestellte Menge des öffentlichen Gutes Klimaschutz zu gering aus, so dass ein pareto-optimales Ergebnis verhindert wird.<sup>122</sup>

### 2.3.2 Umweltökonomische Bewertung klimapolitischer Instrumente

Zur Beseitigung des Marktversagens bei der Nutzung der Umwelt als Produktionsfaktor (Atmosphäre als Deponiegut) bzw. zur Eindämmung der negativen Folgen des anthropogenen Klimawandels stehen zahlreiche wirtschaftspolitische Eingriffsmöglichkeiten zur Verfügung. Klimapolitik kann als Summe der politischen Maßnahmen verstanden werden, die darauf abzielen, die Treibhausgasemissionen zu vermindern (Klimaschutz) oder bereits eintretende Klimaschäden durch entsprechende Maßnahmen abzumildern (Klimaanpassung). Im Folgenden wird der Begriff Klimapolitik, wie in Abschnitt 2.2, und wenn nicht anders gekennzeichnet, mit Klimaschutzpolitik gleichgesetzt, da Klimaanpassungsmaßnahmen für die ökonomischen Entscheidungen privater Haushalte eine untergeordnete Rolle spielen.

Aus umweltökonomischer Sicht sollte Klimapolitik so gestaltet sein, dass das Marktversagen infolge der externen Effekte bei der Nutzung der Umwelt als Produktionsfaktor derart beseitigt wird, dass ein pareto-optimales Ergebnis zustande kommt. Wie erwähnt, handelt es sich dabei nicht um eine vollständige Beseitigung der Externalitäten, sondern um das Finden des ökonomisch optimalen Ausmaßes der Externalitäten bzw. des optimalen Schädigungsniveaus.

---

<sup>120</sup> Weitere Ausführungen hierzu in Endres, 2012, S. 69 ff.

<sup>121</sup> Dabei ist Klimapolitik im Sinne von Klimaschutzpolitik zu verstehen. Im weiteren Sinne gehört auch die Klimaanpassung zur Klimapolitik, wonach Anpassungsmaßnahmen zu treffen sind, um Schäden des bereits eingetretenen Klimawandels zu reduzieren (vgl. u. a. Chambwera et al., 2014). Eine vollständige Klimapolitik berücksichtigt idealerweise beide Strategieoptionen und wägt sie gegeneinander ab, um zu einem kostenminimalen Ausmaß von Klimaschäden, Klimaschutz und Klimaanpassung zu gelangen (vgl. Beestermöller & Fahl, 2015, oder Bosello et al., 2010).

<sup>122</sup> Weitere Erläuterungen in Tietenberg & Lewis, 2012, S. 33 und Fritsch et al., 2005, S. 99 ff.

Eine ökonomisch rationale Klimapolitik sucht nach dem effizienten Treibhausgasemissionsniveau.

### ***Umweltökonomische Bewertungskriterien***

In der umweltökonomischen Theorie gibt es drei Bewertungskriterien, anhand derer klimapolitische Instrumente auf ihre Effizienzeigenschaften beurteilt werden können:<sup>123</sup>

- Ökologische Treffsicherheit
- Statische Effizienz (Kosteneffizienz)
- Dynamische Effizienz (dynamische Anreizwirkungen, z. B. für Innovationen)

Das Kriterium der ökologischen Treffsicherheit zielt auf die Effektivität des klimapolitischen Instruments ab. Ein Instrument ist ökologisch treffsicher, wenn das angestrebte (idealerweise optimale) Emissionsniveau in der Realität auch tatsächlich erreicht wird. Statische Effizienz bedeutet, dass das angestrebte Emissionsniveau mit den geringstmöglichen volkswirtschaftlichen Kosten erreicht wird. Dieses Kriterium wird auch als Kosteneffizienz bezeichnet. Das betrachtete Instrument ist aber erst dann ökonomisch effizient, wenn neben der Kosteneffizienz auch dynamische Effizienz vorliegt. Das bedeutet, dass das Instrument dazu beiträgt, umwelttechnische Innovationen anzureizen, um somit, beispielsweise über technischen Fortschritt, zukünftig geringere Vermeidungskosten herbeizuführen. Zusammengefasst sollten klimapolitische Instrumente demnach ökologisch effektiv und ökonomisch effizient sein (statisch und dynamisch).

### ***Typen klimapolitischer Instrumente***

Der umweltökonomische Lösungsansatz zur Beseitigung des Marktversagens infolge negativer externer Effekte besteht in der Einbeziehung der externen Kosten in die privaten Kosten, um einen Ausgleich zwischen privaten Kosten und sozialen Kosten herzustellen. Die Einpreisung von externen Kosten zur Wiederherstellung des Verursacherprinzips wird auch als Internalisierung externer Effekte bezeichnet.<sup>124</sup> Für die Internalisierung stehen unterschiedliche standardorientierte Instrumente zur Verfügung. Am gängigsten ist die Unterscheidung in folgende Gruppen:<sup>125</sup>

- Ordnungsrecht
  - Abgaben
  - Zertifikate
- } Marktbasierende Instrumente

Das Ordnungsrecht zielt darauf ab, die externen Kosten durch Auflagen, das heißt durch Gebote oder Verbote, per Zwang zu internalisieren. Dies kann durch Prozessnormen, Input- oder

<sup>123</sup> Vgl. Endres, 2012, S. 146 ff und Fritsch et al., 2005, S. 109 f.

<sup>124</sup> Vgl. Endres, 2012, S. 42 ff.

<sup>125</sup> Vgl. Endres, 2012, S. 129 ff, Fritsch et al., 2005, S. 109 ff und Tietenberg & Lewis, 2012, S. 370 ff.

Outputauflagen erfolgen. Beispiele hierfür sind die EnEV oder das EEWärmeG, die konkrete Vorschriften für die Errichtung von Neubauten beinhalten (vgl. Abschnitt 2.2.2.3).<sup>126</sup> Der Vorteil von Auflagen liegt darin, dass der Staat meist schnell und unmittelbar eingreifen kann, um die Nutzung bestimmter Prozesse oder Technologien zu regeln (z. B. durch Vorgabe bestimmter Grenzwerte). Ökologische Treffsicherheit kann dadurch relativ gut erreicht werden. Allerdings geht die staatliche Lenkungswirkung bei Auflagen aus einem planerischen Prozess hervor, der einen hohen Informationsbedarf hat (inklusive Kontrollaufwand). Daher liegt die Herausforderung darin, Auflagen so zu gestalten, dass sie neben der ökologischen Treffsicherheit auch Kosteneffizienz herstellen, das heißt, dass sie das gewünschte Emissionsniveau zu geringstmöglichen Kosten erreichen. Dies ist in der Realität aufgrund der Unkenntnis über individuelle Grenzvermeidungskosten jedoch allenfalls zufällig zu schaffen.<sup>127</sup> Auch die dynamischen Anreizwirkungen sind als begrenzt einzustufen, da es wenig Anreize für die betroffenen Wirtschaftsakteure gibt, in die Erforschung zusätzlicher Vermeidungstechnologien zu investieren, um die regulierten Emissionen über das vorgegebene Maß hinaus zu vermeiden. Zudem kommt es bei Energieeffizienzpolitiken zu möglichen Rebound-Effekten, die *ceteris paribus* eine Mehrnachfrage nach Energie infolge von Effizienzsteigerungen beschreiben.<sup>128</sup>

In Bezug auf ihre ökonomische Effizienz sind Abgaben und Zertifikatehandel als marktba-sierte Instrumente in der Regel zielführender als Auflagen. Hier wird versucht, die gewünschte Lenkungswirkung über einen preislichen Anreiz herbeizuführen. Dabei lassen sich zwei Perspektiven unterscheiden:

- Preissteuerung mit Mengenrisiko (Abgaben)
- Mengensteuerung mit Preisrisiko (Zertifikate)

Durch Abgaben wird einer Emissionseinheit in Form einer Steuer ein bestimmter Preis zugeordnet. Idealerweise ist der Preis bzw. der Steuersatz exakt so hoch, dass sich das wohlfahrts-optimale Emissionsniveau einstellt (Soziale Grenzkosten = Private Grenzkosten). In diesem Fall handelt es sich um eine sogenannte *Pigou*-Steuer, deren Wirkungsweise in Abbildung 2-8 dargestellt ist.<sup>129</sup> Da die individuellen Grenzvermeidungskosten aber in der Regel unbekannt sind, scheitert in der Realität die Einführung einer *Pigou*-Steuer zur wohlfahrtsoptimalen Internalisierung negativer externer Effekte daran, dass der wohlfahrtsoptimale Steuersatz nicht bestimmbar ist.

---

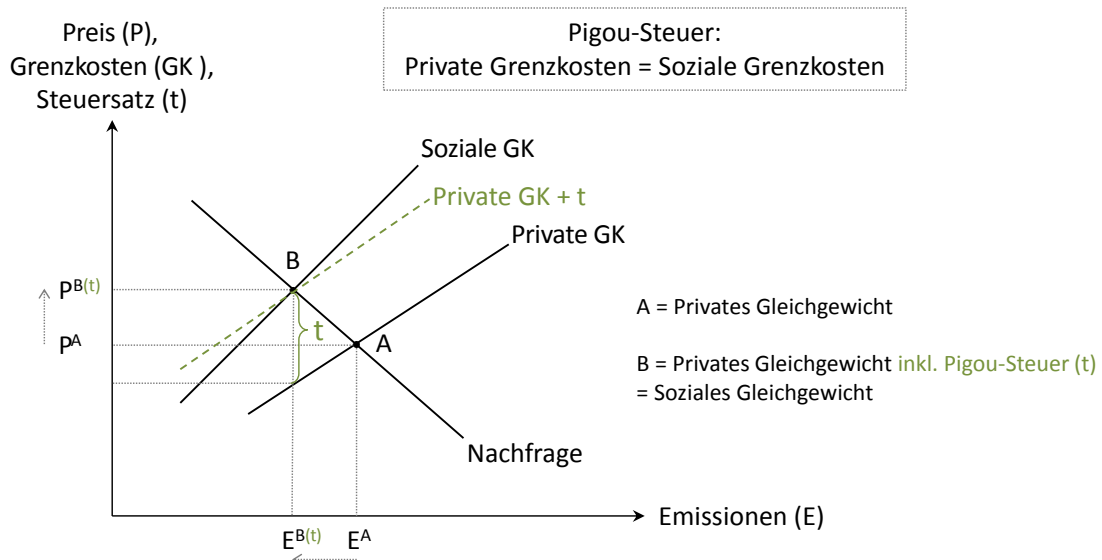
<sup>126</sup> Vgl. Abschnitt 2.2.3.

<sup>127</sup> Vgl. Fritsch et al., 2005, S. 118.

<sup>128</sup> Vgl. Flachsland et al., 2011. Eine Literaturübersicht zu Rebound-Effekten findet sich auch in Santarius, 2012.

<sup>129</sup> Nach dem englischen Ökonomen Arthur C. Pigou. Näheres in Endres, 2012, S. 115 ff.

**Abbildung 2-8:** Einführung einer Pigou-Steuer zur wohlfahrtsoptimalen Internalisierung negativer externer Effekte



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Endres, 2012, S. 118.

Beim sogenannten Preis-Standard-Ansatz wird auf das Prinzip einer Pigou-Steuer zurückgegriffen, jedoch ohne Anspruch das Ziel der wohlfahrtsoptimalen Besteuerung zu erreichen. Stattdessen wird unterstellt, dass ein bestimmtes Internalisierungsziel vom politischen Entscheidungsträger vorgegeben wird. Dies könnte beispielsweise eine CO<sub>2</sub>-Steuer sein, bei der für jede emittierte Einheit Kohlenstoff ein bestimmter Kostensatz abgeführt werden muss (z. B. 7 € oder 50 € pro Tonne CO<sub>2</sub>, vgl. Tabelle 2-8). Dadurch sehen sich die betroffenen Produzenten einem Anreiz gegenüber, Emissionen soweit zu vermeiden, bis ihre individuellen Grenzvermeidungskosten den Steuersatz übersteigen. Da die individuellen Grenzvermeidungskosten dem politischen Entscheidungsträger aber in der Regel nicht bekannt sind, besteht die Herausforderung darin, den Steuersatz so zu wählen, dass sich eine hinreichende Emissionsreduktion einstellt. Bei der Preissteuerung durch Abgaben ergibt sich dadurch ein Mengenrisiko hinsichtlich des sich einstellenden Emissionsniveaus. Die ökologische Treffsicherheit ist daher als eingeschränkt zu beurteilen. In der praktischen Umsetzung muss daher regelmäßig das beobachtete Emissionsniveau überwacht werden, um den Steuersatz entsprechend nachzujustieren.

Bei einer Mengensteuerung, wie dem Zertifikatehandel (vgl. EU-ETS in Abschnitt 2.2.2.2), wird das gewünschte Emissionsniveau im Sinne des *cap-and-trade*-Mechanismus im Voraus festgelegt. Die Marktteilnehmer entscheiden dann über die optimale Aufteilung der individuellen Emissionszertifikate.<sup>130</sup> Der Marktpreis, der sich auf dem Zertifikatemarkt durch den

<sup>130</sup> Der Zertifikatehandel führt nicht automatisch zum wohlfahrtsoptimalen Emissionsniveau, da dieses von einem politischen Entscheidungsträger vorgegeben wird. Ein, im Sinne einer Mengensteuerung, theoretisch optimales Emissionsniveau ließe sich durch die Zuweisung von Eigentumsrechten an der Umweltressource und anschließenden Verhandlungen zwischen Schädiger und Geschädigten erreichen. Dabei kann entweder dem Schädiger das Recht auf Schädigung oder dem Geschädigten das Recht auf Schadensfreiheit zugestant-

Abgleich jedes Marktteilnehmers mit seinen individuellen Grenzvermeidungskosten einstellt, ist im Voraus nicht bekannt, weil der politische Entscheidungsträger die individuellen Grenzvermeidungskosten nicht kennt und somit auch nicht einschätzen kann, zu welcher Kostenbelastung das vorgegebene Emissionsniveau im Endeffekt führt. Aufgrund dieses Preisrisikos kann es bei Unternehmen zu einer eingeschränkten Planungssicherheit hinsichtlich zukünftiger Investitionen in Vermeidungstechnologien kommen.<sup>131</sup> Ökologische Treffsicherheit und ökonomische Effizienz sind beim Zertifikatehandel aber im Allgemeinen als sehr gut einzustufen. Die Treffsicherheit ist dadurch gewährleistet, dass das geplante Emissionsniveau im Vorfeld festgelegt werden kann (*cap*) und durch den Zertifikatehandel lediglich über die Aufteilung der Vermeidungsintensitäten auf einzelne Produzenten entsprechend ihrer individuellen Grenzvermeidungskosten entschieden wird (*trade*). Da Steuersatz und Zertifikatspreis eine ähnliche Anreizwirkung entfalten, ist die ökonomische Effizienz von Abgaben und Zertifikaten vergleichbar.<sup>132</sup>

Die Vorteile marktbasierter Instrumente gegenüber Auflagen bei Vorliegen individuell unterschiedlicher Grenzvermeidungskosten einzelner Marktakteure können anhand der beispielhaften Grafik in Abbildung 2-9 veranschaulicht werden. Eine durch eine Auflage vorgegebene Emissionsreduktion zweier Unternehmen A und B von Punkt  $E_0$  nach  $E_{A=B}$  würde in Unternehmen B zu höheren Vermeidungskosten führen als in Unternehmen A. Dagegen würde eine Steuer ( $t$ ) dazu führen, dass die individuellen Grenzvermeidungskosten beider Unternehmen angeglichen werden. Unternehmen A würde in diesem Falle mehr Emissionen reduzieren (Punkt  $E_B$ ) als Unternehmen B (Punkt  $E_B$ ). Die gleiche Wirkung entfaltet der Zertifikatspreis ( $P_Z$ ), der auf dem Zertifikatemarkt als Schnittpunkt zwischen unelastischem Zertifikatangebot ( $Cap$ ) und elastischer Zertifikatnachfrage ( $N$ ) zustande kommt. Die Zertifikatnachfragefunktion ( $N$ ) entspricht der Summe der individuellen Grenzvermeidungskostenfunktionen. Stellt sich auf dem Zertifikatemarkt ein dem Steuersatz bei einer Abgabe identischer Preis ein, oder wird der Steuersatz gleich hoch gewählt wie der Zertifikatspreis, kommt es zu einem identischen volkswirtschaftlichen Ergebnis. Die schraffierten Flächen stellen die Kostenersparnis beider Unternehmen bei Anwendung marktbasierter Instrumente im Vergleich zur Auflage dar und geben den resultierenden sozialen Wohlfahrtsgewinn an, der letztlich Ausdruck der gewonnenen ökonomischen Effizienz ist.

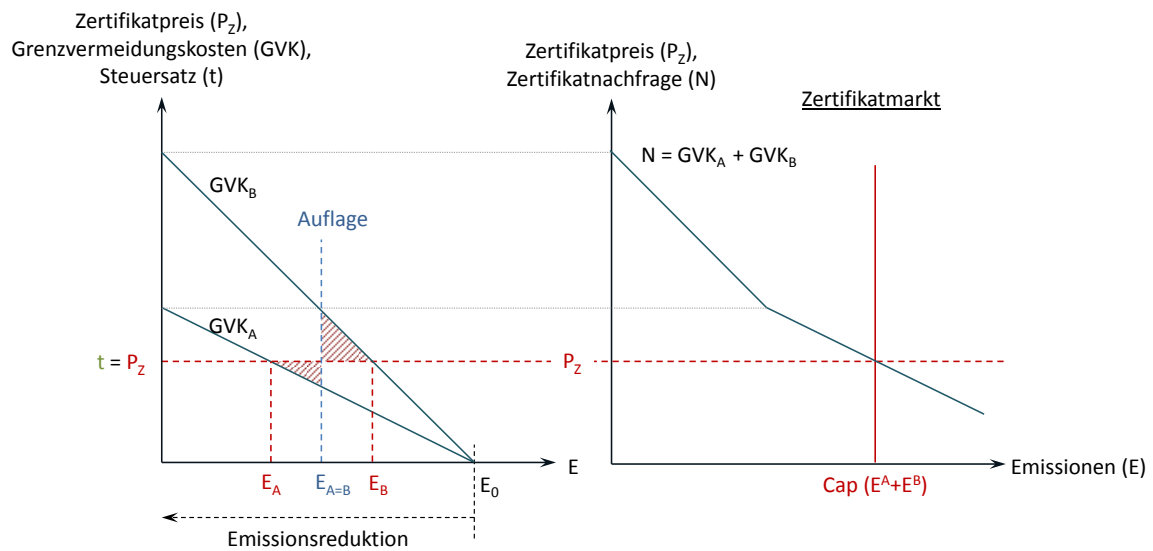
---

den werden. Diese optimale Internalisierung externer Effekte durch Verhandlungen ist als „Coase-Theorem“ bekannt (vgl. Endres, 2012, S. 57 ff).

<sup>131</sup> Dies spiegelt sich in der aktuellen Entwicklung des EU-ETS-Zertifikatspreises wider (vgl. Abschnitt 2.2.2.2).

<sup>132</sup> Siehe auch Übersicht 5.1 in Fritsch et al., 2005.



**Abbildung 2-9:** Sozialer Wohlfahrtsgewinn marktbasierter Instrumente im Vergleich zu Auflagen

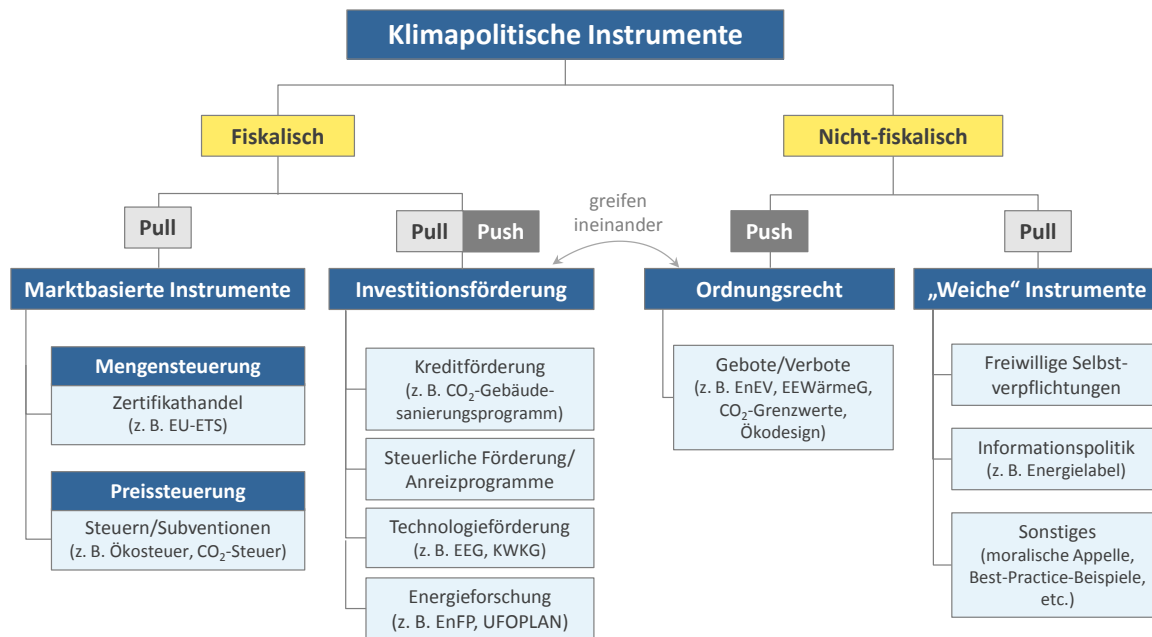
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Hartwig, 2003, S. 160.

### ***Umweltökonomische Strukturierung klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich***

Abbildung 2-10 strukturiert die einzelnen in Tabelle 2-6 aufgelisteten klimapolitischen Instrumente im Haushaltsbereich aus umweltökonomischer Sicht neu. Dabei werden den Instrumenten neben ihrer Hauptkategorien jeweils zwei Eigenschaften zugewiesen. Erstens soll unterscheiden werden, ob es sich um ein fiskalisches oder ein nicht-fiskalisches Instrument handelt, und zweitens, ob die Lenkungswirkung direkt vom Staat vorgegeben wird (*push*) oder sich indirekt über Anreize einstellt (*pull*).<sup>133</sup> Marktbasierete Instrumente betreffen den Staatshaushalt (z. B. Steuereinnahmen, Zertifikatversteigerungen) und stellen finanzielle Anreize dar (*pull*). Das Ordnungsrecht betrifft demgegenüber den Staatshaushalt nicht unmittelbar. Zudem stellt es die Lenkungswirkung per Zwang her (*push*). Die Instrumente der Investitionsförderung können einerseits als finanzieller Anreiz (*pull*) verstanden werden, andererseits sind sie aber eng mit dem Ordnungsrecht verknüpft (z. B. EnEV und CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm) und sollen den Wohnungs- und Gebäudeeigentümern helfen, die Auflagen durch entsprechende Investitionen einzuhalten. Daher ist die Einordnung hier nicht eindeutig. Die vierte Kategorie umfasst alle anderen Instrumente, die in der Regel als „weiche“ Instrumente (*soft policy instruments*) eingestuft werden. Diese umfassen freiwillige Selbstverpflichtungen, moralische Appelle oder informationspolitische Instrumente (z. B. das EU-Energielabel).

<sup>133</sup> Die Unterscheidung zwischen einer „Push“-Strategie (staatliche Planung mit direkter Lenkungswirkung) und einer „Pull“-Strategie (staatlich gesetzte Verhaltensanreize mit indirekter Lenkungswirkung) erfolgt in Anlehnung an Küster, 2009.

**Abbildung 2-10:** Umweltökonomische Strukturierung klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Lambrecht et al., 2003, S. 23

## 2.4 Methodische Vorgehensweise

Bis hierhin wurde die Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland im Hinblick auf ihre Klimaschutzpolitische Bedeutung beschrieben sowie die Grundzüge der umweltökonomischen Theorie und Bewertung erläutert. Im Folgenden soll die methodische Herangehensweise geschildert werden, auf Basis derer die modellgestützte Analyse der klimapolitischen Regulierung im Haushaltsbereich erfolgen soll.

### 2.4.1 Kostenwirksamkeitsanalyse

Das wohlfahrtsoptimale Treibhausgasemissionsniveau liegt aus wirtschaftstheoretischer Sicht dort, wo die Grenzkosten der Vermeidung den Grenzschäden zusätzlicher Treibhausgasemissionen entsprechen (vgl. Abbildung 2-7). In der Realität ist dieser Punkt aufgrund von Unsicherheiten und Informationsmängeln über die zugrunde liegenden globalen Grenzvermeidungs- und Grenzschadenskostenfunktionen nicht bestimmbar.<sup>134</sup> Der Nutzen der Schadensreduktion durch die Treibhausgasemissionsreduktion stellt sich zudem erst langfristig ein und kann ex-ante mit heutigen Methoden nicht zuverlässig bewertet werden. Dagegen sind die Kosten von Klimapolitik kurzfristig sichtbar, weil Vermeidungstätigkeiten bereits heute anfallen und in das Kalkül der Wirtschaftssubjekte einfließen. Sie können mit gängigen Methoden monetär quantifiziert werden.

<sup>134</sup> Die externen Kosten von Treibhausgasemissionen können aufgrund der unvollständigen monetären Bewertbarkeit der externen Effekte nicht optimal eingepreist werden (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Volkswirtschaftliche Kosten bezeichnen die Kosten der gesamtwirtschaftlichen Güterbereitstellung aus dem mit Faktorpreisen bewerteten Ressourcenverbrauch. Idealerweise beinhalten diese sowohl die betriebswirtschaftlichen Kosten als auch die externen Kosten der Umweltbelastung.<sup>135</sup> Volkswirtschaftliche Kosten können aber auch als Wohlfahrtsverluste verstanden werden.<sup>136</sup> Letztere zeigen an, dass sich Haushalte als Folge wirtschaftspolitischer Eingriffe kein Güterbündel mehr leisten können, das ihnen das gleiche Nutzenniveau stiftet wie das Güterbündel in der Ausgangssituation.<sup>137</sup> Aus mikroökonomischer Sicht kann dies Folge einer wirtschaftspolitisch induzierten relativen Preisänderung sein (z. B. Verteuerung eines Gutes infolge seiner Besteuerung). Ist die Preiselastizität eines Konsumenten nicht unendlich hoch, kann ein relativ teurer gewordenes Gut eines Warenkorb nicht vollständig durch den Konsum anderer Güter substituiert werden (Substitutionseffekt), um das gleiche Nutzenniveau aufrecht zu erhalten. Dadurch sinkt ceteris paribus das real verfügbare Budget. Der daraus resultierende negative Einkommenseffekt kann als Wohlfahrtsverlust interpretiert werden.<sup>138</sup> In der Modellentwicklung in Kapitel 3 wird dieses Konzept erneut aufgegriffen.

Aufgrund der Nutzenunsicherheit entfällt zwar die Möglichkeit, eine quantifizierbare Kosten-Nutzen-Analyse klimapolitischer Instrumente durchzuführen, um eine wohlfahrtsoptimale Klimapolitik herzuleiten.<sup>139</sup> Dennoch besteht die Möglichkeit einer Kostenwirksamkeitsanalyse, in der die Kostenwirksamkeit einzelner klimapolitischer Instrumente ermittelt und miteinander verglichen wird. Dabei wird das Nutzenniveau von Klimapolitik vorab durch politische Entscheidungsträger fixiert. In der aktuellen Klimapolitik geschieht dies dadurch, dass auf Basis der Wissenskenntnis über die Zusammenhänge zwischen Treibhausgasemissionen, Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre, Klimaänderungen und Klimaschäden eine Begrenzung der globalen Erderwärmung auf maximal 2 °C festgelegt und darauf basierend globale oder nationale Treibhausgasemissionsreduktionsziele formuliert werden (vgl. Abschnitt 2.2.1). Daraus kann das in einem bestimmten Zeitraum verfügbare globale Treibhausgasemissionsniveau hergeleitet werden, was wiederum in politischen Handlungsprozessen und unter der gegebenen internationalen Kooperationsschwierigkeit (Trittbrettfahrerproblem) auf einzelne Länder zu verteilen ist.<sup>140</sup>

---

<sup>135</sup> Betriebswirtschaftliche Kosten können nach Gabler (2015a) als „bewerteter Verzehr von wirtschaftlichen Gütern materieller und immaterieller Art zur Erstellung und zum Absatz von Sach- und/oder Dienstleistungen“ verstanden werden.

<sup>136</sup> Für eine umfassende Diskussion des volkswirtschaftlichen Kostenbegriffs (vgl. Böhringer, 1999). Ein berühmte Ausprägung eines Wohlfahrtsverlustes ist die Zusatzlast der Besteuerung (*excess burden*), die sich als Verlust von Produzenten- und Konsumentenrente nach Einführung einer Steuer bemessen lässt (vgl. Endres, 2012, S. 213 oder Homburg, 2003, S. 160 ff).

<sup>137</sup> Vgl. Böhringer, 1999, S. 3.

<sup>138</sup> Das Resultat ist von den zugrunde liegenden mikroökonomischen Annahmen abhängig (vgl. Breyer, 2005, S. 142 ff).

<sup>139</sup> Vgl. Böhringer, 1999, S. 2.

<sup>140</sup> Die gängigen Treibhausgasemissionsreduktionsziele beziehen sich auf den Zeitraum bis zum Jahr 2050 (vgl. Abschnitt 2.2, insbesondere auch Fußnote 23).

Die ökonomische Herausforderung besteht letztlich darin, die festgelegten globalen bzw. nationalen Ziele zu den geringstmöglichen gesamtwirtschaftlichen Kosten zu erreichen. Im Sinne der umweltökonomischen Bewertungskriterien (vgl. Abschnitt 2.3.2) sollten die klimapolitischen Instrumente daher hinsichtlich des jeweils gültigen Ziels treffsicher und ökonomisch effizient sein. Ausgangspunkt der Kostenwirksamkeitsanalyse ist dabei vor allem die Kosteneffizienz der Instrumente.

#### 2.4.2 Anforderungen an die Methodik

Um die Kosteneffizienz der oben geschilderten klimapolitischen Instrumente (vgl. Tabelle 2-6 bzw. Abbildung 2-10) modellgestützt bewerten zu können und im Rahmen einer Kostenwirksamkeitsanalyse miteinander vergleichen zu können, bedarf es einer konsistenten, problemadäquaten Methodik, die eine Reihe spezieller Anforderungen erfüllen muss:<sup>141</sup>

- Totalanalyse: Um die Gesamtheit der volkswirtschaftlichen Kosten erfassen zu können, ist die Gesamtheit der volkswirtschaftlichen Kreislaufzusammenhänge von Unternehmen, Haushalten, Staat und Ausland darzustellen. Das beinhaltet die Darstellung sämtlicher Güter- und Faktormärkte in einem geschlossenen Einkommenskreislauf.
- Allokationsanalytische Eignung: In einem simultanen Produktions- und Tauschoptimum werden die knappen Ressourcen einer Volkswirtschaft kosteneffizient auf alternative Verwendungszwecke aufgeteilt (effiziente Allokation). Um einen Kostenwirksamkeitsvergleich verschiedener klimapolitischer Instrumente durchzuführen, muss das Analyseinstrumentarium allokatonsanalytisch geeignet sein. Das bedeutet, dass Knappheitseffekte anhand von Preisen erfasst und die Wohlfahrtsverluste infolge einer fehlgeleiteten Ressourcenverwendung gegenüber einem bestmöglichen alternativen Zustand des Ressourceneinsatzes gemessen werden können müssen.<sup>142</sup>
- Disaggregierte Betrachtung: Eine regional und sektoral disaggregierte Betrachtung der Wirtschaftssubjekte ist notwendig, um die volkswirtschaftliche Verflechtung inklusive Rückkopplungseffekte und Interdependenzen zwischen einzelnen Wirtschaftssubjekten darstellen zu können (Verteilungseffekte). Dies umfasst neben dem Handel zwischen einzelnen Produktionsbereichen und Haushalten auf Güter- und Faktormärkten vor allem auch den Außenhandel.
- Nettobetrachtung: Wirtschaftspolitische Eingriffe lösen zahlreiche (Brutto-)Effekte aus, die sich gegenseitig überlagern und/oder zum Teil aufheben.<sup>143</sup> Um diese Effekte gegeneinander abwägen und saldieren zu können, bedarf es einer Methodik, die in der Lage ist, möglichst viele der angestoßenen Impulse zu erfassen. In der Regel ist die

---

<sup>141</sup> Vgl. Böhringer, 1996, S. 23 ff und Küster, 2009, S. 54 f.

<sup>142</sup> Vgl. Böhringer, 1999, S. 25.

<sup>143</sup> Vgl. beispielsweise Briem & Fahl, 2004 oder Küster, 2009.

Nettobetrachtung mit totalanalytischen Modellen garantiert, wenn diese in einem geschlossenen Einkommenskreislauf in hinreichend disaggregierter sektoraler und regionaler Auflösung formuliert sind.

- Mikroökonomische Fundierung: Das Verhalten der Wirtschaftssubjekte, insbesondere ihre Reaktion auf einen umweltpolitischen Eingriff, muss auf Grundlage plausibler wirtschaftstheoretischer Annahmen abgebildet werden. Dies schließt die Reaktion auf Preisänderungen und daraus resultierende Substitutions- und Einkommenseffekte mit ein.
- Wirtschaftspolitische Eingriffe: Wirtschaftspolitische Eingriffe beschränken den Entscheidungs- und Aktivitätsspielraum der Wirtschaftssubjekte auf Güter- und Faktormärkten (z. B. Auflagen, Steuern). Diese Restriktionen müssen berücksichtigt werden können.
- Technologische Detailliertheit: Die Entstehung von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist unter anderem abhängig von den eingesetzten Technologieoptionen im Energieangebot und der Energienachfrage. Produktions- und Konsumententscheidungen finden auf der Basis dieser Technologiebeschränkung statt. Da klimapolitische Instrumente technologiespezifische Vorgaben enthalten können (z. B. CO<sub>2</sub>-Grenzwerte von PKW), müssen verschiedene Technologieoptionen in entsprechenden Produktions- und Nutzenfunktionen abgebildet werden können.
- Dynamik: Da der Zeithorizont der gegenwärtigen klimapolitischen Rahmenbedingungen (Ziele und Maßnahmen) langfristig bis 2050 reicht, müssen zeitlich aufeinander folgende Produktions- und Konsumententscheidungen im Zeitverlauf abgebildet werden können. Dies ist auch vor dem Hintergrund von Bedeutung, weil gegenwärtige Investitionen in langlebige Gebrauchs- und Kapitalgüter (z. B. Fahrzeuge und Gebäude) auch Auswirkungen auf den zukünftigen Energiebedarf haben.

### 2.4.3 Wahl der Methodik

Für die Kostenwirksamkeitsanalyse von klimapolitischen Instrumenten stehen unterschiedliche Modellansätze zur Verfügung, die in Abbildung 2-11 gegenüber gestellt werden. Die Modellansätze unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Systemgrenzen und der Art und Weise der modellierten Systembeziehungen.<sup>144</sup>

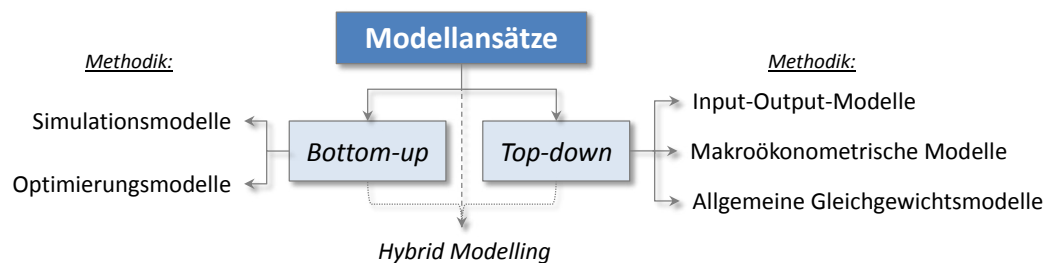
Hinsichtlich der Systemgrenze ist zunächst zwischen Bottom-up- und Top-down-Modellen zu unterscheiden. Bottom-up-Modelle beschreiben die produktionstechnischen Möglichkeiten eines Wirtschaftssystems aus einer disaggregierten Perspektive („von unten“). Sie zeichnen sich durch eine hohe technologische Detailtiefe aus und werden typischerweise für die Analyse von Teilbereichen eines Wirtschaftssystems, wie z. B. dem Energiesystem, verwendet.

---

<sup>144</sup> Vgl. Böhringer, 1999, S. 3 ff.

Dabei lassen sich zwei grundsätzliche analytisch-mathematische Herangehensweisen hinsichtlich der modellierten Systembeziehungen unterscheiden. Optimierungsmodelle suchen nach kosteneffizienten Handlungsoptionen bei vorgegebenen Randbedingungen (z. B. kosteneffizienter Technologieeinsatz zur Erreichung eines Treibhausgasemissionsminderungsziels). Simulationsmodelle suchen dagegen in explorativer Weise nach dem resultierenden Systemzustand von vorgegebenen Handlungsoptionen (z. B. Treibhausgasemissionsminderungspotenziale eines klimapolitischen Instruments).<sup>145</sup>

**Abbildung 2-11:** Unterschiedliche Modellansätze für die Kostenwirksamkeitsanalyse von klimapolitischen Instrumenten



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Böhringer, 1999, Küster, 2009 und Remme, 2006

Volkswirtschaftliche Modelle sind in der Regel Top-down-Modelle, die das Wirtschaftssystem aus einer aggregierten, gesamtwirtschaftlichen Perspektive („von oben“) betrachten.<sup>146</sup> Sie fokussieren sich auf die Analyse der Interaktion und Interdependenzen verschiedener Teilbereiche eines Wirtschaftssystems (Wirtschaftssubjekte) bei Vernachlässigung technologischer Details. Hier stehen ebenfalls unterschiedliche Herangehensweisen zur Modellierung der Systembeziehungen zur Verfügung (vgl. Abbildung 2-11). Sie haben in der Regel gemein, dass sie auf Input-Output-Tabellen oder ähnlichen Datenformen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen aufgebaut sind. Die auf Wassily Leontief zurückgehenden Input-Output-Modelle stellen die strukturelle Verflechtung der einzelnen Teilbereiche einer Volkswirtschaft anhand von Input-Output-Tabellen dar.<sup>147</sup> Diese umfassen die verschiedenen Produktionsbereiche, die Produktionsfaktoren, Gütersteuern, die Endnachfrage sowie Exporte und Importe. Input-Output-Modelle gehen über eine deskriptive Beschreibung der Input-Output-Tabellen hinaus, indem sie die Möglichkeit bieten, Preiseffekte zu berücksichtigen oder die Endnachfrage zu endogenisieren.<sup>148</sup> Ihre Hauptschwäche liegt in der impliziten Annahme linear-limitationaler Produktionsfunktionen mit festen Inputkoeffizienten. Aufgrund

<sup>145</sup> Vgl. Grubb et al., 1993. Für eine weiterführende Beschreibung von Bottom-up-Ansätzen vgl. Remme, 2006, S. 78 ff.

<sup>146</sup> Eine Ausnahme stellen Einzel-Sektor-Modelle dar, die sich auf die (mikroökonomische) Analyse verschiedener Wirtschaftssubjekte innerhalb eines Marktes oder Wirtschaftssektors konzentrieren und die Interaktion mit anderen Märkten vernachlässigen (z. B. Ölmarktmodelle).

<sup>147</sup> Die aktuelle Input-Output-Tabelle für Deutschland teilt die Volkswirtschaft in 85 Produktionsbereiche (vgl. Destatis, 2015c).

<sup>148</sup> Vgl. Pahlke, 2000, S. 39 f oder Holub & Schnabl, 1994.

der mangelnden Preisreagibilität können Substitutionseffekte dadurch nur sehr eingeschränkt berücksichtigt werden.<sup>149</sup>

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (Computable General Equilibrium Models, CGE-Modelle) können als Verallgemeinerung bzw. Erweiterung von Input-Output-Modellen verstanden werden.<sup>150</sup> Sie berechnen volkswirtschaftliche Aktivitäten, Preise und Einkommen derart, dass sich ein simultanes Gleichgewicht auf allen Güter- und Faktormärkten im Rahmen eines geschlossenen Einkommenskreislaufs einstellt. Sie basieren auf mikroökonomischen Verhaltensannahmen (neoklassische Gleichgewichtstheorie, Modell der vollständigen Konkurrenz) und bilden Präferenzen und Technologien meist in Form von preisreagiblen CES-Produktionsfunktionen ab (*Constant Elasticity of Substitution*, CES). Ihre Datengrundlage ist eine sogenannte *Social-Accounting-Matrix* (SAM), die auf einer erweiterten Input-Output-Tabelle basiert.<sup>151</sup> Ihre Stärke liegt in dem totalanalytischen, konsistenten und allokatonsanalytisch geeigneten Modellrahmen, der es erlaubt, wirtschaftspolitische Eingriffe sektoral und technologisch disaggregiert zu analysieren, Rückkopplungseffekte zu erfassen, um letztlich Nettoeffekte bestimmen zu können. Aufgrund dessen werden sie regelmäßig für die Kostenwirksamkeitsanalyse klimapolitischer Instrumente eingesetzt. Sie sind im Kern statisch, können aber um einen gewissen Zeithorizont dynamisch erweitert werden. Zudem existieren global konsistente Datensätze, die es ermöglichen, den Welthandel adäquat zu erfassen.<sup>152</sup> Kritiker bemängeln an CGE-Modellen die als restriktiv geltenden Annahmen der vollständigen Konkurrenz, die Datengrundlage in Form einer Input-Output-Tabelle eines einzigen Jahres, sowie die exogen vorzugebenen Substitutionselastizitäten der CES-Produktionsfunktionen.<sup>153</sup> Die Annahme simultaner Gleichgewichte scheint nur mittel- bis langfristig geeignet zu sein, da sie kurzfristige Anpassungsprozesse größtenteils unberücksichtigt lässt.<sup>154</sup>

Während sich die volkswirtschaftlichen Produktions- und Konsummöglichkeiten in CGE-Modellen aus dem Angebot der Produktionsfaktoren ergeben, werden die volkswirtschaftlichen Ergebnisse in makroökonomischen Modellen von der Nachfrageseite angestoßen, weswegen diese auch zu den keynesianischen Ansätzen zählen.<sup>155</sup> Sie basieren ebenfalls meist auf Input-Output-Tabellen, erweitern diese Datengrundlage aber durch empirische

---

<sup>149</sup> Vgl. Rennings, 2013.

<sup>150</sup> Allgemeine Gleichgewichtsmodelle können auch analytisch, und somit streng genommen nicht numerisch lösbar bzw. berechenbar sein. Wenn nicht anders gekennzeichnet, sind in der vorliegenden Arbeit aber immer „Berechenbare Allgemeine Gleichgewichtsmodelle“ im Sinne von CGE-Modellen gemeint.

<sup>151</sup> Vgl. auch Abschnitt 3.2.1.

<sup>152</sup> Hierzu zählt die GTAP-Datenbank (*Global Trade Analysis Project*, GTAP), vgl. Narayanan et al., 2012a.

<sup>153</sup> Vgl. Pahlke, 2000, S. 39 f.

<sup>154</sup> Vgl. Rennings, 2013.

<sup>155</sup> Der zentrale Unterschied zwischen neoklassischen und keynesianischen Ansätzen liegt in der Behandlung des Saischen Theorems (vgl. Berlemann, 2005, S. 272 f). Dieses besagt, dass sich jedes Angebot seine Nachfrage schafft. Keynesianische Ansätze lehnen das ab und gehen stattdessen von Ungleichgewichtszuständen, vor allem auf dem Geld- und Arbeitsmarkt, aus (vgl. Berlemann, 2005, S. 290 ff).

Schätzungen. Dadurch wird das modellierte Verhalten der Wirtschaftssubjekte nicht explizit im Sinne einer bestimmten Theorie vorgegeben, sondern empirisch abgeleitet. Ungleichgewichte können auftreten (und tun dies in der Regel auch). Makroökonometrische Modelle sind daher besonders für Kurzfristanalysen geeignet, bei denen es darauf ankommt, Anpassungsprozesse realitätsnah abzubilden. Für langfristige ex-ante Analysen sind sie aber der sogenannten *Lucas critique* ausgesetzt, wonach die Einführung neuer wirtschaftspolitischer Instrumente zu Strukturbrüchen führen, die in ökonometrischen Modellen aufgrund ihrer vergangenheitsorientierten Verhaltensannahmen nicht problemadäquat berücksichtigt werden können.<sup>156</sup> Damit sind sie für ex-ante Analysen und Politikvergleiche nur begrenzt einsetzbar.

Werden Bottom-up- und Top-down-Elemente in einem Modellansatz kombiniert, spricht man von einem hybriden Modellansatz (*Hybrid Modelling*, vgl. Abbildung 2-11).<sup>157</sup> Hier wird versucht, die Nachteile beider Modellansätze durch die Einbettung einzelner Bottom-up- bzw. Top-down-Elemente in einen Top-down- bzw. Bottom-up-Modellansatz zu beseitigen bzw. zu verringern. Folgt man Hourcade et al. (2006) lässt sich diese Strategie, die insbesondere in energiewirtschaftlich orientierten Modellen verfolgt wird, anhand Abbildung 2-12 verdeutlichen.

Demnach lassen sich Bottom-up- und Top-down-Modelle anhand folgender drei Beurteilungskriterien charakterisieren:

- Technologische Detailtiefe
- Mikroökonomische Fundierung
- Makroökonomische Geschlossenheit

Während sich Bottom-up-Modelle in der Regel durch eine technologische Detailtiefe mit mikroökonomischer Fundierung auszeichnen, sind Top-down-Modelle eher durch eine mikroökonomische Fundierung bei gleichzeitiger makroökonomischer Geschlossenheit gekennzeichnet. Dabei fehlt es Top-down-Modellen in der Regel an technologischer Detailtiefe und Bottom-up-Modellen an makroökonomischer Geschlossenheit. Das „ideale“ Modell würde alle drei Beurteilungskriterien in vollständigem Maße abdecken und damit der Realität am nächsten kommen. Aufgrund der damit verbundenen Komplexität ist ein solches „ideales“ Modell aber nur hypothetisch und nicht praktikabel, da es den eigentlichen Sinn eines Modells (Reduktion der komplexen Realität) verfehlen würde. Um alle drei Beurteilungskriterien zumindest zu einem gewissen Grad abzudecken, können Top-down-Modelle mit technologischen Details gefüttert werden oder Bottom-up-Modelle um ein Modul zur Erfassung der

---

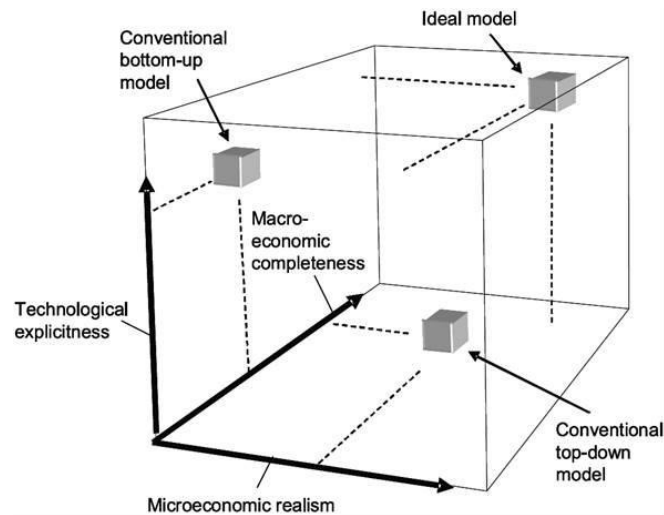
<sup>156</sup> Nach dem Ökonomen Robert E. Lucas, vgl. Lucas, 1976, S. 41: “[G]iven that the structure of an econometric model consists of optimal decision rules of economic agents, and that optimal decision rules vary systematically with changes in the structure of series relevant to the decision maker, it follows that any change in policy will systematically alter the structure of econometric models.” Vgl. auch Pahlke, 2000, S. 47.

<sup>157</sup> Vgl. Hourcade et al., 2006. Kiuila & Rutherford, 2013, diskutieren unterschiedliche Formen von Hybrid CGE-Modelling.



gesamtwirtschaftlichen Rückkopplungseffekte erweitert werden. Beispiele beider Ansätze werden im nachfolgenden Abschnitt 2.5 aufgeführt.

**Abbildung 2-12:** Dreidimensionale Beurteilung von Bottom-up- und Top-down-Modellen



Quelle: Hourcade et al., 2006, S. 4.

Für die in Abschnitt 2.4.2 aufgeführten methodischen Anforderungen bietet sich ein globales, technologiefundiertes, dynamisches Allgemeines Gleichgewichtsmodell an, das eine problemadäquate regionale und sektorale Aufteilung der Wirtschaftssubjekte enthält und insbesondere für mittel- bis langfristige ex-ante Analysen und Politikvergleiche ausgelegt ist. Daher wird diese Methodik als (hybrider) Modellansatz für die modellgestützte Analyse gewählt.

## 2.5 Stand der Forschung

Vor der Beschreibung der Modellentwicklung soll auf Schnittstellen mit der bestehenden Literatur eingegangen werden, um vergleichbare Forschungsarbeiten vorzustellen und die Arbeit in den aktuellen Stand der Forschung einzuordnen.

Eine Analyse der Energienachfrage privater Haushalte aus deskriptiver Sicht führen Destatis (2008c) und Köppl & Wüger (2007) durch. Kratena et al. (2009) und Büchs & Schnepf (2013) untersuchen Einflussgrößen und Determinanten der Energienachfrage privater Haushalte. Goulder & Parry (2008), Parry et al. (2014), Parry & Pizer (2007) und Avi-Yonah & Uhlmann (2009) werfen einen theoretisch-analytischen Blick auf die volkswirtschaftlichen Auswirkungen verschiedener klimapolitischer Instrumente nicht nur, aber auch im Haushaltsbereich. Parry et al. (2005) und Rausch et al. (2011) untersuchen volkswirtschaftliche Verteilungsaspekte von Klimapolitik im Hinblick auf private Haushalte. Tsvetanov & Seger-son (2013) gehen zusätzlich auf verhaltensökonomische Aspekte ein.

Aus Bottom-up-Perspektive gibt es zahlreiche ingenieurwissenschaftliche Modelle, die einen Teilbereich der Energienachfrage privater Haushalte im Rahmen eines Energiesystemmodells technologiescharf analysieren. Der europäische Transportsektor wird beispielsweise detail-

liert in Bruchof (2012) oder Capros (2014) untersucht. Eine fundierte Analyse von Technologieoptionen im deutschen Gebäudebestand wird dagegen in Schimschar et al. (2011) durchgeführt. Beispiele für Bottom-up-Modelle mit einem angeschlossenen makroökonomischen Modul sind TIMES-MACRO gemäß Remme & Blesl (2006) sowie MARKAL-MACRO gemäß Loulou et al. (2004).

Reine Top-down-Modelle sind aufgrund ihres hohen Aggregationsgrads eher ungeeignet, um die Energienachfrage privater Haushalte technologiescharf zu analysieren. Es gibt aber zahlreiche Modellansätze mit hybriden bzw. technologischen Elementen. So führen beispielsweise Kuckshinrichs et al. (2010) eine Input-Output-Analyse des deutschen CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms durch. Mirasgedis et al. (2014) wenden ebenfalls die Methode der Input-Output-Analyse an, um Beschäftigungseffekte von Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden abzuschätzen. Die Entwicklung quantitativ belastbarer makroökonomischer Modelle und Allgemeiner Gleichgewichtsmodelle ist in der Regel so aufwendig, dass sie in der Literatur häufig mit einem eigenen Namen versehen werden. So stellen die Modelle „Panta Rhei“ und „ThreeME“ Beispiele für makroökonomische Modelle dar.<sup>158</sup> „Panta Rhei“ ist ein Modell der deutschen, „ThreeME“ ein Modell der französischen Wirtschaft.

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind die am häufigsten verwendete Methodik zur Kostenwirksamkeitsanalyse klimapolitischer Instrumente. Die Literatur weist sowohl Ansätze der Modellkopplung zwischen einem Allgemeinen Gleichgewichts- mit einem Energiesystemmodell auf als auch die Einbettung technologischer Details in einen CGE-Modellrahmen. Kiuila & Rutherford (2013) diskutieren verschiedene Formen von hybriden Modellierungsstrategien in Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen. Böhringer & Rutherford (2009) haben einen Dekompositionsalgorithmus entwickelt, um ein Allgemeines Gleichgewichts- mit einem Energiesystemmodell in mathematisch-konsistenter Weise iterativ zu koppeln. In Beestermöller et al. (2013) und Beestermöller et al. (2014) werden strommarktbezogene Ergebnisse eines Energiesystemmodells als Eingangsgrößen in einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell verwendet. Beestermöller & Fahl (2013) analysieren die Verteilung politikinduzierter, technologiebezogener Strommehrkosten auf unterschiedliche Verbrauchergruppen (Industrie, Haushalte, etc.). Schäfer & Jacoby (2006a) und Schäfer & Jacoby (2006b) führen eine Modellkopplung zwischen einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell und einem Energiesystemmodell mit Fokus auf den Transportsektor durch. Giraudet et al. (2012) koppeln ein Bottom-up-Gebäudemodell mit einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell, um die Energienachfrage privater Haushalte in Frankreich zu analysieren. Ein ähnliches Vorhaben führen Drouet et al. (2005), Sceia et al. (2008) und Sceia et al. (2012) für die Schweiz durch. Labriet et al. (2015) gehen einen Schritt weiter und analysieren mithilfe eines zusätzlichen Klimamodells

---

<sup>158</sup> Literatur zum Modell „Panta Rhei“ findet sich in Flaute et al. 2015, Lehr et al. 2011 und Drosdowski & Lutz, 2014. Callonnec et al., 2013, enthält eine Beschreibung des „ThreeME“-Modells.

die Auswirkungen des Klimawandels auf die weltweite Wärme-/Kältenachfrage. Gheri (2015) bietet eine Übersicht über unterschiedliche Modellkopplungstechniken.

Böhringer & Rutherford (2005; 2008) stellen eine Hybrid-Modelling-Methode zur Einbettung technologischer Details in einen CGE-Modellrahmen dar und präsentieren beispielhafte Ergebnisse für energiepolitische Effekte im Strommarkt. Ein ähnliches Vorgehen zur technologisch disaggregierten Darstellung des Stromsektors in Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen findet sich in Böhringer (1998), Wing (2006), Küster (2009) und Zürn (2010).

Die technologische Disaggregation ist aber nicht auf den Stromsektor beschränkt. Unterschiedliche Studien konzentrieren sich auf die disaggregierte Darstellung des Transportsektors. Hier sind u. a. Paltsev et al. (2005), Schäfer & Jacoby (2006a), Berg (2007), Abrell (2010; 2009), Beestermöller & Abrell (2012), Karplus et al. (2013a) und Karplus et al. (2013b) zu nennen. Im Gebäudebereich ist die Einbettung technologischer Details noch nicht so weit fortgeschritten, in der Literatur aber ebenfalls vertreten. Hier ist hauptsächlich die Arbeit von Laitner & Hanson (2006) von Relevanz.

Für angewandte Forschungs- und Beratungsprojekte werden regelmäßig größere Allgemeine Gleichgewichtsmodelle entwickelt und mit aktuellen Daten belastbar kalibriert. Einige dieser Modelle beinhalten auch eine mehr oder weniger detaillierte disaggregierte Darstellung der Energienachfrage privater Haushalte. Das SNOW-NO-Modell nach Bye et al. (2015) ist ein Allgemeines Gleichgewichtsmodell für Norwegen, das eine empirisch geschätzte Grenzvermeidungskostenkurve zur Darstellung von Energieeffizienzinvestitionen im Gebäudebereich hinterlegt. Es enthält auch eine grobe Gegenüberstellung von Fahrzeugen und Energieträgern zur Herstellung eigener Mobilitätsdienstleistungen seitens der Haushalte sowie eine grobe Gegenüberstellung von Gebäuden und Energieträgern zur Herstellung von Raumwärmedienstleistungen. Die genaue Modellierung ist aber nicht weiter dokumentiert. Eine vergleichbare Technologiemonitoring enthält das EMEC-Modell, das zusätzlich verschiedene Haushaltsgruppen unterscheidet.<sup>159</sup>

Das GEM-E3-Modell geht einen Schritt weiter und fügt neben dem allgemeinen Produktivkapital auch langlebige Gebrauchsgüter (*durable goods*) auf der Konsumseite hinzu, um die Nachfrage nach Energiedienstleistungen seitens der Haushalte durch die Berücksichtigung von Fahrzeug- und Heizungstypen adäquat und technologieorientiert berücksichtigen zu können. Die aktuelle zugehörige Dokumentation von Capros et al. (2013) enthält jedoch wenig Informationen über die Modellierung und datenseitige Kalibrierung. Das IMACLIM-R-Modell für Frankreich gemäß Cassen et al. (2010) ist eines der wenigen bekannten Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle, das Fahrzeuge und Gebäude als langlebige Gebrauchsgüter bei der Herstellung der Energiedienstleistungen Mobilität und Raumwärme seitens der Haushalte abbildet. Dies geschieht in einem separaten Dynamik-Modul, das die jeweilige Anfangsaus-

---

<sup>159</sup> Vgl. Berg, 2007 sowie Östblom & Berg, 2006.

stattung von Produktionsfaktoren (inkl. Fahrzeuge und Gebäude) von einer Periode in die nächste transferiert. Modellansätze, die sich insbesondere auf die Modellierung von Energieeffizienzentwicklungen und technischen Fortschritt konzentrieren sind in Hull et al. (2009), Zürn (2010) und Bibas et al. (2015) zu finden.

Bislang ist keine Arbeit bekannt, die die unterschiedlichen bestehenden und diskutierten klimapolitischen Instrumente in der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland auf ihre volkswirtschaftlichen Auswirkungen in einem konsistenten, geschlossenen Einkommenskreislauf untersucht, das heißt, die den globalen Wirtschaftskreislauf inklusive bilateraler Handelsströme in seiner Gesamtheit erfasst und sowohl ökonomische Aktivitäten als auch relative Preise und gesamtwirtschaftliche Einkommensniveaus modellendogen erklärt. Der in dieser Arbeit verfolgte hybride Allgemeine Gleichgewichtsansatz (top-down) mit technologischer Fundierung (bottom-up) der Energienachfrage privater Haushalte stellt daher eine wichtige methodische Neuerung dar. Im Rahmen einer modellgestützten Kostenwirksamkeitsanalyse können dadurch die volkswirtschaftlichen Kosten unterschiedlicher klimapolitischer Instrumente quantifiziert werden und wirtschaftspolitische Handlungsempfehlungen im Hinblick auf einen effektiven und kostengünstigen Klimaschutz abgeleitet werden.

### 3 Entwicklung eines technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodells

Im Folgenden soll die Entwicklung des für die Analyse eingesetzten hybriden, technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodells beschrieben werden. Hierfür werden zunächst die wirtschaftstheoretischen Grundlagen skizziert und die grundlegende mathematische Formulierung dargestellt. Anschließend wird die allgemeine Modellstruktur sowie die technologiefundierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte inklusive zugrunde liegender Datensätze dargestellt. Schließlich wird die Dynamisierung des Modells sowie die Modellierung von energie- und klimapolitischen Instrumenten beschrieben.

#### 3.1 Grundlagen der Modellentwicklung

##### 3.1.1 Allgemeine Gleichgewichtstheorie

Die wirtschaftstheoretische Grundlage Allgemeiner Gleichgewichtsmodelle ist die Allgemeine Gleichgewichtstheorie – ein mikroökonomischer Ansatz zur Erklärung von Tausch, Produktion, Konsum und Preisen in einer Volkswirtschaft. Die Allgemeine Gleichgewichtstheorie beschreibt die Interaktion von rationalen Wirtschaftssubjekten auf vollkommenen Märkten, deren Ergebnis ein simultanes Gleichgewicht (Markträumung) auf sämtlichen Güter- und Faktormärkten darstellt, das durch wettbewerbliche Preisbildung erzeugt wird. Die Konsummöglichkeiten werden durch die Anfangsausstattung an Produktionsfaktoren in der Ökonomie bzw. dem daraus bezogenen Einkommen seitens der Haushalte determiniert. Ein solches Gleichgewicht wird auch als totales Konkurrenzgleichgewicht oder *Walrasianisches Gleichgewicht* bezeichnet.<sup>160</sup> Letzteres ist nach dem französischen Ökonomen Léon Walras (1834–1919) benannt, der mit seinem Hauptwerk *Walras (1874)* als Begründer der Allgemeinen Gleichgewichtstheorie gilt.<sup>161</sup>

Das Marktumfeld der Allgemeinen Gleichgewichtstheorie ist durch das Modell der vollständigen Konkurrenz gekennzeichnet, das drei zentrale Bedingungen voraussetzt. Erstens, auf allen Märkten gibt es sehr viele Anbieter und Nachfrager (atomistische Marktstruktur). Zweitens, es herrschen keine sachlichen, räumlichen oder persönlichen Präferenzen der Marktteilnehmer vor (Homogenität der Güter). Drittens, es besteht vollständige Preisinformation für alle Anbieter und Nachfrage (vollständige Markttransparenz).<sup>162</sup> Hieraus ergibt sich die wichtige Konsequenz, dass sich die Marktteilnehmer als sogenannte Mengenanpasser verhalten. Das heißt, sie sind nicht in der Lage, den Preis zu beeinflussen. Stattdessen müssen sie diesen

---

<sup>160</sup> Das totale Konkurrenzgleichgewicht ist abzugrenzen von partiellen Konkurrenzgleichgewichten auf Teilmärkten einer Volkswirtschaft, die die Interdependenzen zwischen verschiedenen Teilmärkten ignorieren.

<sup>161</sup> Vgl. Siebke, 2003, S. 119 ff.

<sup>162</sup> Vgl. Schumann et al., 1999, S. 207 ff. Diese und andere Annahmen können in Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen auch aufgehoben werden, um in der Realität auftretende Ungleichgewichte, wie beispielsweise Arbeitslosigkeit, zu berücksichtigen.

als gegeben hinnehmen und daran ihre gewinnmaximale bzw. nutzenmaximale Angebots- oder Nachfragemenge ausrichten. Unternehmen maximieren ihren Gewinn unter der Nebenbedingung, dass ihre Produktionsfunktion erfüllt ist. Haushalte maximieren ihren Nutzen entsprechend ihrer Präferenzen und unter der Nebenbedingung, dass ihre Budgetrestriktion erfüllt ist.<sup>163</sup>

Preisen kommt somit in der Allgemeinen Gleichgewichtstheorie eine essentielle Bedeutung zu. Sie signalisieren die Knappheit von Gütern, kompensieren die Kosten eines Gutes, welche volkswirtschaftlich durch dessen Bereitstellung anfallen, lenken Produktionsfaktoren in ihre produktivste Verwendungsrichtung, setzen Anreize und steuern Märkte in ein Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage.<sup>164</sup> Walras gab der Theorie der vollständigen Konkurrenz ihre mathematische Begründung und formulierte ein System simultaner Gleichungen für Angebot und Nachfrage inklusive markträumender Gleichgewichtsbedingungen. Er beschrieb die Suche nach markträumenden Preisen als einen sogenannten *Tatônnement*-Prozess, nachdem ein fiktiver Auktionator die Preise solange anpasst, bis mögliche Angebots- und Nachfrageüberschüsse vollständig abgebaut sind.<sup>165</sup> Die sich in diesem Zustand einstellenden Preise und Mengen werden schließlich zu Gleichgewichtspreisen und Gleichgewichtsmengen. Das Gesetz von Walras besagt, dass in diesem Gleichgewichtszustand die Summe der Überschussnachfragen gleich Null sein muss, das heißt, dass es kein Gut bzw. keinen Markt gibt, für den ein positiver Nachfrageüberschuss besteht. „Sind in einer Ökonomie  $n-1$  Märkte im Gleichgewicht, so ist auch der  $n$ -te Markt im Gleichgewicht“.<sup>166</sup>

### 3.1.2 Mathematische Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen

Der mathematische Beweis für die Existenz eines Walrasianischen Gleichgewichts wurde 1954 von den Ökonomen Gérard Debreu und Kenneth J. Arrow mithilfe von Fixpunkt-Theoremen erbracht.<sup>167</sup> Mathiesen (1985) hat gezeigt, dass ein Arrow-Debreu-Gleichgewichtsmodell als ein System gemischt komplementärer Gleichungen (*Mixed Complementarity Problem*, MCP) formuliert werden kann.<sup>168</sup> Ein MCP ist allgemein wie folgt definiert:

---

<sup>163</sup> Vgl. Schumann et al., 1999, S. 235 f.

<sup>164</sup> Vgl. Schnur & Zika, 2002, S. 212 und Schumann et al., 1999, S. 9.

<sup>165</sup> Vgl. Schumann et al., 1999, S. 212.

<sup>166</sup> Mathematisch lässt sich der  $n$ -te Markt als Linearkombination der anderen  $n-1$  Überschussnachfragen darstellen. Dabei handelt es sich bei dem markträumenden Preisvektor um relative Preise, das heißt, die Preisrelationen zwischen den Märkten sind eindeutig, nur ihre absolute Höhe nicht. Die relativen Preise sind alle (positive) Vielfache des absoluten Preises des sogenannten numéraire (Siebke, 2003, S. 121). Vgl. auch Schumann et al., 1999, S. 241 f.

<sup>167</sup> Vgl. Arrow & Debreu, 1954. Abraham Wald leistete hierfür entscheidende Vorarbeit (vgl. Wald, 1936). Der Übergang von kleineren theoretisch-analytischen Modellvarianten zu komplexen empirisch-numerischen bzw. berechenbaren Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen (*Computable General Equilibrium Models*) wurde u. a. von Johansen, 1960 und Scarf & Hansen, 1973 mitgeprägt. Vgl. auch Böhringer, 1996, S. 47 f.

<sup>168</sup> Andere Lösungsverfahren werden u. a. in Böhringer, 1996, S. 58 ff diskutiert.

$$\text{Bestimme } z \in \mathbb{R}^n \text{ mit } F(z) \geq 0, \quad z \geq 0 \quad \text{und} \quad z^T F(z) = 0 \quad (3-1)$$

Inhaltlich handelt es sich bei dem MCP-Format um ein gemischtes System von Gleichungen und Ungleichungen sowie Bedingungen komplementären Schlupfs, die den notwendigen Bedingungen erster Ordnung für eine Gleichgewichtslösung entsprechen.<sup>169</sup> Mit dem MCP-Format ist es möglich, simultane Preis- und (ökonomische) Aktivitätsbeschränkungen zu berücksichtigen und diskrete Wahlmöglichkeiten in Produktion und Konsum darzustellen. Das Arrow-Debreu-Gleichgewichtsmodell lässt sich mit dem MCP-Format als ein quadratisches nicht-lineares Ungleichungssystem beschreiben, das durch drei Gleichgewichtsbedingungen definiert ist, denen jeweils eine Variablenkategorie paarweise zugeordnet ist.

Die Variablen können jeweils als Vektor definiert werden:<sup>170</sup>

$y$  := ein nicht-negativer Vektor der  $m$  **Aktivitätsniveaus** der Produktionssektoren  $j$   
 $[j = \{1, \dots, m\}]$

$p$  := ein nicht-negativer Vektor der  $n$  **Preise** für alle Güter und Faktoren  $i$   
 $[i = \{1, \dots, n\}]$

$M$  := ein nicht-negativer Vektor der  $h$  **Einkommensniveaus** der Haushalte  $h$  (inkl. Staat)  
 $[h = \{1, \dots, k\}]$

Darauf basierend lassen sich die drei Gleichgewichtsbedingungen im MCP-Format wie folgt darstellen:<sup>171</sup>

**(1) Nullgewinne:**

$$\text{Kosten} - \text{Erlöse} \geq 0, \quad y \geq 0, \quad y^T(\text{Kosten} - \text{Erlöse}) = 0 \quad (3-2)$$

Die Unternehmen passen ihre Aktivitäten  $[y]$  an die gegebenen Marktpreise in ihrer Rolle als Mengenanpasser so an, dass sie kostenminimal und ohne Gewinnüberschüsse wirtschaften ( $\text{Gewinn} = \text{Erlöse} - \text{Kosten}$ ). Das Aktivitätsniveau ist nicht-negativ. Die Komplementaritätseigenschaft  $[y^T(\text{Kosten} - \text{Erlöse}) = 0]$  besagt, dass eine Aktivität mit negativen Gewinnaussichten  $[\text{Kosten} - \text{Erlöse} > 0]$  nicht realisiert wird  $[y = 0]$  bzw. eine realisierte Aktivität  $[y > 0]$  keinen Verlust erwirtschaftet  $[\text{Kosten} - \text{Erlöse} = 0]$ .

**(2) Markträumung:**

$$\text{Angebot} - \text{Nachfrage} \geq 0, \quad p \geq 0, \quad p^T(\text{Angebot} - \text{Nachfrage}) = 0 \quad (3-3)$$

<sup>169</sup> Vgl. Böhringer, 1996, S. 65.

<sup>170</sup> Vgl. Rutherford, 1999.

<sup>171</sup> Vgl. Paltsev, 2004.

Die Güter- und Faktorpreise  $[p]$  stellen sich so ein, dass es keine Überschussnachfragen gibt, das heißt, dass jeder Markt geräumt wird. Die Preise sind nicht-negativ. Die Komplementaritätseigenschaft  $[p^T(\text{Angebot} - \text{Nachfrage}) = 0]$  besagt, dass ein Gut bei einem Angebotsüberschuss  $[\text{Angebot} - \text{Nachfrage} > 0]$  kostenlos zur Verfügung steht  $[p = 0]$  bzw. dass ein positiver Preis  $[p > 0]$  so hoch oder niedrig ist, dass die Nachfrage jederzeit befriedigt wird  $[\text{Angebot} - \text{Nachfrage} = 0]$ .

**(3) Budgetrestriktion:**

$$\text{Ausstattung} - M \geq 0, \quad M \geq 0, \quad M^T(\text{Ausstattung} - M) = 0 \quad (3-4)$$

Die Konsumausgaben der Haushalte (inkl. Staat) überschreiten nicht das verfügbare Einkommen, das sie aus dem Verkauf der Produktionsfaktoren (Arbeit, Kapital, Rohstoffe) beziehen, welche sich per Definition im Besitz der Haushalte befinden.<sup>172</sup> Die Komplementaritätseigenschaft  $M^T(\text{Ausstattung} - M) = 0$  besagt, dass der Wert des Einkommens dem Wert der Faktorausstattung entspricht, wenn das Einkommen positiv ist  $[M > 0]$ . Da dies in der Regel zutrifft, ist die Bedingung der Budgetrestriktion weniger komplementär als definitorisch zu verstehen.<sup>173</sup> Die Faktorausstattung der Haushalte determiniert in Kombination mit den gegebenen Produktionstechniken, Präferenzen und unter den Annahmen der vollständigen Konkurrenz das Einkommensniveau und die Konsummöglichkeiten der betrachteten Volkswirtschaft.

Tabelle 3-1 fasst die paarweise Zuordnung von Gleichgewichtsbedingungen und Variablen des Arrow-Debreu-Gleichgewichtsmodells im MCP-Format zusammen.

**Tabelle 3-1:** Paarweise Zuordnung von Gleichgewichtsbedingungen und Variablen des Arrow-Debreu-Gleichgewichtsmodells im MCP-Format

	Gleichgewichtsbedingungen	Variablen
(1)	Nullgewinne	Mengen (Aktivitäten)
(2)	Markträumung	Preise
(3)	Budgetrestriktion	Einkommen

**Algebraische Darstellung**

Um das Allgemeine Gleichgewicht in algebraischer Form zu definieren, können die drei Gleichgewichtsbedingungen in Anlehnung an Rutherford (1999) und Böhringer & Wiegard (2003) wie folgt dargestellt werden.

Die Nullgewinnbedingung erfordert, dass die Erlöse der Unternehmen ihre Kosten nicht übersteigen dürfen:

<sup>172</sup> Das Einkommen umfasst hauptsächlich Lohn- und Kapitaleinkünfte. Dazu zählen auch die Steuereinnahmen des Staates, wenn Haushalte und Staat zu einem repräsentativen Verbraucher zusammengefasst werden.

<sup>173</sup> Vgl. hierzu auch Küster, 2009 und Zürn, 2010.



$$-G_j(p) = K_j(p) - E_j(p) \geq 0 \quad \forall j \quad (3-5)$$

Dabei ist:

$$K_j(p) \equiv \min \left\{ \sum_i p_i x_i \mid f_i(x) = 1 \right\} \quad \text{die Stückkostenfunktion,}$$

$$E_j(p) \equiv \max \left\{ \sum_i p_i y_i \mid g_i(y) = 1 \right\} \quad \text{die Stückerlösfunktion und}$$

$$G_j(p) = E_j(p) - K_j(p) \quad \text{die Stückgewinnfunktion.}^{174}$$

$x_i$  bezeichnet zudem den Einsatz des Inputfaktors  $i$ .  $f_i(x)$  und  $g_i(y)$  stehen für die zugrunde liegenden Produktionsfunktionen, die die zulässigen Input-Output-Kombinationen unter der gegebenen Produktionstechnik darstellen. Dabei werden linear-homogene Produktionsfunktionen unterstellt. Dies impliziert die Annahme konstanter Skalenerträge (*Constant Returns To Scale*, CRTS), die besagt, dass eine beliebige proportionale Veränderung der Faktoreinsatzmengen eine gleiche proportionale Veränderung der Ausbringungsmenge zur Folge hat.<sup>175</sup>

Gemäß Marktträumungsbedingung darf es keine Überschussnachfragen geben:

$$-N_i = \left( \sum_j y_j \frac{\partial G_j(p)}{\partial p_i} + \sum_h b_{i,h} - \sum_h d_{i,h}(p, M_h) \right) \geq 0 \quad \forall i \quad (3-6)$$

Dabei ist:

$b_{i,h}$  die Anfangsausstattung von Haushalt  $h$  mit Gut  $i$ ,

$U_h(x)$  die Nutzenfunktion von Haushalt  $h$ ,

$d_{i,h}(p, M_h) \equiv \operatorname{argmax} \left\{ U_h(x) \mid \sum_i p_i x_i = M_h \right\}$  die nutzenmaximierende Nachfrage von Haushalt  $h$  nach Gut  $i$  in Abhängigkeit der Preise  $p$  und des Einkommens  $M_h$  und

$N_i = \sum_h d_{i,h}(p, M_h) - \sum_h b_{i,h} - \sum_j y_j \frac{\partial G_j(p)}{\partial p_i}$  die Überschussnachfrage nach Gut bzw. Faktor  $i$ .

<sup>174</sup> Die Stückgewinnfunktion hat folgende Eigenschaften. Sie ist nicht-fallend in den Outputpreisen, nicht-steigend in den Inputpreisen sowie linear-homogen, konvex und stetig in  $p$ . Die Netto-Angebots- und Nachfragefunktionen lassen sich aus der Gewinnfunktion durch Differenzialbildung gemäß Hotellings Lemma ableiten (vgl. Varian, 1999, S. 43 f).

<sup>175</sup> Vgl. Schumann et al., 1999, S. 140 ff. Die CRTS-Annahme in Verbindung mit den Annahmen des Modells der vollständigen Konkurrenz impliziert, dass Outputpreise, Grenzkosten und Durchschnittskosten bei Vernachlässigung der Fixkosten übereinstimmen.

Die letzte Summe auf der rechten Seite der Überschussnachfragegleichung (3-6) bezeichnet das Netto-Angebot der Güter  $i$  der CRTS-Produktionssektoren.<sup>176</sup> Die Nutzenfunktion der Haushalte  $U_h(x)$  weist die Eigenschaft der Nicht-Sättigung auf.<sup>177</sup>

Die Bedingung der Budgetrestriktion erfordert schließlich, dass der Wert der Haushaltsnachfrage nicht den Wert der Faktorausstattung bzw. das verfügbare Einkommen überschreitet:

$$\sum_h p_i b_{i,h} - \sum_h p_i d_{i,h} \geq 0 \quad \forall h \quad (3-7)$$

Aufgrund der Nicht-Sättigungseigenschaft der Nutzenfunktion  $U_h(x)$  kommt dabei das Gesetz von Walras zur Anwendung:

$$\sum_h p_i b_{i,h} = M_h = \sum_h p_i d_{i,h} \quad (3-8)$$

Mit dem Walras-Gesetz lässt sich über die Aggregation der Markträumungsbedingungen und der Nullgewinnbedingungen das Allgemeine Gleichgewicht im MCP-Format wie folgt zusammenfassen:<sup>178</sup>

**Nullgewinne**  
(assoziiert mit  $y_j$ ):

$$y_j [G_j(p)] = 0 \quad \forall j \quad (3-9)$$

**Markträumung**  
(assoziiert mit  $p_i$ ):

$$p_i \left[ \sum_j y_j \frac{\partial G_j(p)}{\partial p_i} + \sum_h b_{i,h} - \sum_h d_{i,h}(p, M_h) \right] = 0 \quad \forall i \quad (3-10)$$

**Budgetrestriktion**  
(assoziiert mit  $M_h$ ):

$$M_h \left[ \sum_h p_i b_{i,h} - \sum_h p_i d_{i,h} \right] = 0 \quad \forall h \quad (3-11)$$

Bezugnehmend auf Gleichung 3-1, lässt sich das Problem der Bestimmung des Allgemeinen Gleichgewichts im MCP-Format auch sehr kompakt formulieren:<sup>179</sup>

$$\begin{bmatrix} y_j \\ p_i \\ M_h \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3-12)$$

<sup>176</sup> Hier kommt Shephards Lemma zur Anwendung, das besagt, dass man aus der Ableitung der Kostenfunktion nach den Faktorpreisen die bedingten Faktornachfragefunktionen gewinnen kann (vgl. Breyer, 2005, S. 52).

<sup>177</sup> Dies ist eine gängige Annahme der Haushaltstheorie, die besagt, dass die Steigung der Nutzenkurven für alle Güter stets positiv ist. Mit steigendem Verbrauch nimmt der jeweilige Nutzenzuwachs wiederum ab (Gesetz vom abnehmenden Grenznutzen), vgl. Schumann et al., 1999, S. 45 f.

<sup>178</sup> Vgl. Böhringer & Wiegard, 2003, S. 28.

<sup>179</sup> Vgl. Mathiesen, 1985, S. 1230.

$$F \begin{bmatrix} y_j \\ p_i \\ M_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G_j(p) \\ -N_i \\ \sum_h p_i b_{i,h} - \sum_h p_i d_{i,h} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3-13)$$

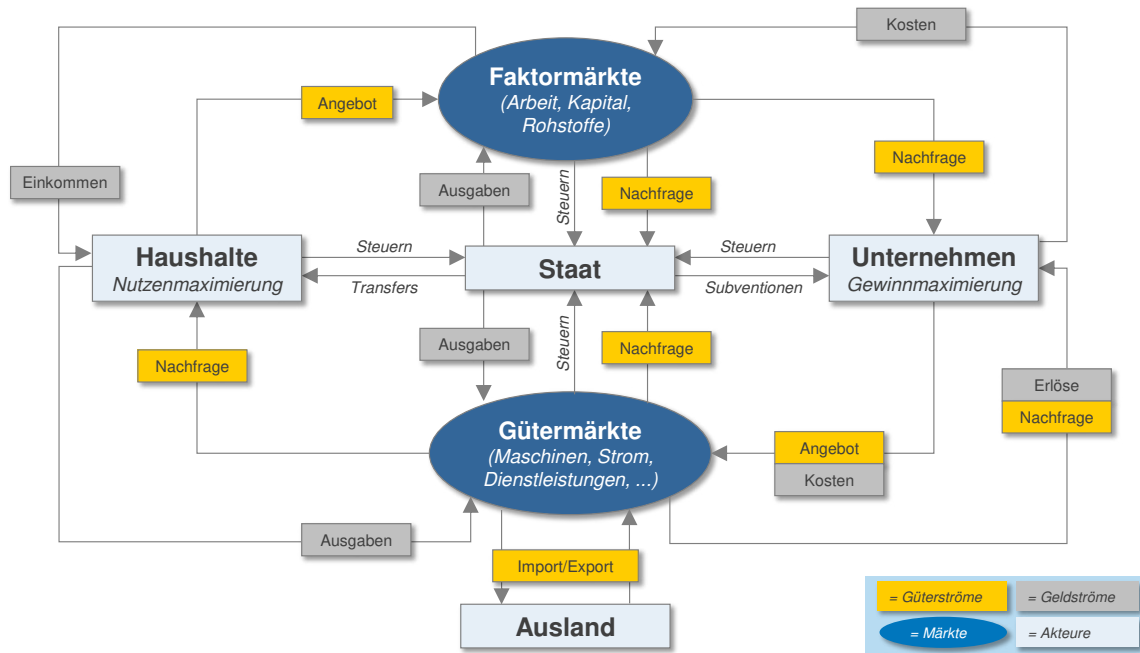
$$\begin{bmatrix} y_j & p_i & M_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -G_j(p) \\ -N_i \\ \sum_h p_i b_{i,h} - \sum_h p_i d_{i,h} \end{bmatrix} = 0 \quad (3-14)$$

Es bleibt anzumerken, dass die Komplementaritätseigenschaft nicht explizit vorgegeben wird, sondern vielmehr ein Ergebnis der Allgemeinen Gleichgewichtsformulierung darstellt.<sup>180</sup> Im Gleichgewicht werden schließlich nur diejenigen Produktionsaktivitäten durchgeführt, die keinen Verlust erwirtschaften. Gleichzeitig können diese aufgrund der vollständigen Konkurrenz aber keine Gewinnüberschüsse erzielen. Des Weiteren gleicht der Preismechanismus stets Angebot und Nachfrage aus, so dass sich jeder Markt, auf dem es zu positiven Knappheitspreisen kommt, im Gleichgewicht befindet, und diejenigen Güter, bei denen das Angebot die Nachfrage übersteigt, einen Preis von Null aufweisen, sprich kostenlos sind.

Abbildung 3-1 illustriert die Gleichgewichtsbedingungen im statischen Grundmodell zudem grafisch, wodurch insbesondere die Bedeutung des geschlossenen Einkommenskreislaufs hervorgehoben wird. Die Abbildung veranschaulicht die volkswirtschaftlichen Ströme zwischen Unternehmen und Haushalten, die auf allen Güter- und Faktormärkten über Angebots- und Nachfrageentscheidungen simultan interagieren. Die Haushalte sind im Besitz der Produktionsfaktoren, die sie auf den Faktormärkten anbieten und daraus ihr Einkommen für ihre Konsumausgaben beziehen, die sie entsprechend ihre Nutzenmaximierungskalküls unter den Nebenbedingungen der Budgetrestriktion und ihrer gegebenen Präferenzstruktur tätigen. Die Unternehmen kaufen diese Produktionsfaktoren und stellen daraus Produktionsgüter her, die sie entsprechend ihres Gewinnmaximierungskalküls unter der Nebenbedingung der Nullgewinne und ihrer gegebenen Produktionstechnik auf den Gütermärkten absetzen. Der Staat hat die Möglichkeit, in das Marktgeschehen einzugreifen, Steuern zu erheben und die daraus generierten Einnahmen für Transfers, Subventionen und öffentliche Konsumausgaben zu verwenden. Das Ausland nimmt als zusätzlicher Akteur über Ex- und Importaktivitäten auf den Gütermärkten teil.

<sup>180</sup> Vgl. Rutherford, 1999, S. 5.

**Abbildung 3-1:** Grafische Illustration des geschlossenen Einkommenskreislaufs im statischen Grundmodell



Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.1.3 CES-Funktionen

In der mikroökonomischen Theorie beschreiben Produktions- und Nutzenfunktionen den Zusammenhang zwischen Input (Faktoreinsatz bzw. Gütereinsatz) und Output (Produktionsmenge bzw. Nutzenniveau) in Unternehmen und Haushalten. Sie geben an, welches Produktions- bzw. Nutzenniveau durch die Kombination eines bestimmten Faktor- bzw. Güterbündels erreicht wird, und ob es bzw. welche Substitutionsmöglichkeiten es zwischen einzelnen Inputs bei einem bestimmten Output-Niveau gibt. Sie charakterisieren daher die Produktionstechnik der Unternehmen sowie die Präferenzstruktur der Haushalte, welche jeweils als Nebenbedingung das Streben nach Gewinn- und Nutzenmaximierung eingrenzen.

Für die unten folgende Modellformulierung, insbesondere für die Darstellung der zugrundeliegenden Produktions- und Nutzenfunktionen, müssen Annahmen über geeignete funktionale Formen getroffen werden. Hierfür bieten sich vor allem sogenannte *constant-elasticity-of-substitution*-Funktionen (CES-Funktionen) an. Sie gehen auf Arrow et al. (1961) zurück und sind im Allgemeinen wie folgt definiert:

$$(3-15) \quad y(x_i) = \vartheta \left( \sum_i \alpha_i x_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}}$$

$$\text{mit } \rho = \frac{\sigma - 1}{\sigma}$$

- $\rho$  Substitutionsparameter
- $\sigma$  Substitutionselastizität
- $y$  Produktionsmenge (Output)
- $x_i$  Faktornachfrage nach Input  $i$
- $\alpha_i$  Verteilungsparameter für Input  $i$
- $\vartheta$  Skalenparameter

In der Produktionstheorie wird die Produktion von  $y(x_i)$  häufig durch die Kombination der Produktionsfaktoren Arbeit ( $L$ ) und Kapital ( $K$ ) beschrieben. In diesem Fall lässt sich die CES-Funktion beispielhaft wie folgt darstellen:

$$y(K, L) = \vartheta(\alpha K^\rho + (1 - \alpha)L^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (3-16)$$

Die im folgenden dargestellten Inhalte und Zusammenhänge von CES-Funktionen werden am Beispiel von Produktionsfunktionen durchgeführt. Sie gelten analog auch für Kosten- und Faktornachfragefunktionen von Unternehmen sowie für entsprechende Nutzen-, Ausgaben- und Güternachfragefunktionen des Haushaltssektors.<sup>181</sup>

Namensgebend für CES-Funktionen ist die Substitutionselastizität  $\sigma$  ( $-\infty \leq \sigma \leq 0$ ), die für alle Faktoreinsatzkombinationen  $(x_1, x_2)$  zur Erreichung einer bestimmten Ausbringungsmenge  $y(x_i)$  als konstant angenommen wird.<sup>182</sup> CES-Funktionen sind zudem linear-homogen, das heißt, sie weisen konstante Skalenerträge auf. Beide Eigenschaften machen CES-Funktionen für den Einsatz in CGE-Modellen attraktiv.<sup>183</sup>

Die Produktion einer bestimmten Ausbringungsmenge  $y$  kann durch verschiedene Techniken, das heißt Faktoreinsatzkombinationen von  $x_1$  und  $x_2$ , erreicht werden, welche in der Mikroökonomik als Isoquante zur Produktion  $y(x_1, x_2)$  bezeichnet werden. Die Substitutionselastizität bestimmt dabei die Krümmung der Isoquanten, und somit die Leichtigkeit der Substitution. Eine Elastizität ist allgemein definiert als das Verhältnis der relativen Änderung einer abhängigen Variable zur relativen Änderung einer unabhängigen Variable. Die Substitutionselastizität der CES-Funktion beschreibt das Verhältnis der relativen Änderung des Faktoreinsatzverhältnisses zur relativen Änderung der Grenzrate der Substitution.<sup>184</sup>

$$\sigma = - \frac{d\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \frac{dx_1}{dx_2}}{d\left(\frac{dx_1}{dx_2}\right) \frac{x_1}{x_2}} = - \frac{\text{Änderung von } \left(\frac{x_1}{x_2}\right) \text{ in } \%}{\text{Änderung von } \left(\frac{dx_1}{dx_2}\right) \text{ in } \%} = - \frac{\text{Änderung von } \left(\frac{x_1}{x_2}\right) \text{ in } \%}{\text{Änderung von } \left(\frac{px_2}{px_1}\right) \text{ in } \%} \quad (3-17)$$

Die Grenzrate der Substitution zwischen zwei Faktoren gibt die Steigung der Isoquanten wieder und sagt aus, wie viele zusätzliche Einheiten eines Faktors benötigt werden, um die Ausbringungsmenge konstant zu halten, wenn der andere Faktor um eine Einheit weniger eingesetzt wird. Da im optimalen Produktionsplan – und damit auch in einem Arrow-Debreu-Gleichgewicht – die Grenzproduktivitätstheorie gilt, werden Faktoren nach ihren Grenzproduktivitäten real entlohnt. Das heißt, das Verhältnis der Faktorgrenzproduktivitäten ist äquivalent zum Faktorpreisverhältnis. Die Substitutionselastizität kann daher auch als umgekehrte

<sup>181</sup> Vgl. Böhringer & Wiegard, 2003, S. 29 ff.

<sup>182</sup> Für den Substitutionsparameter  $\rho$  gilt:  $-\infty \leq \rho \leq 1$ .

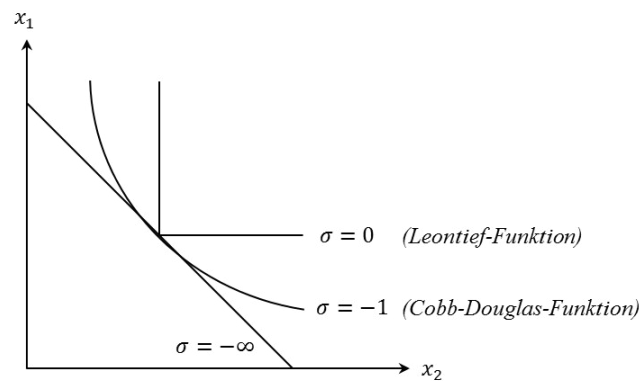
<sup>183</sup> Theoretisch kommen auch andere funktionale Formen in Frage, solange sie die üblichen Konvexitäts- bzw. Konkavitätseigenschaften erfüllen (vgl. Böhringer & Wiegard, 2003). Aus Gründen der Praktikabilität wird jedoch meistens der CES-Funktionstyp verwendet.

<sup>184</sup> Vgl. Küster, 2009.

prozentuale Änderung des Faktoreinsatzverhältnisses infolge einer prozentualen Veränderung des Faktorpreisverhältnisses interpretiert werden.<sup>185</sup>

Die Substitutionselastizität der CES-Funktion kann Werte zwischen 0 und  $-\infty$  annehmen. Abbildung 3-2 stellt verschiedene Krümmungen der Isoquante schematisch dar. Der Fall  $\sigma = -\infty$  bezeichnet perfekte Substitution zwischen den Inputs. Bei  $\sigma = -1$  vereinfacht sich die CES-Funktion zur *Cobb-Douglas-Funktion*  $y(x_i) = \gamma \prod_i x_i^{\alpha_i}$ . Ist  $\sigma = 0$  ergibt sich der Spezialfall einer linear-limitationalen *Leontief-Funktion*  $y(x_i) = \min_i(x_i/\alpha_i)$ , bei der es nur eine einzige Faktoreinsatzkombination zur Erreichung der Ausbringungsmenge  $y$  gibt.

**Abbildung 3-2:** Krümmung der Isoquanten in Spezialfällen der CES-Funktion



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schumann et al., 1999, S. 139.

Um CES-Funktionen für CGE-Modelle praktikabel handhaben zu können, müssen sie in die so genannte kalibrierte Wertanteilsform (*calibrated share form*) umgewandelt werden:<sup>186</sup>

$$(3-18) \quad y = \bar{y} \left[ \sum_i \left( \theta_i \left( \frac{x_i}{\bar{x}_i} \right)^\rho \right) \right]^{1/\rho}$$

mit  $\theta_i = \frac{\bar{x}_i \cdot \bar{w}_i}{\bar{y} \cdot \bar{p}}$

$\bar{y}_i$	Produktionsmenge (Output) im Benchmark
$\bar{p}$	Outputpreis im Benchmark
$\bar{x}_i$	Faktornachfrage nach Input $i$ im Benchmark
$\bar{\theta}_i$	Wertanteilsparameter von Input $i$ im Benchmark
$\bar{w}_i$	Faktorpreis von Input $i$

Die Verwendung der kalibrierten Wertanteilsform erleichtert die numerische Kalibrierung, da die Anzahl mit Daten zu füllender CES-Funktionsparameter reduziert wird, indem die CES-Funktionen auf ein bestehendes Ausgangsgleichgewicht einer zugrunde liegenden so genannten *Social-Accounting-Matrix* (SAM) „aufgesetzt“ werden.<sup>187</sup> Eine SAM ist eine erweiterte Input-Output-Tabelle, die auch Informationen über die Einkommensverteilung enthält und

<sup>185</sup> Vgl. Schumann et al., 1999, S. 170 f.

<sup>186</sup> Vgl. Böhringer & Wiegard, 2003, S. 30 f.

<sup>187</sup> Im Gegensatz zur oben beschriebenen Koeffizientenform ist bei der kalibrierten Wertanteilsform keine Inventurierung von Faktornachfragefunktionen erforderlich (vgl. Böhringer & Wiegard, 2003, S. 32 f).

somit einen geschlossenen Einkommenskreislauf erzeugt, was für die Kalibrierung von CGE-Modellen essentiell ist.<sup>188</sup>

Die im Ausgangsgleichgewicht anhand der SAM gegebenen CES-Funktionsparameter sind:

- Faktor- und Güternachfragemengen
- Faktor- und Güterpreise
- Produktionskosten und Konsumausgaben
- Produktionsaktivitäts- und Nutzenniveaus
- Wertanteile der Güter- bzw. Faktorinputs pro Outputeinheit

Zur vollständigen Formulierung der CES-Funktionen fehlen schließlich noch die Substitutionselastizitäten, die exogen zur SAM bestimmt werden müssen. In der Regel basieren sie auf empirischen Schätzungen oder Expertenannahmen, die meist aus der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur entnommen werden können.

## 3.2 Statisches Grundmodell

### 3.2.1 Datengrundlage und Lösungssoftware

Der Ausgangsdatensatz für das hier verwendete Modell ist die globale Input-Output-Datenbank GTAP (*Global Trade Analysis Project*) in der Version 8 mit Basisjahr 2007. GTAP8 ist eine globale Datenbank, die die Verflechtung der Weltwirtschaft in 129 Ländern bzw. Regionen und 57 Produktionssektoren im Basisjahr 2007.<sup>189</sup> Ihre Stärke liegt unter anderem in der konsistenten Abbildung der globalen Handelsströme sowie der z. T. komplexen Vorleistungsverflechtung zwischen Produktionssektoren der einzelnen Länder.

Neben den Daten der VGR verfügt die GTAP-Datenbank über ein zusätzliches Modul, das Informationen über Energieverbräuche und Energiehandel zwischen Produktionssektoren und Haushalten enthält. Diese Daten basieren im Wesentlichen auf Energiebilanzen der Internationalen Energieagentur (IEA).<sup>190</sup> Um das hier verwendete Modell für die modellgestützte Analyse in Abschnitt 4 einsatzbereit zu machen, sind neben diesen GTAP-Daten noch weitere Datenquellen erforderlich, die in den nachfolgenden Abschnitten separat beschrieben werden.

Für die numerische Lösung des Modells wird die Software GAMS/MPSGE eingesetzt. GAMS (*General Algebraic Modelling System*) ist ein computerbasiertes Modellierungssys-

<sup>188</sup> Bei der Aufstellung einer SAM werden verschiedene Ergebnisse der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR), wie z. B. der Input-Output-Rechnung, der Einkommensrechnung für volkswirtschaftliche Sektoren oder der Finanzierungsrechnung, in einer Kreuztabelle bzw. Matrix zusammengeführt (vgl. Klose et al., 2004).

<sup>189</sup> Vgl. Narayanan et al., 2012a und Narayanan et al., 2012b.

<sup>190</sup> Vgl. McDougall & Lee, 2006.

tem für mathematische Programmierung und Optimierung. Um die Handhabbarkeit in GAMS zu verbessern, wird die Meta-Sprache MPSGE (*Mathematical Programming System For General Equilibrium*) verwendet, die von Rutherford (1999) speziell für die Allgemeine Gleichgewichtsmodellierung in GAMS entwickelt worden ist. MPSGE formuliert das Allgemeine Gleichgewicht mittels CES-Funktionen. Als Lösungsalgorithmus wird der für MCP-Probleme geeignete GAMS/PATH-Solver von Ferris & Munson (2001) genutzt.

Für das Einlesen der GTAP-Datenbank in GAMS wird die von Rutherford (2010) entwickelte Datenroutine verwendet, mit der auch das Ausgangsgleichgewicht des Allgemeinen Gleichgewichtsmodells erzeugt werden kann.

### 3.2.2 Regionale, sektorale und faktorale Auflösung

Für die Modellentwicklung wird die Weltwirtschaft gemäß GTAP-Datenbank in 17 Länder und Regionen mit jeweils 18 Produktionssektoren eingeteilt, denen wiederum fünf Produktionsfaktoren zur Verfügung stehen. Der Konsum der privaten Haushalte und Staat wird jeweils über einen sogenannten repräsentativen Konsumenten zusammengefasst.<sup>191</sup>

Die im Modell betrachteten Länder und Regionen sind in Tabelle 3-2 aufgeführt. Sie lassen sich in die Gruppen EU-28 (darunter Deutschland), OECD, BRICS und Sonstige einteilen. Die Region „Restliche Welt“ enthält alldiejenigen der 129 Länder der GTAP-Datenbank, die nicht in den 16 anderen Modellregionen enthalten sind.

**Tabelle 3-2:** Regionale Auflösung des Modells: 17 Länder und Regionen

Nr.	Abk.	Name	Gruppe
1	DEU	Deutschland	EU-28
2	FRA	Frankreich	
3	AUT	Österreich	
4	EUN	EU-Nord	
5	EUS	EU-Süd	
6	EUE	EU-Ost	
7	USA	USA	OECD
8	SWZ	Schweiz	
9	OEC	Restliche OECD (u. a. Australien, Kanada, Japan)	
10	BRZ	Brasilien	BRICS
11	RUS	Russland	
12	IND	Indien	
13	CHI	China	
14	RSA	Südafrika	Sonstige
15	ARB	Arabische Welt	
16	OPE	Restliche OPEC	
17	ROW	Restliche Welt	

<sup>191</sup> Hier besteht die Möglichkeit, den repräsentativen Konsumenten in unterschiedliche Konsumentengruppen, wie private Haushalte und Staat, aufzuteilen oder sogar die privaten Haushalte nach Einkommensgruppen zu unterscheiden. Diese Möglichkeit wird hier aber nicht weiter verfolgt.



Tabelle 3-3 beschreibt die 18 im Modell unterschiedenen Produktionssektoren. Sie lassen sich in die Gruppen Energieproduktion (darunter Strom), energieintensive Industrie, Verarbeitendes Gewerbe (ohne energieintensive Industrie) und restliche Wirtschaft (insbesondere Dienstleistungen) einteilen.

**Tabelle 3-3:** Sektorale Auflösung des Modells: 18 Produktionssektoren

Nr.	Abk.	Name	Gruppe
2	GAS	Erdgas	Energie- produktion
3	CRU	Erdöl	
4	OIL	Mineralöl	
5	ELE	Strom	
6	IRS	Eisen & Stahl	Energieintensive Industrie
7	NFM	Nichteisen-Metalle	
8	NMM	Nichtmetallische Mineralien	
9	PPP	Papier, Pappe, Druck	
10	CHM	Chemische Erzeugnisse	
11	FOT	Lebensmittel & Tabak	Verarbeitendes Gewerbe
12	MVH	Fahrzeuge	
13	MAC	Maschinen	
14	ROI	Sonstiges Verarb. Gewerbe	Restliche Wirt- schaft
15	BUI	Bauwirtschaft	
16	TRN	Transport	
17	AGR	Landwirtschaft	
18	SER	Dienstleistungen	

Tabelle 3-4 listet die 5 Produktionsfaktoren des Modells auf. Der Produktionsfaktor Arbeit wird in qualifizierte und gering-qualifizierte Arbeit aufgeteilt, um der Heterogenität des Arbeitsmarktes gerecht zu werden. CO<sub>2</sub>-Zertifikate werden nicht direkt als Produktionsfaktor in der GTAP-Datenbank erfasst. Sie können aber aus den Energiedaten unter Verwendung geeigneter Emissionsfaktoren abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 3.4.2). Falls es zu einem Zertifikatehandel kommt, werden CO<sub>2</sub>-Zertifikate zu einem weiteren Produktionsfaktor. Dies ist jedoch abhängig von der jeweils unterstellten Energie- und Klimapolitik.

**Tabelle 3-4:** Faktorale Auflösung des Modells: 4 Produktionsfaktoren plus mögliche CO<sub>2</sub>-Zertifikate

Nr.	Abk.	Name
1	K	Kapital (inklusive Land)
2	SKL	Qualifizierte Arbeit
3	USK	Gering-qualifizierte Arbeit
4	RES	Erschöpfbare Energieressourcen
(5)	(CO <sub>2</sub> )	(CO <sub>2</sub> -Zertifikate)

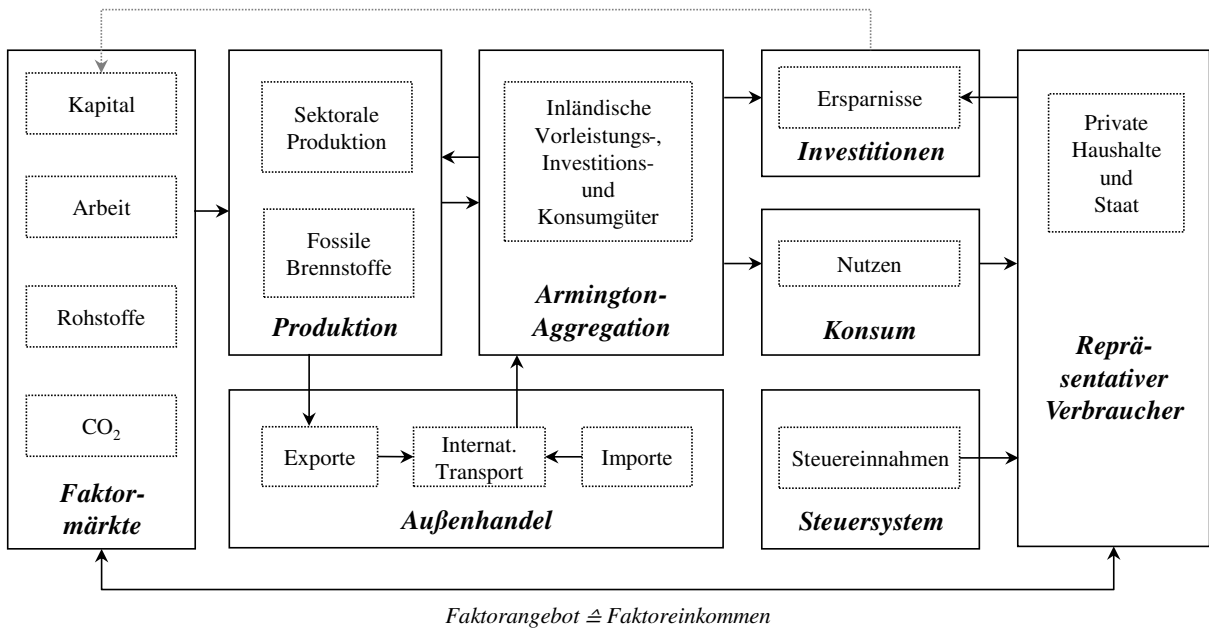
### 3.2.3 Modellformulierung und -struktur

Die Formulierung des Grundmodells basiert auf dem GTAP-EG-Modell (*GTAP-Energy in GAMS*) von Rutherford & Paltsev (2000). Das GTAP-EG-Modell ist vollständig dokumentiert und mithilfe des GTAP-Datensatzes, der GTAP-Datenroutine nach Rutherford (2010) sowie unter Verwendung von GAMS/MPSGE inklusive PATH-Solver reproduzierbar. Die Programmierung des hier verwendeten Modells basiert auf dem in Rutherford & Paltsev (2000, S. 61) beschriebenen Programmcode und folgt dabei auch Küster (2009) und Zürn (2010), die ebenfalls eine Weiterentwicklung des GTAP-EG-Modells beinhalten.

Abbildung 3-3 stellt die Struktur des modellierten Wirtschaftskreislaufs schematisch dar. Die in den Produktionssektoren auf Basis der Produktionsfaktoren hergestellten Güter werden gehandelt und entweder im Inland verbraucht oder ins Ausland exportiert. Der internationale Handel wird von einem separaten internationalen (Güter-)Transportsektor durchgeführt, der die Exporte und Importe zwischen den Modellregionen verteilt. Die im Inland hergestellten Vorleistungs-, Investitions- und Konsumgüter fließen zusammen mit den Importen in die so genannte Armington-Aggregation ein, aus der die Vorleistungs-, Investitions- und Konsumgüter für die inländische Produktion und die inländische Endnachfrage (Konsum und Investitionen) entnommen werden. Die auf Armington (1969) zurückgehende Armington-Aggregation klassifiziert inländische und importierte Produkte als imperfekte Substitute, um eine (empirisch beobachtbare) Heterogenität zwischen inländischen und importierten Gütern zuzulassen. Der repräsentative Verbraucher, bestehend aus privaten Haushalten und Staat, bezieht sein Einkommen zum einen aus dem Verkauf der Produktionsfaktoren, die sich annahmegemäß im Besitz des repräsentativen Verbrauchers befinden. Zum anderen fließen die Steuereinnahmen in das Einkommen des repräsentativen Verbrauchers ein. Mit diesem Einkommen tätigt er seine nutzenstiftenden Konsumausgaben und entscheidet implizit darüber, welcher Teil dieses Einkommens durch zurückgelegte (renditebringende) Ersparnisse den Investitionsaktivitäten von Unternehmen zugutekommt.

Im Folgenden wird die Modellformulierung von Produktion, Handel, Konsum und Investitionen näher erläutert.

**Abbildung 3-3:** Schematische Darstellung der Kreislaufzusammenhänge im Modell



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Küster, 2009.

### 3.2.3.1 Produktion

Der gesamtwirtschaftliche Output jeder Modellregion entspricht der Summe der Outputs der einzelnen Produktionssektoren, die wiederum eine Funktion der zugrunde liegenden Produktionsfaktoren Kapital ( $K$ ), Arbeit ( $L$ ) und erschöpfbarer Energieressourcen ( $RES$ ) darstellen. Betrachtet man CO<sub>2</sub>-Zertifikate ( $Z$ ) als Produktionsfaktor und interpretiert die Vorleistungen des Energiesektors ( $E$ ) und anderer Produktionssektoren ( $M$ ) als Produktionsfaktoren im weiteren Sinne, lässt sich der Output  $Y_{i,r}$  – anhand des CES-Funktionstyps – für Produktionssektor  $i$  in Modellregion  $r$  wie folgt definieren:

$$Y_{i,r} = f(K_{i,r}, L_{i,r}, E_{i,r}, M_{i,r}, Z_{i,r}) \quad (3-19)$$

$$\Rightarrow Y_{i,r} = \left( \theta_{i,r}^K K_{i,r}^{\rho^Y} + \theta_{i,r}^L L_{i,r}^{\rho^Y} + \theta_{i,r}^E E_{i,r}^{\rho^Y} + \theta_{i,r}^M M_{i,r}^{\rho^Y} + \theta_{i,r}^Z Z_{i,r}^{\rho^Y} \right)^{1/\rho^Y} \quad (3-20)$$

mit  $\theta_{i,r}^K + \theta_{i,r}^L + \theta_{i,r}^E + \theta_{i,r}^M + \theta_{i,r}^Z = 1$

$$\rho^Y = \frac{\sigma - 1}{\sigma} \quad (-\infty \leq \rho \leq 1)$$

Diese Darstellungsweise wird im Allgemeinen als *KLEM*-Format bezeichnet. In energieökonomischen CGE-Modellen hat sich die Konvention entwickelt, die Primärenergieträger Erdöl, Erdgas und Kohle mit den Sekundärenergieträgern Strom und Mineralöl zu einem Energieaggregat ( $E$ ) zu bündeln und zusammen mit dem aus anderen Produktionssektoren bezogenen Vorleistungen (Material,  $M$ ) als jeweils eigenständige Produktionsinputs bzw. Produktionsinputgruppe aufzufassen. In einem klimapolitischen Regime mit Emissionshandel, ist für jede CO<sub>2</sub>-Emissionseinheit zusätzlich ein CO<sub>2</sub>-Zertifikat ( $Z$ ) vorzuweisen, das bei einem positiven Zertifikatspreis als separater Produktionsfaktor aufgefasst werden kann. Die Produkti-

onsfaktoren werden mit einem Anteilsparameter  $\theta_{i,r}$  gewichtet, deren Summe über die Produktionsfaktoren Eins beträgt. Die Faktoren hängen über die konstante Substitutionselastizität  $\sigma = 1/(1 - \rho^Y)$ , mit  $(-\infty \leq \rho \leq 1)$  zusammen.

Für jeden Produktionssektor lässt sich per CES-Funktion eine eigene Produktionstechnik definieren, die über die jeweilige Zusammensetzung bzw. Schachtelung („Nesting“) der verschiedenen Inputs in Kombination mit unterschiedlichen Substitutionselastizitäten auf jeder einzelnen Stufe der Nesting-Struktur charakterisiert werden kann. In dem hier betrachteten Modell werden die Produktionssektoren zu drei Gruppen zusammengefasst, für die jeweils eine gemeinsame Produktionstechnik bzw. Nesting-Struktur hinterlegt wird:

- Nicht-Energiesektoren (inkl. Mineralölindustrie)
- Erschöpfbare Energieressourcen (Kohle, Erdöl, Erdgas)
- Stromerzeugung

Die Reaktion eines jeden Sektors auf Preissignale oder Angebots- und Nachfraganpassungen anderer Sektoren kann dabei innerhalb der Gruppen trotz gleicher Nesting-Struktur unterschiedlich ausfallen, da die Gewichtung der einzelnen Inputs entsprechend der im Ausgangsdatensatz jeweils gegebenen Produktionsstruktur individuell ist. So dürfte die Anpassungsreaktion eines energieintensiven Sektors (z. B. Eisen- & Stahlindustrie) an exogene Energiepreisänderungen beispielweise stärker ausfallen als in anderen Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes (z. B. Maschinenbau).

Im Folgenden wird die Produktionsstruktur der betrachteten Gruppen einzeln definiert. Die ökonomische Aktivität jedes Produktionssektors orientiert sich – gemäß Mengenanpasserverhalten – an einem Abgleich zwischen Produktionskosten und Marktpreis. Dabei ist zu beachten, dass sich in einem Arrow-Debreu-Gleichgewicht aufgrund der Dualität von Produktion und Kosten die Produktionsfunktion aus der Kostenfunktion ergibt und umgekehrt.<sup>192</sup> Jeder Sektor handelt gemäß Gewinnmaximierungs- bzw. Kostenminimierungskalkül (Dualität) unter Einhaltung der Nullgewinnbedingung. Der Marktpreis wird dabei als markträumender Preis auf den Gütermärkten aus dem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage gebildet.

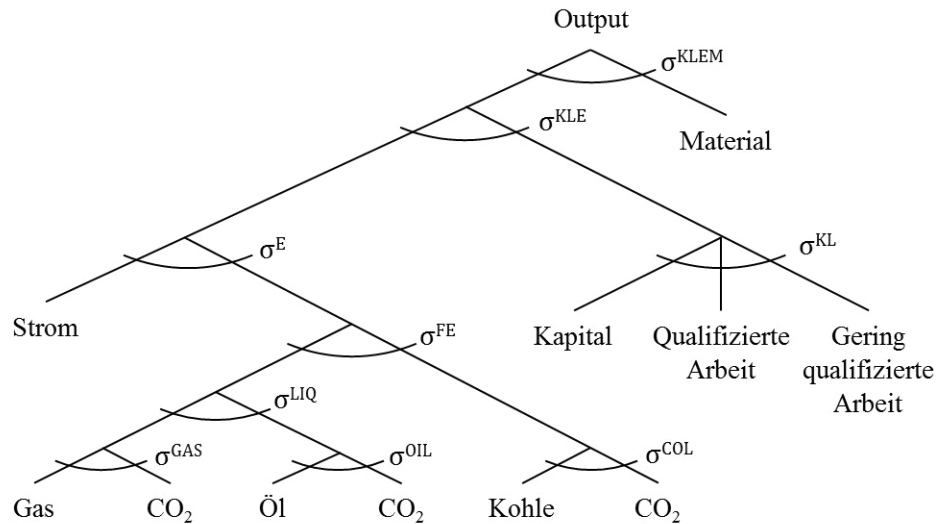
Die Nesting-Struktur der Mineralölindustrie sowie aller Nicht-Energiesektoren ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Auf der obersten Stufe wird zwischen dem Materialaggregat ( $M$ ) und den übrigen Produktionsfaktoren ( $KLE$ ) unterschieden. Auf der zweiten Stufe gibt es eine Unterscheidung zwischen dem Energieaggregat und dem Kapital-Arbeit-Aggregat. Innerhalb des Energieaggregats gibt es wiederum eine Unterscheidung zwischen Strom und fossilen Brennstoffen, welche schließlich in feste (Kohle) und flüssige bzw. gasförmige Brennstoffe

---

<sup>192</sup> Analog gilt die Dualität für die Nutzen- und Ausgabenfunktionen im Haushaltssektor. Für eine ausführliche Erläuterung des mikroökonomischen Dualitätsprinzips vgl. Schumann et al., 1999, S. 75 ff (Nutzen und Ausgaben) und S. 163 ff (Produktion und Kosten).

(Öl, Gas) aufgeteilt werden. Für jede eingesetzte Einheit dieser fossilen Brennstoffe wird eine bestimmte Einheit CO<sub>2</sub> frei, für die jeweils ein CO<sub>2</sub>-Zertifikat vorzuhalten ist, falls es sich bei dem betrachteten Sektor um einen emissionshandlungspflichtigen Sektor handelt. Die Werte der jeweils geltenden Substitutionselastizitäten ( $\sigma$ ) auf den einzelnen Stufen sind im Anhang A.1 aufgelistet.

**Abbildung 3-4:** Nesting-Struktur der Nicht-Energiesektoren (inklusive Mineralölindustrie)

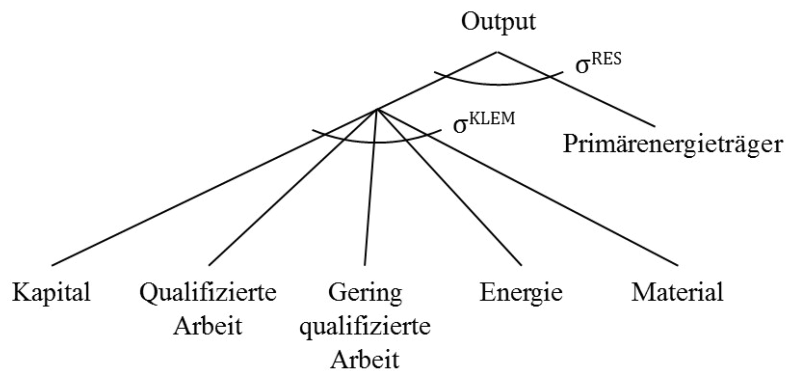


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Küster, 2009 und Zürn, 2010.

Die Nesting-Struktur der erschöpfbaren Energieressourcen Kohle, Erdöl und Erdgas ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Auf der ersten Stufe wird zwischen dem jeweiligen Primärenergie-träger (gewonnen durch Bergbau bzw. Extraktion) und dem Aggregat der *KLEM*-Produktionsfaktoren unterschieden. Dieses Aggregat ist auf der zweiten Ebene limitational miteinander verknüpft.<sup>193</sup> Dadurch werden diese Sektoren als fixe Technologiebeschreibung abgebildet.<sup>194</sup> Die Substitutionselastizitäten  $\sigma^{RES}$  werden im Rahmen der Erstellung der GTAP8-Datenbank für jeden Rohstoff und die meisten Länder auf Basis historischer Daten geschätzt. Sie sind in Tabelle A-3 im Anhang aufgeführt.

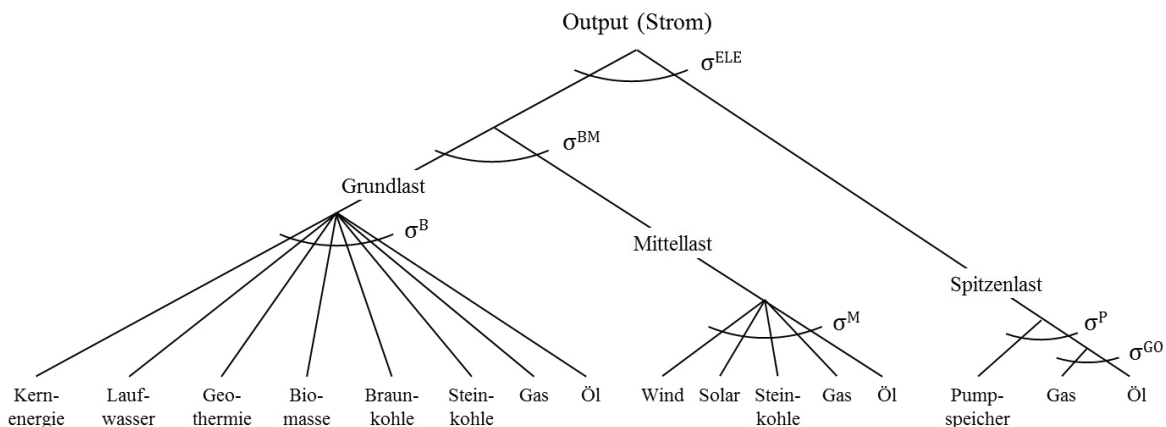
<sup>193</sup> Vgl. Liste der Substitutionselastizitäten in Tabelle A-1, Tabelle A-2 und Tabelle A-3. In dem hier betrachteten Modell gibt es der Einfachheit halber keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Sektoren der erschöpfbaren Energieressourcen. Diese fallen erst bei der Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas in den nachfragenden Sektoren statt.

<sup>194</sup> Vgl. Rutherford & Paltsev (2000), S. 32 f.

**Abbildung 3-5:** Nesting-Struktur der erschöpfbaren Energieressourcen

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Küster, 2009 und Zürn, 2010.

Die Produktionsstruktur der Stromerzeugung wird technologisch disaggregiert betrachtet (vgl. Abbildung 3-6). Die Modellierung orientiert sich hierbei an Küster et al. (2007), Küster (2009) und Zürn (2010), die wiederum auf dem in Böhringer & Rutherford (2005) beschriebenen und dokumentierten Modell aufbauen. Demzufolge wird Strom nicht anhand einer Durchschnittstechnologie generiert, sondern über 16 verschiedene Technologien, die jeweils nach Energieträger und Lastsegment (Grund-, Mittel-, Spitzenlast) unterschieden werden. Dies soll den technologischen Besonderheiten der Stromerzeugung Rechnung tragen. Es handelt sich um den in Abschnitt 2.4.3 angesprochenen Hybrid-Modellierungsansatz, bei dem technologiedetaillierte Bottom-up-Elemente in den Top-down-Ansatz des CGE-Modells integriert werden. Hierdurch können technologiespezifische Politikstrategien im Stromsektor, wie beispielsweise Emissionshandel oder Einspeisevergütungen für erneuerbare Energien gemäß EEG, modelliert werden, um deren Auswirkungen auf den Strompreis und damit letztlich auch auf die Stromkosten privater Haushalte erfassen zu können.

**Abbildung 3-6:** Nesting-Struktur der Stromerzeugung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Küster, 2009 und Zürn, 2010.

In jedem der drei Lastsegmente ist die Substitutionsmöglichkeit zwischen den in Frage kommenden Energieträgern relativ hoch, was die Homogenität des Gutes Strom widerspiegelt. Zwischen den Segmenten Grund- und Mittellast gibt es eine moderate Substitutionalität.

Spitzenlastzeiten treten nur wenige Stunden im Jahr auf, die im Jahresvergleich wiederum verhältnismäßig wenig variieren. Hier werden nur höchst flexible Technologien, wie Pumpspeicher oder Öl- und Gasturbinen eingesetzt. Dementsprechend kann von einem relativ konstanten Anteil der jährlichen Stromerzeugung ausgegangen werden. Diese Tatsache wird durch eine niedrige Substitutionselastizität zwischen dem Grund- und Mittellastsegment sowie dem Spitzenlastsegment abgebildet. Die Werte der jeweils geltenden Substitutionselastizitäten ( $\sigma$ ) sind im Anhang A.1 aufgelistet. Dort finden sich auch die Preis- und Mengenkomponten jeder einzelnen Technologie, anhand derer der gesamte Output des Produktionsguts Strom jeder Modellregion auf die einzelnen Technologien entsprechend aufgeteilt wird. Diese zusätzlichen Daten (vgl. Anhang A.2) basieren im Wesentlichen auf IEA (2009) und IEA et al. (2010).

Jede einzelne Stromerzeugungstechnologie hat eine eigenständige Kostenstruktur, die für Deutschland in Tabelle 3-5 dargestellt ist. Dabei handelt es sich pro Erzeugungstechnologie um eine limitationale Leontief-Produktionsfunktion mit jeweils fixen Inputkoeffizienten (das heißt die Substitutionselastizität der CES-Funktion ist jeweils gleich Null).

**Tabelle 3-5:** Kostenkomponenten der Stromerzeugungstechnologien in Deutschland 2007

Lastsegment	Erzeugungstechnologie	Kostenanteile		
		Arbeit	Kapital	Vorleistung/Energie
Spitzenlast	Wasser Pumpspeicher	14%	74%	12%
	Gas GT	14%	37%	49%
	Öl GT	1%	38%	61%
Mittellast	Gas GuD	6%	16%	78%
	Steinkohle	6%	40%	54%
	Solar (PV)	0%	81%	19%
	Wind	0%	96%	4%
Grundlast	Geothermie	3%	82%	15%
	Wasserkraft	13%	73%	13%
	Biomasse	3%	25%	72%
	Gas GuD	5%	13%	83%
	Steinkohle	5%	31%	64%
	Braunkohle	4%	34%	62%
	Kernenergie	4%	47%	49%

Quelle: Eigene Berechnungen nach Küster, 2009.

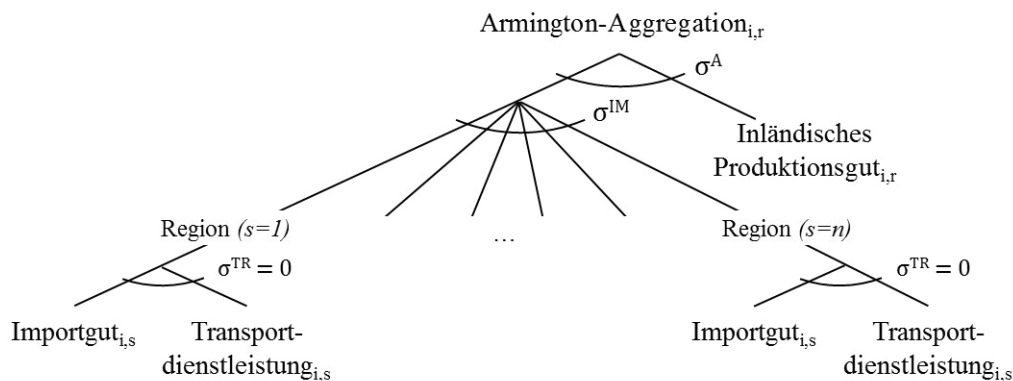
### 3.2.3.2 Handel

Sowohl die Produktionsfaktoren als auch die daraus hergestellten Produktionsgüter werden auf den Faktor- und Gütermärkten gehandelt. Die Marktträumungsbedingungen fordern, dass auf sämtlichen Güter- und Faktormärkten das Angebot der jeweiligen Nachfrage entspricht bzw. dass es nicht zu Überschussnachfragen kommt (vgl. Gleichung 3-6). Die Marktpreise sorgen dabei für den nötigen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage.

Dem internationalen Handel kommt im Modell eine besondere Bedeutung zu, da hierdurch die Rückkopplungseffekte zwischen der Wirtschaft in einer Modellregion mit der restlichen Weltwirtschaft erfasst werden. Alle Modellregionen sind über bilaterale Handelsströme miteinander verbunden, über die alle Güter handelbar sind. Für jedes Gut existiert eine Export-Import-Matrix, aus der die Güterströme zwischen Herkunfts- und Bestimmungsland sowie deren Veränderung im Zeitablauf abgelesen werden kann.<sup>195</sup>

In jeder Modellregion werden importierte und inländisch produzierte Güter in der Armington-Aggregation gebündelt und den Unternehmen als Vorleistungs- und Investitionsgüter sowie dem repräsentativen Verbraucher als Konsumgüter zugänglich gemacht. Die hierfür nötige internationale Gütertransportaktivität wird über eine eigenständige Cobb-Douglas-Produktionsfunktion modelliert, die eine Zusammensetzung der inländisch produzierten Güter jeder einzelnen Modellregion darstellt.<sup>196</sup> Die Armington-Aggregation wird ebenfalls als CES-Funktion modelliert. Ihre Nestingstruktur ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Auf der obersten Stufe wird bei jedem Produktionsgut in jeder Modellregion zwischen der inländischen Produktion und dem Import aus anderen Modellregionen unterschieden. Für die Armington-Elastizität wird gemäß Rutherford & Paltsev (2000) ein Wert von  $\sigma^A = 4$  angesetzt, um ein gewisses Maß an Substitutionalität zu ermöglichen, das zwar relativ hoch, allerdings nicht unbegrenzt ist. Innerhalb des Import-Aggregats wird zwischen den Importen der verschiedenen Modellregionen unterschieden. Hier schlagen Rutherford & Paltsev (2000) eine doppelt so hohe Substitutionselastizität ( $\sigma^{IM} = 8$ ) vor, da die Quelle der Importe weniger entscheidend ist, als die Unterscheidung zwischen einem importiertem und einem inländisch produzierten Gut auf der obersten Stufe. Auf der dritten Stufe gibt es eine limitationale Beziehung zwischen dem eigentlichen Importgut und der zugehörigen Transportdienstleistung ( $\sigma^{TR} = 0$ ), die je nach Importgut und Importregion unterschiedlich ausfällt.

**Abbildung 3-7:** Nesting-Struktur der Armington-Aggregation



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Rutherford & Paltsev, 2000, S. 35.

<sup>195</sup> Vgl. Küster, 2009.

<sup>196</sup> Vgl. Rutherford, 2010, S. 20.

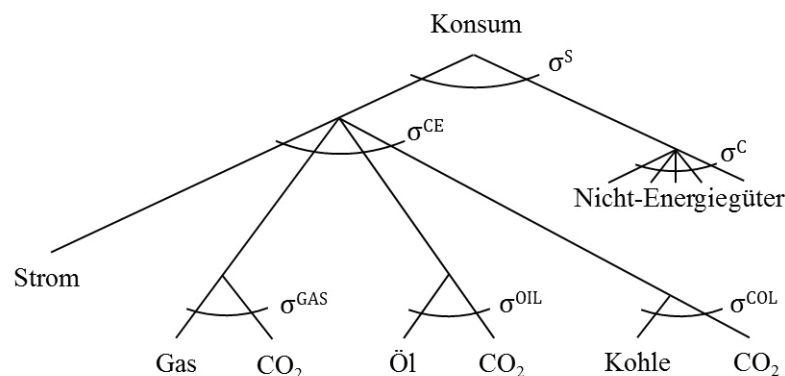


Die Markträumungsbedingungen sorgen schließlich dafür, dass sich weltweit sämtliche Export- und Importströme zu Null saldieren. In den einzelnen Modellregionen kann es dennoch zu individuellen Leistungsbilanzüberschüssen bzw. -defiziten kommen.

### 3.2.3.3 Konsum und Investitionen

Wie in Abbildung 3-3 dargestellt, stiftet der Konsum von Gütern (Input) dem repräsentativen Verbraucher Nutzen (Output). Analog zu den geschachtelten CES-Produktionsfunktionen wird dies über eine geschachtelte CES-Nutzenfunktion modelliert, die den Zusammenhang zwischen den konsumierten Gütern in den einzelnen Modellregionen gemäß Abbildung 3-8 beschreibt. Auf der obersten Stufe der Nesting-Struktur gibt es zunächst eine Substitutionsbeziehung zwischen dem Energieaggregat und allen Nicht-Energiegütern. Letztere werden über eine Cobb-Douglas-Funktion aggregiert. Das Energie-Aggregat setzt sich zusammen aus Strom und fossilen Brennstoffen, welche wiederum je Einheit limitational mit einer CO<sub>2</sub>-Emissionseinheit verknüpft sind. Die Werte der jeweils geltenden Substitutionselastizitäten ( $\sigma$ ) sind in Anhang A.1 aufgelistet. In der weiteren Modellentwicklung (unten in Abschnitt 3.4) wird diese Nesting-Struktur für Deutschland modifiziert, um der technologisch disaggregierten Darstellung der Energienachfrage privater Haushalte Rechnung zu tragen. Die in Abbildung 3-8 dargestellte Nesting-Struktur gilt daher für alle Modellregionen außer Deutschland.

**Abbildung 3-8:** Nesting-Struktur des Konsums (ohne disaggregierte Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Rutherford & Paltsev, 2000, S. 37.

Die in den einzelnen Produktionssektoren hergestellten Investitionsgüter werden pro Modellregion über eine Cobb-Douglas-Funktion zu einem einheitlichen Investitionsgut aggregiert, das wiederum den in der nächsten Periode verfügbaren Kapitalstock erhöht (mehr hierzu unten in Abschnitt 3.3 zur Dynamisierung). Über die Höhe des Anteils der Investitionsgüter am gesamten Output jedes Produktionssektors entscheidet der repräsentative Verbraucher modellendogen anhand seiner Präferenzen, der Budgetrestriktion und dem Kosten-Nutzen-Verhältnis seiner Ersparnisse, für die er eine Rendite in Form des Marktpreises für Kapital bekommt (vgl. Abbildung 3-3). Steigt die Kapitalrendite beispielsweise stärker als die ande-

ren Einkommensquellen, legt der repräsentative Verbraucher infolge seines Nutzenmaximierungskalküls einen höheren Anteil seines Einkommens für Ersparnisse zurück und konsumiert entsprechend weniger, da er von diesen höheren Ersparnissen in der nächsten Periode mehr Einkommen erhält, das er entsprechend für zusätzlichen Konsum verwenden kann, was ihm wiederum einen größeren Nutzen stiftet. Die Kapitalrendite bildet sich am Kapitalmarkt als dortiger markträumender Preis zwischen Kapitalangebot und -nachfrage, was von der Produktionsaktivität der Unternehmen abhängig ist und von den sektorspezifischen Kapitalkosten beeinflusst wird.

#### 3.2.3.4 Unvollkommene Arbeitsmärkte

Die neoklassischen Annahmen der Markträumung sind nicht auf allen Märkten realitätsnah. Auf Arbeitsmärkten stellt Vollbeschäftigung eher die Ausnahme, (unfreiwillige) Arbeitslosigkeit die Regel dar (z. B. aufgrund von Lohnstarreheiten). Die Arbeitslosigkeit von qualifizierten und gering-qualifizierten Erwerbspersonen im Basisjahr 2007 kann für die einzelnen Modellregionen anhand von Daten der *International Labour Organization* (ILO) bestimmt werden. Diese sind in Tabelle 3-6 dargestellt.

**Tabelle 3-6:** Arbeitslosenraten bei qualifizierten und gering-qualifizierten Erwerbspersonen in den Modellregionen im Basisjahr 2007

	Qualifiziert	Gering-qualifiziert	Gesamt
Deutschland	4,6 %	11,4 %	8,6%
Frankreich	4,4 %	10,2 %	8,0%
Österreich	2,6 %	5,4 %	4,4%
EU-Nord	2,6 %	7,0 %	5,2%
EU-Süd	3,4 %	9,2 %	7,3%
EU-Ost	3,6 %	9,8 %	7,9%
Schweiz	2,4 %	4,6 %	3,6%
USA	2,3 %	5,9 %	4,6%
Restliche OECD	2,7 %	3,9 %	3,5%
Brasilien	5,8 %	8,7 %	8,2%
Russland	3,1 %	8,0 %	6,1%
Indien	2,1 %	5,1 %	4,3%
China	0,5 %	1,3 %	1,1%
Südafrika	7,7 %	26,5 %	22,9%
Arabische Welt	6,6 %	9,5 %	8,9%
Restliche OPEC	18,1 %	7,7 %	8,8%
Rest der Welt	4,0 %	5,8 %	5,4%

Quelle: ILO, 2010<sup>197</sup>

<sup>197</sup> Qualifizierte Beschäftigte umfassen die Gruppen 1-3 nach ISCO-88, gering-qualifizierte Beschäftigte die Gruppen 4-9 sowie 0 nach ISCO-88.

Die Bandbreite der in Tabelle 3-6 dargestellten Arbeitslosenraten bei qualifizierten und gering-qualifizierten Erwerbspersonen zwischen den betrachteten Modellregionen im Basisjahr 2007 ist groß. Sie reicht von faktischer Vollbeschäftigung der qualifizierten Erwerbspersonen in China (0,5 %) bis zu einer hohen Arbeitslosigkeit unter den gering-qualifizierten Erwerbspersonen in Südafrika (26,5 %). In Deutschland war im Jahr 2007 eine im EU-Vergleich recht hohe Arbeitslosigkeit in Höhe von 8,6 % zu verzeichnen, die sich deutlich zwischen den qualifizierten und gering-qualifizierten Erwerbspersonen unterscheidet (4,6 % bzw. 11,4 %). In Frankreich lag die Arbeitslosenrate (gesamt) bei 8,0 %, in den USA bei 4,6 % und in China bei 1,1 %.

Um Arbeitslosigkeit im Modell zu berücksichtigen, wird der Strategie von Küster (2009) gefolgt und eine unvollständige Markträumung auf den regionsspezifischen Arbeitsmärkten zugelassen. Dazu müssen Nebenbedingungen für das Angebot sowohl qualifizierter als auch gering-qualifizierter Arbeit formuliert werden. Durch die Einführung zweier neuen Variablen (Arbeitslosigkeit bei qualifizierten und gering-qualifizierten Beschäftigten) kann Arbeitslosigkeit modellendogen erklärt werden. Unter Berücksichtigung der Arbeitslosenraten für qualifizierte Beschäftigte ( $URSK_r$ ) bzw. gering-qualifizierte Beschäftigte ( $URUN_r$ ) ergibt sich das regionsspezifische Arbeitsangebot für qualifizierte Beschäftigte ( $SKLS_r$ ) bzw. gering-qualifizierte Beschäftigte ( $USKS_r$ ) nach Küster (2009) wie folgt:

$$SKLS_r = (1 + URSK_r)SKL_r \quad (3-21)$$

$$USKS_r = (1 + URUN_r)USK_r \quad (3-22)$$

Der Zusammenhang zwischen Lohnsatz und Arbeitslosigkeit wird nach Küster (2009) durch die Berücksichtigung eines Mindestlohns bei gering-qualifizierten und bei qualifizierten Beschäftigten durch die Implementierung einer Lohnkurve modelliert. Der Mindestlohn bei gering-qualifizierten Beschäftigten erfordert, dass der reale Lohnsatz ( $w_r/P_r$ ) in jeder Modellregion mindestens dem festgelegten Mindestlohn  $w_r^{min}$  entsprechen muss:

$$\frac{w_r}{P_r} \geq w_r^{min} \quad (3-23)$$

Dabei stellt  $w_r$  den nominalen Lohnsatz und  $P_r$  den Konsumgüterpreisindex pro Modellregion dar. In einer reinen Wettbewerbswirtschaft entspricht der Reallohn der Grenzproduktivität des Faktors Arbeit. Sinkt die Grenzproduktivität unter die Reallohngrenze, die eine Anpassung des Lohnsatzes an die Grenzproduktivität verhindert, tritt unfreiwillige, lohninduzierte Arbeitslosigkeit auf.

Bei qualifizierten Beschäftigten wird nach Küster (2009) eine Lohnkurve hinterlegt, die sich an der empirischen Arbeit von Blanchflower & Oswald (1995) orientiert. Die Lohnkurvenhypothese sagt aus, dass Löhne mit der regionalen Arbeitslosenquote in negativer Weise zu-

sammenhängen, also hohe Arbeitslosigkeit zu niedrigen und geringe Arbeitslosigkeit zu höheren Löhnen führt.<sup>198</sup> Demnach lautet die Lohnkurve wie folgt:

$$\frac{w_r}{P_r} = ur_r^\beta \quad (3-24)$$

Dabei reflektiert  $ur_r$  die Arbeitslosenrate und  $\beta$  die Arbeitslosenelastizität des Lohnsatzes. Letztere ist stets negativ und beträgt nach der empirischen Arbeit von Blanchflower & Oswald (1995) ungefähr -0,1. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Arbeitslosigkeit um 10 % mit einer Verringerung des Reallohns um 1 % einhergeht.

### 3.2.3.5 Wettbewerbsfähigkeit

Aufgrund der in der GTAP-Datenbank enthaltenen bilateralen Handelsströme, sowohl zwischen einzelnen Produktionssektoren innerhalb eines Landes als auch zwischen Ländern (Außenhandel), können die Veränderungen der sektoralen Wettbewerbsfähigkeit pro Modellregion erfasst werden. Die Wettbewerbsfähigkeit kann anhand des sektorspezifischen relativen Welthandelsanteils (RWA) gemessen werden, der die Exporte  $EX_r^i$  eines Sektors  $i$  in Land  $r$  ins nationale und globale Verhältnis setzt und wie folgt definiert ist:<sup>199</sup>

$$RWA_r^i = \frac{EX_r^i}{\sum_r EX_r^i} / \frac{EX_r^i}{\sum_{i,r} EX_r^i} \quad (3-25)$$

Ein RWA-Wert von größer als Eins zeigt eine überdurchschnittliche Wettbewerbsfähigkeit eines Produktionssektors innerhalb eines Landes an. Je höher der Wert, desto größer ist der Stellenwert eines Sektors im nationalen Vergleich mit anderen Sektoren und im internationalen Vergleich des betreffenden Landes mit der restlichen Welt. Eine Übersicht über den RWA aller Produktionssektoren aller Modellregionen im Basisjahr 2007 findet sich im Anhang in Tabelle A-20. Abbildung 3-9 stellt den RWA für ausgewählte Sektoren in Deutschland und der EU-28 im Basisjahr 2007 dar. Demnach ist die Produktion von Fahrzeugen, Papier und chemischen Erzeugnissen in Deutschland und der EU im Vergleich zu anderen Produktionsgütern besonders wettbewerbsfähig. Dagegen haben NE-Metalle oder Mineralöl einen eher geringen Stellenwert. Insbesondere im Fahrzeugbau weist Deutschland eine überdurchschnittlich hohe Wettbewerbsfähigkeit auf. Im Transportsektor rangiert sie dagegen deutlich unter dem europäischen Schnitt.

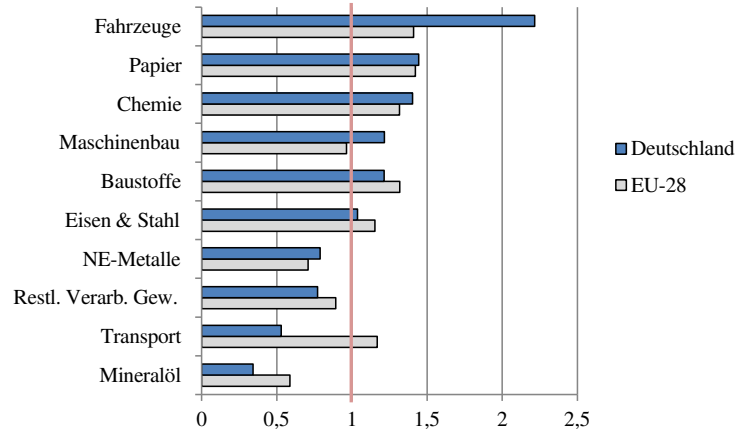
Betrachtet man den RWA einzelner Sektoren im internationalen Vergleich, lässt sich auf die Wettbewerbsfähigkeit einzelner Länder in einem bestimmten Markt schließen. Abbildung 3-10 stellt den RWA beispielhaft für die Chemie- und die Mineralölindustrie im Basisjahr 2007 dar. In der Chemieindustrie weisen Deutschland, Frankreich und Nordeuropa im inter-

<sup>198</sup> Diese Hypothese lässt sich auch mit Effizienzlohnmodellen nach Solow (1979) und Gewerkschaftsverhandlungsmodellen nach McDonald & Solow (1981) theoretisch begründen.

<sup>199</sup> Ein anderer vergleichbarer Indikator wäre der *Revealed Comparative Advantage* (RCA), der die Exportperformance eines Sektors eines Landes mit dessen Importperformance vergleicht (vgl. Vogel, 2000).

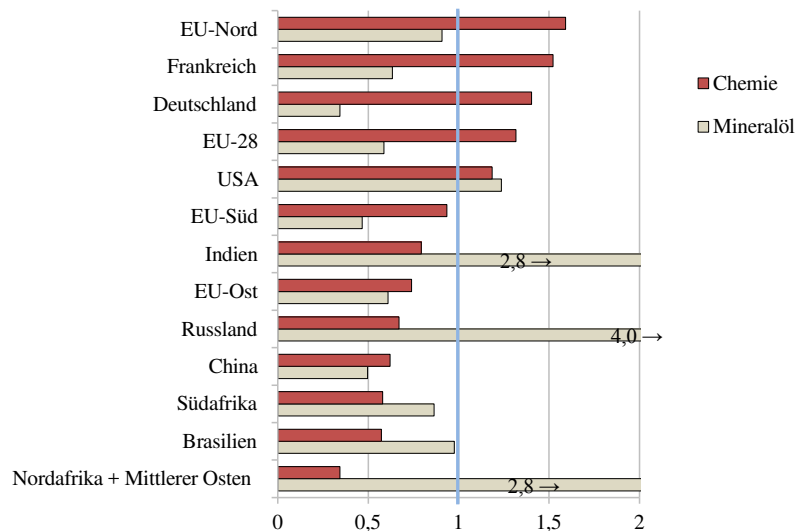
nationalen Vergleich demnach die größte Wettbewerbsfähigkeit auf, während sie in Südafrika, Brasilien sowie in der Region Nordafrika und Mittlerer Osten am geringsten ist. Letztere weist dagegen eine sehr hohe Wettbewerbsfähigkeit in der Mineralölindustrie auf, die in Indien gleich hoch und in Russland sogar noch höher ist. Dagegen ist die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und chinesischen Mineralölindustrie im Vergleich der hier betrachteten Modellregionen am geringsten.

**Abbildung 3-9:** Relativer Welthandelsanteil (RWA) für ausgewählte Sektoren in Deutschland und der EU-28 im Basisjahr 2007



Quelle: GTAP8-Datenbank

**Abbildung 3-10:** Relativer Welthandelsanteil (RWA) der Chemie- und Mineralölindustrie in ausgewählten Ländern im Basisjahr 2007



Quelle: GTAP8-Datenbank

### 3.3 Wachstum und Dynamik

Um die Erreichung der langfristigen energie- und klimapolitischen Ziele Deutschlands und der EU bis 2030 bzw. 2050 analysieren zu können, bedarf es einer dynamischen Wirkungsanalyse, die unterschiedliche Wachstumsraten der im Modell betrachteten Volkswirtschaften endogen berücksichtigt. Wachstum und Dynamik können in CGE-Modellen durch eine im

Zeitablauf veränderte Ausstattung an Produktionsfaktoren sowie eine Veränderung ihrer Produktivitäten einbezogen werden. Modellierungstechnisch stehen hierfür verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die u. a. in Springer (1998) diskutiert werden. Grundsätzlich lässt sich zwischen einer vorausschauenden, einer adaptiven und einer myopischen Erwartungsbildung der Wirtschaftssubjekte unterscheiden, die ausschlaggebend ist für die entsprechende Modellierungstechnik in CGE-Modellen. Tabelle 3-7 stellt die grundsätzlichen Dynamisierungsmöglichkeiten in CGE-Modellen gegenüber. In rekursiv-dynamischen Modellen mit einer myopischen und/oder adaptiven Erwartungsbildung wird eine Sequenz statischer Gleichgewichte gelöst. Das heißt, in jeder Periode passen sich die Wirtschaftssubjekte unter Gültigkeit der Gleichgewichtsbedingungen an die veränderten Rahmenbedingungen an (z. B. Preisänderungen). In gesamt-dynamischen Modellen mit vorausschauender Erwartungsbildung wird eine intertemporale Optimierung durchgeführt. Das bedeutet, dass die Wirtschaftssubjekte die in jeder Periode geltenden Rahmenbedingungen antizipieren und in ihre Investitionsentscheidungen bereits zu Beginn des Zeitraums einbeziehen. Dies entspricht einer rationalen Erwartungsbildung und impliziert intertemporale Substitutionsmöglichkeiten.

**Tabelle 3-7:** Übersicht über die grundsätzlichen Dynamisierungsmöglichkeiten in CGE-Modellen

<b>Erwartungsbildung</b>	<b>Zeithorizont</b>	<b>Modellierungstechnik</b>
Myopisch	Gegenwart	Rekursiv-dynamisch (Sequenz statischer Gleichgewichte)
Adaptiv	Vergangenheit	Rekursiv-dynamisch (Sequenz statischer Gleichgewichte)
Vorausschauend (rational)	Gegenwart und Zukunft	Gesamt-dynamisch (intertemporale Optimierung)

Der theoretische Vorteil der intertemporalen Betrachtung bzw. des gesamt-dynamischen Ansatzes geht auf Kosten der regionalen, sektoralen und technologischen Detailtiefe.<sup>200</sup> Daher wird für das hier verwendete Modell der rekursiv-dynamische Ansatz gewählt, um eine höhere regionale, sektorale und technologische Detailtiefe zu ermöglichen.

Der anhand des Modells betrachtete Zeithorizont reicht vom Basisjahr 2007 in 5-Jahresschritten bis zum Jahr 2030, in denen jeweils eine statische Allgemeine Gleichgewichtslösung des statischen Grundmodells (vgl. Abschnitt 3.2) erzeugt wird. Im Folgenden werden die für die Modelldynamik verantwortlichen Einflussgrößen und Treiber einzeln erläutert.

### ***Investitionen, Ersparnisse und Kapitalstock***

Das verfügbare Produktionskapital wird modellendogen bestimmt, indem der pro Modellregion  $r$  und Periode  $t$  verfügbare Kapitalstock  $KSt_{r,t}$  zu Beginn jeder Periode durch Investiti-

<sup>200</sup> Vgl. Springer (1998), S. 6.

onen  $I_{r,t-1}$  erhöht und durch Abschreibungen  $(1 - \delta)KSt_{r,t-1}$  der Vorperiode wie folgt verringert wird:

$$KSt_{r,t} = (1 - \delta)KSt_{r,t-1} + I_{r,t-1} \quad (3-26)$$

Die Abschreibungsrate  $\delta$  beträgt pro Periode 4%.<sup>201</sup> In den zugrunde liegenden Input-Output-Daten der GTAP-Datenbank gibt es allerdings keine Informationen über die Höhe des Kapitalstocks. Der periodisch eingesetzte Kapitalinput wird dort nur über periodische Kapitalströme bzw. -dienste erfasst. Das heißt, die im Modell getätigten Investitionen müssen einer Stock-to-Flow-Umwandlung unterzogen werden, um die periodischen Kapitaleinkünfte, sprich die regionsspezifische Ausstattung des Produktionsfaktors Kapital, adäquat zu aktualisieren. Der periodische Kapitaleinkünfte  $K_{r,t}$  ergibt sich somit aus:

$$K_{r,t} = (1 - \delta)K_{r,t-1} + \frac{K_{r,t0}}{KSt_{r,t0}} I_{r,t-1} \quad (3-27)$$

Das bedeutet, der Kapitaleinkünfte  $K_{r,t}$  wird in Höhe der Abschreibungsrate  $\delta$  verringert und durch den Kapitaleinkünfteanteil der Investitionen erhöht, der anhand des Ausgangsgleichgewichts in  $t_0$  gegeben ist. Da Investitionsentscheidungen modellendogen getroffen werden, wird auch der verfügbare Kapitalstock, abgesehen von der exogen gegebenen Abschreibungsrate  $\delta$ , über die Zeit endogen bestimmt. Die Investitionstätigkeiten sind dabei eingeschränkt durch die geltende I-S-Identität, das heißt dem neoklassisch geforderten Gleichgewicht von Investitionen und Ersparnissen, das durch die im Modell ermittelte Kapitalrendite sichergestellt wird (Markträumungsbedingung).

### ***Ausstattung und Produktivität des Faktors Arbeit***

Die Wachstumsrate des regionalen Arbeitsangebots für qualifizierte und gering-qualifizierte Beschäftigte muss exogen vorgegeben werden. Für langfristige Projektionen des weltweiten Wirtschaftswachstums auf Basis der Veränderungen einzelner Wachstumstreiber können die Informationen der so genannten BASELINE-Datenbank nach Fouré et al. (2012) verwendet werden. Auf Basis des globalen makroökonomischen MaGE-Modells (*Macroeconomics of the Global Economy*) berechnen sie regionsspezifische Projektionen der Entwicklung der Produktionsfaktoren und einem dazu konsistenten Wirtschaftswachstum bis zum Jahr 2050. Das beinhaltet Projektionen zur Bevölkerungsentwicklung, zum Erwerbersonenpotential, zur Erwerbsquote von Frauen, zur Entwicklung des Bildungsniveaus, zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Steigerung des allgemeinen technischen Fortschritts (totale Faktorproduktivität).

Basierend auf der BASELINE-Datenbank wird das regionale Arbeitsangebot für qualifizierte ( $SKLS_{r,t}$ ) und gering-qualifizierte Beschäftigung ( $USKS_{r,t}$ ) im hier beschriebenen Modell pro Modellregion  $r$  und Periode  $t$  mit dem entsprechenden Wachstumsparameter  $g_{r,t}^{SKLS}$  bzw.

<sup>201</sup> Hierbei wird auf Angaben der GTAP-Datenbank zurückgegriffen (vgl. Dimaranan, 2006).

$g_{r,t}^{USKS}$  sowie dem Wachstum der totalen Faktorproduktivität ( $f_{r,t}$ ) fortgeschrieben. Der Wachstumsparameter  $g_{r,t}^{SKLS}$  bzw.  $g_{r,t}^{USKS}$  setzt sich zusammen aus dem Wachstum des Erwerbspersonenpotentials ( $l_{r,t}$ ) sowie dem Wachstum des Anteils des Erwerbspersonenpotentials mit bzw. ohne Hochschulausbildung ( $s_{r,t}$  bzw.  $u_{r,t}$ ):

$$SKLS_{r,t} = (1 + g_{r,t}^{SKLS} + f_{r,t}) \cdot SKLS_{r,t-1} \quad (3-28)$$

$$USKS_{r,t} = (1 + g_{r,t}^{USKS} + f_{r,t}) \cdot USKS_{r,t-1} \quad (3-29)$$

$$g_{r,t}^{SKLS} = l_{r,t} + s_{r,t} \quad (3-30)$$

$$g_{r,t}^{USKS} = l_{r,t} + u_{r,t} \quad (3-31)$$

mit	$l_{r,t}$	Wachstum des Erwerbspersonenpotentials pro Modellregion $r$ und Periode $t$
	$s_{r,t}$	Wachstum des Anteils des Erwerbspersonenpotentials mit Hochschulausbildung pro Modellregion $r$ und Periode $t$
	$u_{r,t}$	Wachstum des Anteils des Erwerbspersonenpotentials ohne Hochschulausbildung pro Modellregion $r$ und Periode $t$
	$f_{r,t}$	Wachstum der totalen Faktorproduktivität pro Modellregion $r$ und Periode $t$

Tabelle 3-8 stellt die Parameter  $g_{r,t}^{SKLS}$ ,  $g_{r,t}^{USKS}$  und  $f_{r,t}$  in den einzelnen Modellregion als jährlichen Durchschnittswert über den betrachteten Zeitraum 2007 bis 2030 dar. In Deutschland nimmt das Erwerbspersonenpotenzial der qualifiziert Beschäftigten im Zeitraum 2007 bis 2030 um durchschnittlich 0,6 % zu. Dies hängt zum einen mit einem demografisch bedingten Rückgang des gesamten Erwerbspersonenpotenzials zusammen und zum anderen mit einer kontinuierlichen Zunahme desjenigen Anteils der Erwerbspersonen, die über eine Hochschulausbildung verfügen. Spiegelbildlich sinkt der Anteil der Erwerbspersonen, die über keine Hochschulausbildung verfügen. Dementsprechend geht das Erwerbspersonenpotenzial der gering-qualifiziert Beschäftigten in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 im Schnitt um 1,2 % p.a. zurück. Die totale Faktorproduktivität nimmt hingegen um 1 % p.a. zu. Dies reflektiert die Tatsache, dass sich Deutschland bereits auf einem hohen Entwicklungsstand bzgl. Arbeitsproduktivität befindet. In den osteuropäischen Mitgliedsstaaten der EU-28 (2,2 %) oder auch in Schwellenländern, wie China (4,7 %) und Indien (3,5 %), weisen die Projektionen der BASELNE-Datenbank auf deutlich größere Produktivitätsanstiege hin.



**Tabelle 3-8:** Wachstum und Dynamik von Arbeitsangebot, totaler Faktorproduktivität und Energieproduktivität im Zeitraum 2007 bis 2030 (Durchschnittswachstum p.a.)

	$g_{r,t}^{SKLS}$	$g_{r,t}^{USKS}$	$f_{r,t}$	$e_{r,t}$
Deutschland	0,6 %	-1,2 %	1,0 %	0,4 %
Frankreich	2,7 %	-1,2 %	1,0 %	0,4 %
Österreich	2,1 %	-1,1 %	1,1 %	0,4 %
EU-Nord	2,6 %	-1,1 %	1,1 %	0,7 %
EU-Süd	1,7 %	-1,0 %	1,1 %	0,5 %
EU-Ost	2,2 %	-1,0 %	2,5 %	1,8 %
Schweiz	0,6 %	-0,6 %	0,9 %	0,1 %
USA	1,2 %	-0,4 %	0,8 %	0,9 %
Restliche OECD	2,0 %	-0,6 %	1,3 %	0,5 %
Brasilien	3,7 %	0,6 %	1,7 %	0,4 %
Russland	0,0 %	-1,4 %	3,4 %	2,1 %
Indien	4,7 %	1,4 %	3,5 %	1,9 %
China	3,2 %	-0,2 %	4,7 %	3,2 %
Südafrika	2,0 %	0,9 %	1,5 %	1,5 %
Arabische Welt	4,6 %	1,0 %	0,9 %	0,7 %
Restliche OPEC	3,8 %	1,7 %	1,5 %	0,9 %
Rest der Welt	3,6 %	1,7 %	2,0 %	0,7 %

Quelle: BASELINE-Datenbank (vgl. Fouré et al., 2012)

#### **Ausstattung mit Primärenergieträgern und Energieproduktivität**

Die Ausstattung der einzelnen Modellregionen mit international handelbaren erschöpfbaren Primärenergieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas) wird über die Zeit als konstant angenommen:

$$RES_{r,t} = RES_{r,t-1} = RES_{r,t_0} \quad (3-32)$$

Das bedeutet dagegen nicht, dass der Primärenergieverbrauch der einzelnen Modellregionen konstant ist. Die Konstanz der Ressourcenausstattung bezieht sich nicht auf den physischen Bestand an Energieressourcen, sondern auf einen gleichbleibenden Fluss in der Input-Output-Systematik, ähnlich wie beim Kapitalstock.<sup>202</sup>

Die Energieproduktivität verändert sich dagegen sehr wohl in den einzelnen Modellregionen im Zeitverlauf. Gemäß BASELINE-Datenbank kann sie als Ausdruck kumulierter Innovationen oder technischen Fortschritts im Energieverbrauch bzw. -einsatz verstanden werden. Sie spiegelt unter anderem Wirkungsgradsteigerungen und Lernkurveneffekte wider.<sup>203</sup> Im Modell werden die Energieproduktivitätsänderungen exogen durch autonome Energieeffizienzverbesserungen (*Autonomous Energy Efficiency Improvements, AEEI*) berücksichtigt, die die Parametrisierung der Produktions- und Nutzenfunktionen aktualisieren. Die Veränderung der Energieproduktivität  $e_{r,t}$  pro Modellregion  $r$  und Periode  $t$  ist in Tabelle 3-8 als Durch-

<sup>202</sup> Vgl. weitere Ausführungen hierzu in Küster (2009).

<sup>203</sup> Vgl. Fouré et al., 2012.

schnittswachstum pro Jahr dargestellt. Ähnlich der Veränderungen der totalen Faktorproduktivität  $f_{r,t}$  fällt das Wachstum der Energieproduktivität in Deutschland mit 0,4 % p.a. im Zeitraum 2007 bis 2030 vergleichsweise gering aus. In den osteuropäischen Mitgliedsstaaten der EU-28 (1,8 %) oder auch in Schwellenländern, wie China (3,2 %) und Indien (1,9 %), liegen die Projektionen der BASELNE-Datenbank deutlich höher.

### **Ausstattung mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten**

Auch CO<sub>2</sub>-Zertifikate sind als Produktionsfaktor aufzufassen, wenn ein Emissionshandelssystem implementiert ist. Im Modell wird dem repräsentativen Verbraucher jeder Modellregion ein Anfangsbudget zugestanden, das im Laufe der Zeit entsprechend des jeweiligen Emissionsreduktionsziels dynamisiert wird. Dazu wird die Anfangsausstattung ( $Z_{r,t}$ ) mit einem entsprechenden Reduktionspfad multipliziert, der durch die Emissionsreduktionsvorgaben ( $v_{r,t}$ ) pro Modellregion  $r$  und Periode  $t$  gegeben ist:

$$Z_{r,t} = (1 - v_{r,t}) \cdot Z_{r,t-1} \quad (3-33)$$

## **3.4 Technologiefundierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte**

Im Folgenden wird das Grundmodell um eine technologiefundierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland erweitert. Dazu wird die in Abschnitt 3.2.3.3 beschriebene Konsumstruktur des Modells für Deutschland neu geordnet, um die Energienachfrage hinsichtlich ihrer jeweiligen Verwendungszwecke, zur Herstellung der Energiedienstleistungen, unterscheiden zu können. Dazu werden zunächst Modellierung und Struktur vorgestellt und anschließend die zugrunde liegende Datenbasis und Parametrisierung beschrieben. Schließlich wird, ergänzend zu Abschnitt 3.3, auf die dynamische Handhabung des Fahrzeug- und Gebäudebestands eingegangen.

### **3.4.1 Modellformulierung und -struktur**

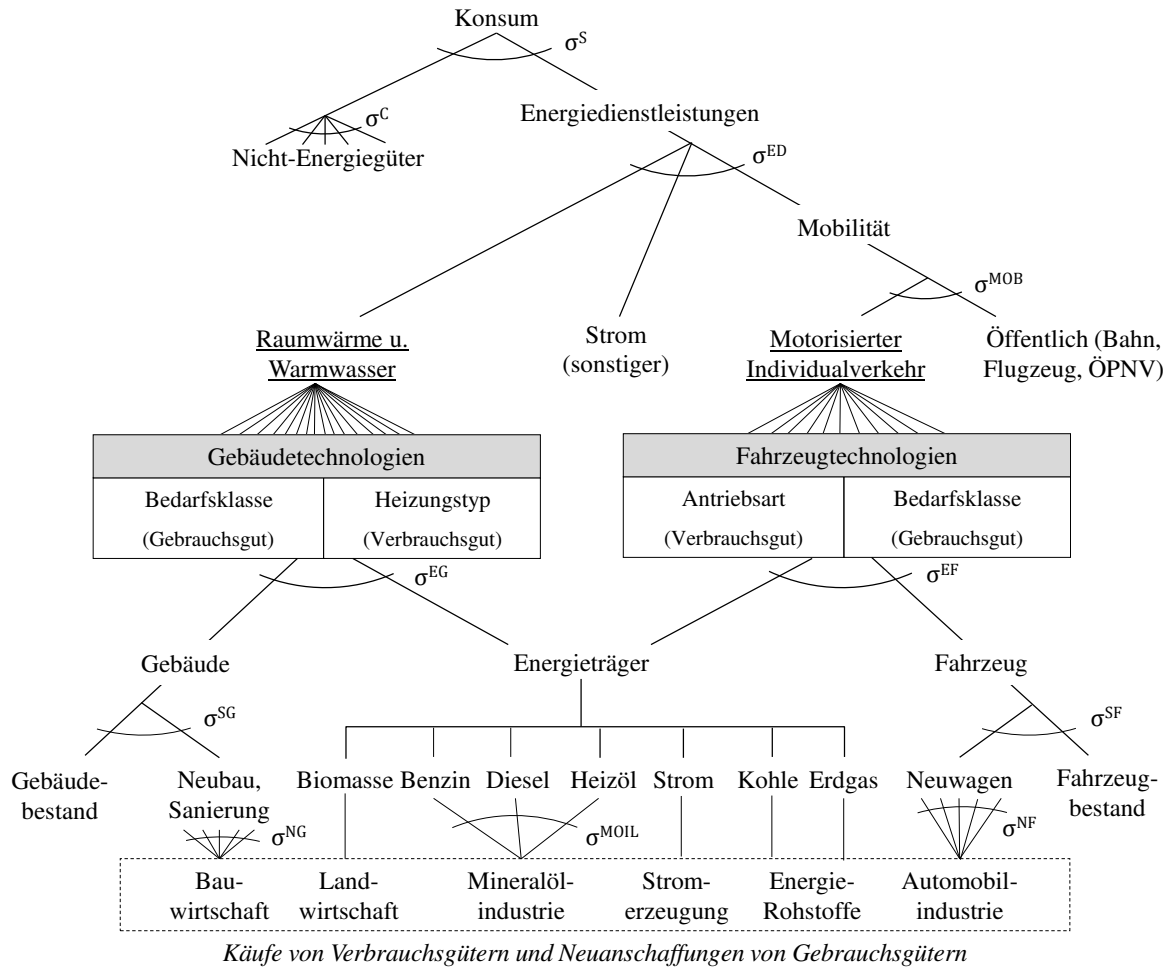
#### *3.4.1.1 Konsumstruktur*

Abbildung 3-11 veranschaulicht die geänderte Nesting-Struktur des Konsums in Deutschland (vgl. Abbildung 3-8). Auf der obersten Aggregationsstufe werden nicht mehr die Energieträger direkt, sondern vielmehr die eigentlichen Energiedienstleistungen nachgefragt, die dort in substitutionaler Beziehung zu den Nicht-Energiegütern stehen.<sup>204</sup> Dabei handelt es sich um die drei Energiedienstleistungen Mobilität, Raumwärme und Warmwasser sowie sonstiger Strom. Raumwärme und Warmwasser werden dabei zu einer Energiedienstleistung zusammengefasst, da sie in der Regel mit derselben Heizungsanlage ‚hergestellt‘ werden. Derjenige Anteil des konsumierten Stroms, der nicht für Mobilität, Raumwärme und Warmwasser ver-

<sup>204</sup> Die entsprechenden Werte der Substitutionselastizitäten ( $\sigma$ ) sind in Anhang A.1 aufgelistet.

wendet wird, wird zu der Energiedienstleistung ‚sonstiger Strom‘ zusammengefasst. Er beinhaltet die Nachfrage nach Beleuchtung, Informations- und Kommunikationsgeräten sowie sonstigen Haushaltsgeräten (z. B. Kühlschrank, Waschmaschine).

**Abbildung 3-11:** Nesting-Struktur der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland inklusive ihrer Verknüpfung mit der restlichen Wirtschaft in schematischer Darstellung



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Energiedienstleistungen werden im Modell wie zusätzliche, künstliche Produktionsgüter behandelt, die der repräsentative Verbraucher selbst herstellt und implizit an sich selbst veräußert. Die physikalische Einheit der nachgefragten Energiedienstleistung Mobilität kann dabei als Personenkilometer, die der nachgefragten Energiedienstleistung Raumwärme als beheizte Wohnfläche (20 °C) interpretiert werden. Beim sonstigen Strom handelt es sich um die geleistete Arbeit (z. B. kWh). Dieser Ansatz folgt in Teilen Abrell (2009) und Beestmüller & Abrell (2012).

Auf der zweiten Aggregationsstufe, gemäß Abbildung 3-11, entscheidet der Verbraucher zwischen den drei Energiedienstleistungen, zwischen denen eine geringe Substitutionsmöglichkeit unterstellt wird ( $\sigma^{ED} = 0,3$ ). Bei der Energiedienstleistung ‚Mobilität‘ hat der Verbraucher zusätzlich die Möglichkeit, zwischen öffentlicher Mobilität, das heißt „gekauften“, öffentlichen Transportdienstleistungen (Bahn, Flugzeug, ÖPNV) und privatem, motorisierten

Individualverkehr zu wählen.<sup>205</sup> Hier wird eine relativ hohe Substitutionsmöglichkeit unterstellt ( $\sigma^{MOB} = 2$ ), um die Transportmittelwahl nicht zu sehr einzuschränken.

Abbildung 3-11 veranschaulicht auch den Zusammenhang zwischen der Energienachfrage bzw. der Energiedienstleistungsnachfrage privater Haushalte und der zweckgebundenen Nachfrage assoziierter Güter. Zur Herstellung der Energiedienstleistungen Raumwärme und Warmwasser sowie motorisierter Individualverkehr stehen dem Verbraucher unterschiedliche Fahrzeug- und Gebäudetechnologien zur Verfügung, die jeweils als eine Kombination aus einer Gebäude- und Fahrzeugklasse (Bedarfsklasse) mit einem Energieträger charakterisiert sind. Der Energieträger gibt Aufschluss über den eingesetzten Heizungstyp bzw. die eingesetzte Antriebsart. Gebäude und Fahrzeuge lassen sich als Gebrauchsgüter (*durable goods*) charakterisieren, das über mehrere Perioden verwendet werden kann. Im hier betrachteten Modell wird dies als ein konstanter Wertstrom aus dem in einer Periode jeweils verfügbaren Gebäude- und Fahrzeugbestand modelliert. Dagegen stellen Energieträger Verbrauchsgüter (*nondurable goods*) dar, die in einer einzigen Periode vollständig aufgebraucht und nicht wieder verwendet werden können. Ihre Handhabung entspricht der in der GTAP-Datenbank enthaltenen Energienachfrage der Input-Output-Systematik.<sup>206</sup>

Jede Fahrzeug- bzw. Gebäudetechnologie erzeugt die entsprechende Energiedienstleistung motorisierter Individualverkehr bzw. Raumwärme und Warmwasser als Output. Dieser setzt sich, in Anlehnung an das weiter oben beschriebene KLEM-Format (vgl. Abschnitt 3.1.3), und in Analogie zur technologisch disaggregierten Modellierung der Stromerzeugung (vgl. Abschnitt 3.2.3.1), aus einem Kapitalinput (Fahrzeug- bzw. Gebäudeklasse) und einem Energieinput (Energieträger) zusammen. Die Input-Output-Beziehung wird dabei als Leontief-Funktion modelliert ( $\sigma^{EG} = \sigma^{EF} = 0$ ), wonach die Wertanteile der Energie- und Kapitalkomponente fixiert werden, das heißt, sie können nicht gegeneinander substituiert werden. Die Kapitalkomponente stellt dabei eine Aggregation aus Fahrzeug- bzw. Gebäudebestand und Fahrzeug- bzw. Gebäudezukauf (Neuwagen bzw. Neubau/Sanierung) dar.<sup>207</sup> Hierfür wird eine hohe Substitutionsmöglichkeit unterstellt ( $\sigma^{SG} = \sigma^{SF} = 4$ ).<sup>208</sup> Die Zukäufe der einzelnen Fahrzeug- und Gebäudetypen stammen aus der in der GTAP-Datenbank bereits vorhandenen Nachfrage nach den Produktionsgütern der Automobilindustrie bzw. der Bauwirtschaft, deren ursprünglich homogener Output nun anhand einer Cobb-Douglas-Transformation auf die einzelnen Fahrzeug- und Gebäudetypen aufgeteilt wird. Der Output der Mineralölindustrie wird zudem in Benzin, Diesel und Heizöl transformiert, um eine genaue Zuteilung der Mineralölprodukte auf die entsprechenden Fahrzeug- und Gebäudetechnologien zu ermöglichen.

---

<sup>205</sup> Das entspricht Sektor 16 (TRN) in Tabelle 3-3.

<sup>206</sup> Für weitere Ausführungen zur Unterscheidung von Gebrauchs- und Verbrauchsgütern in energieökonomischen Analysen vgl. z. B. Conrad & Schröder (1991) oder Conrad (2000).

<sup>207</sup> Der Fahrzeug- und Gebäudebestand ist nicht in der GTAP-Datenbank enthalten und muss daher exogen vorgegeben werden (vgl. Abschnitt 3.4.2).

<sup>208</sup> Eine Übersicht der Substitutionselastizitäten findet sich in Anhang A.1.

nologien vorzunehmen. Die anderen Energieträger werden in der Landwirtschaft (Biomasse), der Stromerzeugung und in der erschöpfbaren Energieproduktion (Kohle, Erdgas) hergestellt.

Im Folgenden werden die im Modell unterschiedenen Fahrzeug- und Gebäudetechnologien definiert, bevor ihre CES-Schachtelung innerhalb der entsprechenden Energiedienstleistungsherstellung beschrieben wird.

### 3.4.1.2 Fahrzeug- und Gebäudetechnologien

Tabelle 3-9 stellt die im Modell unterschiedenen Fahrzeug- und Gebäudetechnologien in Matrixform dar. Die Energiedienstleistung „Motorisierter Individualverkehr“ kann durch 11 Fahrzeugtechnologien, die Energiedienstleistung „Raumwärme und Warmwasser“ durch 16 Gebäudetechnologien erzeugt werden. Der Output ergibt sich jeweils als Kombination aus einer Bedarfsklasse mit einem Energieträger (Heizungstyp, Antriebsart).

**Tabelle 3-9:** Definition der im Modell unterschiedenen Fahrzeug- und Gebäudetechnologien

Bedarfsklasse	11 Fahrzeugtechnologien			16 Gebäudetechnologien			
	Klein	Mittel	Groß	Altbau	Sanierter Altbau	Neubau (Standard)	Neubau (Passivhaus)
Hubraum / Wärmebedarf	< 1,4 l	1,4 – 2,0 l	> 2,0 l	160 kWh/m <sup>2</sup> a	65 kWh/m <sup>2</sup> a	65 kWh/m <sup>2</sup> a	15 kWh/m <sup>2</sup> a
Fahrleistung p.a. (Tsd. Km)	10,4	15,0	17,6	-	-	-	-
Benzin	X	X	X	-	-	-	-
Diesel	X	X	X	-	-	-	-
PHEV	-	X	X	-	-	-	-
Erdgas	X	X	-	X	X	X	X
Strom	X	-	-	X	X	X	X
Heizöl	-	-	-	X	X	X	-
Biomasse	-	-	-	X	X	X	X
Kohle	-	-	-	X	-	-	-

Quelle: Destatis, 2011 und Destatis, 2010, vgl. auch Abschnitt 3.4.2.

Bei den 11 Fahrzeugtechnologien werden drei Bedarfsklassen (Klein, Mittel, Groß) und fünf Antriebsarten (Benzin, Diesel, Erdgas, Strom und PHEV) unterschieden, die pro Fahrzeugtechnologie jeweils miteinander kombiniert werden können.<sup>209</sup> Die Bedarfsklassen ermöglichen es dem Verbraucher, sich unabhängig von der Antriebsart für eine bestimmte Fahrzeuggröße zu entscheiden. In Kombination mit der gewählten Antriebsart und dem zugehörigen Energieträger definieren sie den für jede Fahrzeugtechnologie unterschiedlichen spezifischen Energieverbrauch.<sup>210</sup> Die Einteilung der Bedarfsklassen wird anhand des Hubraums

<sup>209</sup> PHEV-Fahrzeuge (Plug-in-Hybrid-Electric-Vehicle) verfügen über einen Elektro- und einen Verbrennungsmotor, der im hier betrachteten Modell mit Benzin angetrieben wird. Die Batterie des Elektromotors kann über das Stromnetz geladen werden.

<sup>210</sup> Datensatz und Parametrisierung werden in Abschnitt 3.4.2 beschrieben.

und der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung vorgenommen. Für kleine Fahrzeuge wird ein Hubraum von weniger als 1,4 Liter definiert, für mittlere Fahrzeuge ein Hubraum von 1,4 bis 2,0 Liter und für große Fahrzeuge ein Hubraum von mehr als 2 Liter.<sup>211</sup> Nach Informationen von Destatis (2011) wurde zudem eine durchschnittliche Jahresfahrleistung pro Bedarfsklasse von 10.400 km/a (kleine Fahrzeuge), 15.000 km/a (mittlere Fahrzeuge) und 17.600 km/a (große Fahrzeuge) angenommen. Dies soll den unterschiedlichen Nutzen der einzelnen Bedarfsklassen Rechnungen tragen, da insbesondere kleine Fahrzeuge tendenziell für kürzere Distanzen und große Fahrzeuge tendenziell für längere Fahrten genutzt werden.

Als Ausnahmen der möglichen Kombinationen aus Bedarfsklasse und Antriebsart werden kleine PHEV-Fahrzeuge, mittlere und große Elektrofahrzeuge sowie große erdgasbetriebene Fahrzeuge nicht zugelassen, da sie in der Realität seltener vorkommen.<sup>212</sup>

Bei den 16 Gebäudetechnologien werden vier Bedarfsklassen (Altbau, sanierter Altbau, Standard-Neubau und Passivhaus-Neubau) und fünf Heizungstypen (Heizöl, Erdgas, Strom, Kohle und Biomasse) unterschieden, die pro Gebäudetechnologie jeweils miteinander kombiniert werden können. Auch hier ermöglichen es die Bedarfsklassen dem Verbraucher, sich unabhängig vom Heizungstyp für eine bestimmte Gebäudeklasse zu entscheiden. Im Gegensatz zu den Fahrzeugklassen werden diese konkret nach ihrem spezifischen Wärmebedarf definiert. Die Bedarfsklasse „Standard-Neubau“ richtet sich dabei nach den EnEV-Vorgaben und setzt einen spezifischen Wärmebedarf von 65 kWh/m<sup>2</sup>a voraus. Dieser Wert gilt analog auch für die Gebäudeklasse „Sanierter Altbau“. Für „Passivhaus-Neubauten“ wird ein geringerer Wärmebedarf von 15 kWh/m<sup>2</sup>a angesetzt. Aufgrund der Input-Output-Systematik beziehen sich die Neubau- und Sanierungstätigkeiten auf das GTAP8-Basisjahr 2007, so dass alle Gebäude, die vor 2007 errichtet wurden, im Modell als „Altbau“ definiert werden. Wie weiter unten in Abschnitt 3.4.2 erläutert wird, ergibt sich damit auf Basis der Energienachfrage für Raumwärme und Warmwasser im deutschen Gebäudebestand im Basisjahr 2007 ein durchschnittlicher Wärmebedarf in Altbauten von 160 kWh/m<sup>2</sup>a. In jeder Gebäudeklasse stehen unterschiedliche Heizungstypen zur Verfügung. Als Ausnahme sind Kohle befeuerte Heizungen im Modell nur in Altbauten zugelassen. Zudem werden Ölheizungen nicht in Passivhaus-Neubauten zugelassen. Der Heizungstyp Strom umfasst dabei sowohl Fernwärme als auch Elektroheizungen und elektrisch betriebene Wärmepumpen. Biomasse umfasst hauptsächlich Holz befeuerte Heizungsanlagen (Pellets, Hackschnitzel, etc.).

### 3.4.1.3 Nesting-Struktur des motorisierten Individualverkehrs

Bevor die Datenbasis und Parametrisierung erläutert wird, soll die Modellierung der Technologieoptionen zur Herstellung der Energiedienstleistungen anhand ihrer jeweiligen CES-

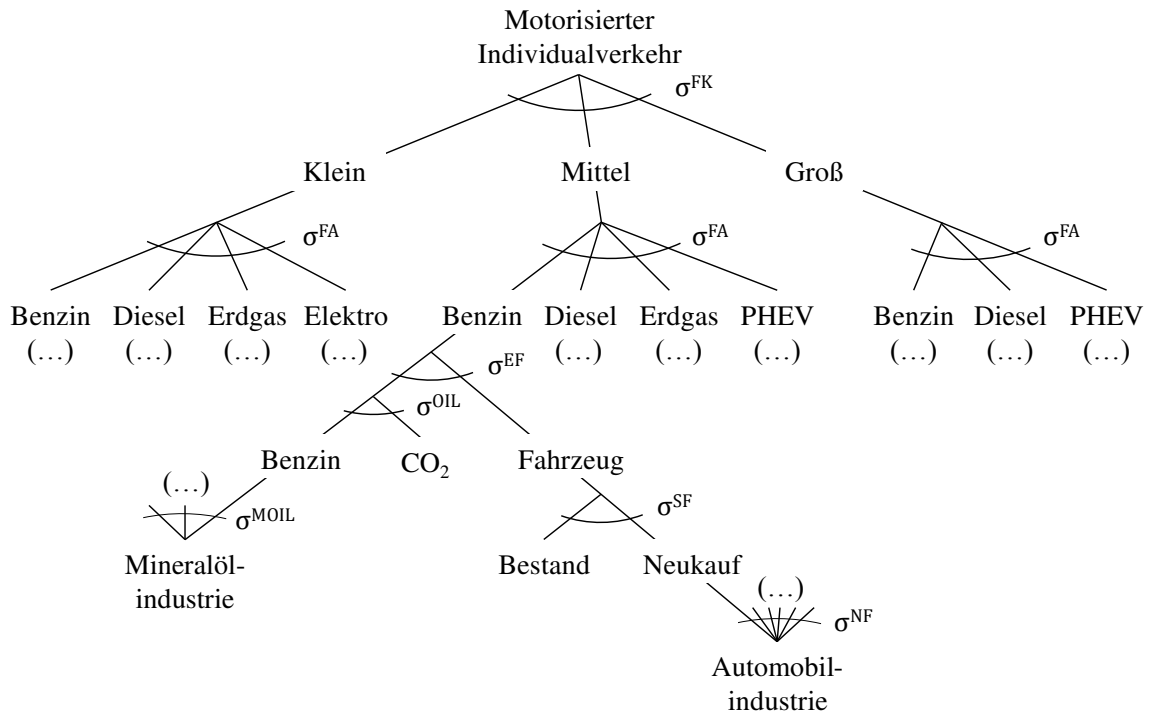
---

<sup>211</sup> Obwohl rein elektrisch betriebene Fahrzeuge keinen Hubraum haben, werden sie der Kategorie „Klein“ zugeordnet.

<sup>212</sup> Für den im Modell berücksichtigten Zeithorizont bis zum Jahr 2030 erscheint diese Annahme plausibel. Für längerfristige Analysen müsste sie ggf. überprüft werden.

Schachtelung beschrieben werden. Abbildung 3-11 veranschaulicht die Input-Output-Beziehungen im Konsum des repräsentativen Verbrauchers in Deutschland im Überblick. Ergänzend dazu stellt Abbildung 3-12 die CES-Schachtelung der einzelnen Fahrzeugtechnologien zur Herstellung der Energiedienstleistung „Motorisierter Individualverkehr“ in Deutschland dar.

**Abbildung 3-12:** Nesting-Struktur der Energiedienstleistung „Motorisierter Individualverkehr“ in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Entscheidung für eine bestimmte Fahrzeugtechnologie erfolgt dabei zweistufig. Auf der obersten Aggregationsstufe entscheiden sich die Konsumenten zunächst für eine der drei Fahrzeugklassen. Hier wird eine geringe Substitutionselastizität angesetzt ( $\sigma^{FK} = 0,3$ ), um eine gewisse Präferenzstruktur zwischen den Fahrzeugklassen zu berücksichtigen, die unabhängig von den reinen Kapital- und Energiekosten eines einzelnen Fahrzeugs zustande kommt (z. B. kleines Stadtauto vs. Limousine für Langstrecken oder Kombi für Transportzwecke). Die Entscheidung für eine Antriebsart pro Fahrzeugklasse erfolgt dann auf der zweiten Aggregationsstufe. Hier wird eine relativ hohe Substitutionselastizität angesetzt ( $\sigma^{FA} = 2$ ), um bei der Antriebswahl flexible Reaktionen auf Energie- und Kapitalpreisänderungen zu ermöglichen.

Für jede Fahrzeugtechnologie wird eine fixierte Leontief-Beziehung zwischen Energie- und Kapitalinput (Fahrzeug) definiert ( $\sigma^{EF} = 0$ ), die anhand der Datenbasis im Ausgangsgleichgewicht gegeben ist (vgl. Abschnitt 3.4.2 unten). In Abbildung 3-12 ist dies beispielhaft anhand der Fahrzeugtechnologie eines mittleren Benziners dargestellt, was analog für alle ande-

ren Fahrzeugtechnologien gilt.<sup>213</sup> Für jede eingesetzte Einheit Benzin ist ein CO<sub>2</sub>-Zertifikat vorzuhalten, sollte es zu einem Emissionshandel im motorisierten Individualverkehr kommen.

Die Fahrzeugkomponente ist ein Aggregat aus Bestandsfahrzeug und Neuwagen. Hier wird dem Konsumenten ermöglicht, die Energiedienstleistung entweder durch verstärkte Nutzung der bereits existierenden (Gebraucht-)Fahrzeuge oder durch verstärkten Zukauf von neuen Fahrzeugen zu ermöglichen. Sollte die nachgefragte Energiedienstleistung pro Fahrzeugtechnologie über das Ausmaß der verfügbaren Fahrzeuge im Bestand hinausgehen, müssen pro Fahrzeugtechnologie zusätzliche Fahrzeuge angeschafft werden, die dann mit höheren spezifischen Kosten in das Fahrzeug-Aggregat eingehen, als die Bestandsfahrzeuge. Dennoch handelt es sich um nahezu perfekte Substitute ( $\sigma^{SF} = 4$ ). Es gibt also keine relevanten Präferenzen für neue oder bestehende Fahrzeuge.

Die Neuwagen der einzelnen Fahrzeugtechnologien können in der Automobilindustrie relativ flexibel produziert werden ( $\sigma^{NF} = 1$ ). Mögliche Restriktionen in der Produktion der einzelnen Fahrzeugtechnologien werden als gering eingestuft, auch wenn die Automobilindustrie auf eine gewisse Flottenstruktur ausgelegt ist und somit auf große Veränderungen in der Nachfragestruktur kurzfristig nicht vollständig reagieren kann. Dagegen ist die Herstellung von Benzin innerhalb der Mineralölindustrie, in Relation zu Heizöl und Diesel, deutlich flexibler ( $\sigma^{MOIL} = 4$ ). Nachfrageänderungen können hier weitgehend friktionslos bedient werden.

#### 3.4.1.4 Nesting-Struktur für Raumwärme und Warmwasser

Ergänzend zu Abbildung 3-11 stellt Abbildung 3-13, analog zu Abbildung 3-12, die CES-Schachtelung der einzelnen Gebäudetechnologien zur Herstellung der Energiedienstleistung „Raumwärme und Warmwasser“ in Deutschland dar.

Die Entscheidung für eine bestimmte Gebäudetechnologie erfolgt dabei mehrstufig. Auf der obersten Aggregationsstufe steht die Wahl zwischen den Gebäudeklassen Altbau und dem Aggregat aus Neubau und Sanierung. Obwohl für diese Wahl keine besonderen Präferenzen unterstellt werden, wird die Substitutionsmöglichkeit auf dieser Aggregationsstufe nicht unbeschränkt gelassen, da der in der Realität zu beobachtende Bestandsersatz durch Neubauten oder sanierte Altbauten im Zeitverlauf relativ träge ist.<sup>214</sup> Die Substitutionselastizität wird daher als moderat eingestuft ( $\sigma^{GK} = 1$ ).

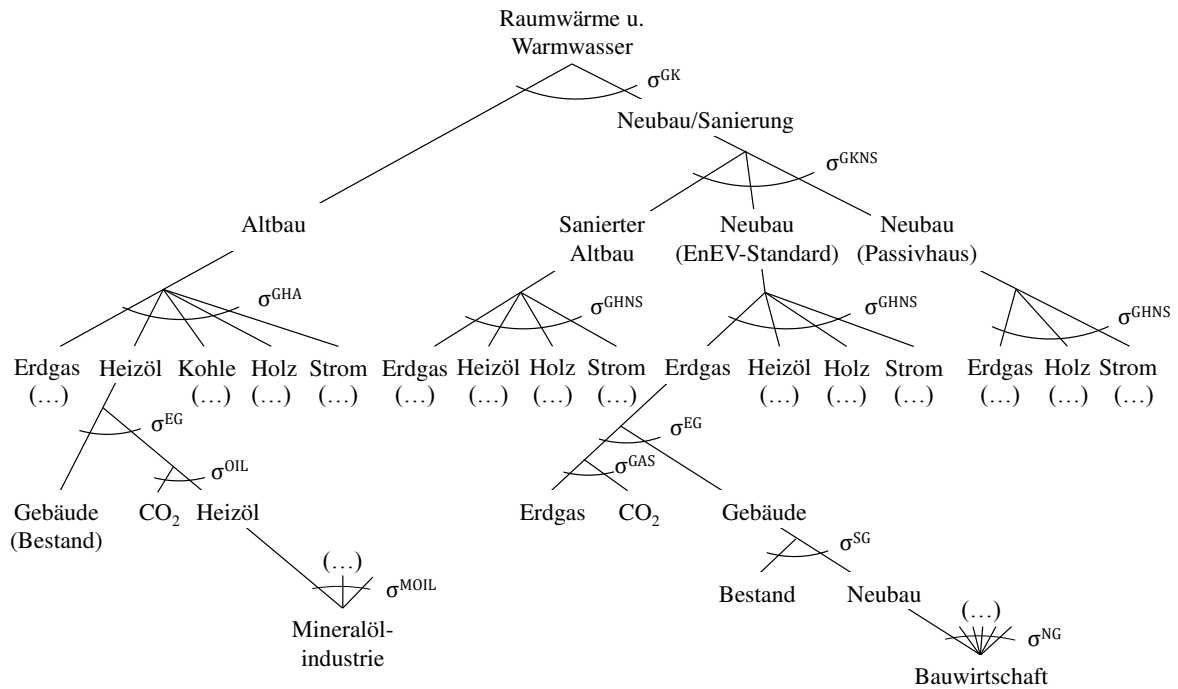
---

<sup>213</sup> Bei der PHEV-Antriebsart in mittleren und großen Fahrzeugen wird ein fixer Energieträgermix aus Benzin und Strom vorgegeben. Der Anteil der elektrisch zurückgelegten Personenkilometer der PHEV-Fahrzeuge wird dabei mit 20 % angenommen. Das Verhältnis von Benzin zu Strom pro Fahrzeugkilometer beträgt entsprechend 4:1.

<sup>214</sup> Die Neubau- und Sanierungsrate beträgt derzeit rund 1,5 % pro Jahr (vgl. Abschnitt 3.4.2 unten).



**Abbildung 3-13:** Nesting-Struktur der Energiedienstleistung „Raumwärme und Warmwasser“ in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung.

Innerhalb des Neubau- und Sanierungsaggregats, das heißt zwischen saniertem Altbau und den beiden Neubauklassen, wird dagegen eine größere Substitutionsmöglichkeit eingeräumt, um eine größere Reagibilität hinsichtlich Energie- und Kapitalpreisänderungen zu ermöglichen ( $\sigma^{GKNS} = 2$ ). Dies gilt auch für die Wahl der Heizungsart innerhalb der drei Neubau- bzw. Sanierungsklassen, die auf der darunter liegenden Aggregationsstufe erfolgt und auf der die konkrete Gebäudetechnologie letztlich bestimmt wird ( $\sigma^{GHNS} = 2$ ).

Die Substitution von Heizungsarten innerhalb der Altbauklasse soll dagegen per Definition ausgeschlossen werden, da jegliche Veränderung als Sanierung eingestuft würde. Dennoch wird hier eine moderate Substitutionselastizität unterstellt ( $\sigma^{GHA} = 1$ ), die die Tatsache reflektiert, dass innerhalb eines Gebäudes die Nachfrage nach Raumwärme variieren kann, und zwar in Form des Ausmaßes, wieviel Wohnfläche auf 20 °C beheizt wird.<sup>215</sup>

Wie bei den Fahrzeugtechnologien, wird für jede Gebäudetechnologie eine fixierte Leontief-Beziehung zwischen Energie- und Kapitalinput (Gebäude) definiert ( $\sigma^{EG} = 0$ ), die anhand der Datenbasis im Ausgangsgleichgewicht gegeben ist (vgl. Abschnitt 3.4.2). In Abbildung 3-13 ist dies beispielhaft anhand der Gebäudetechnologien eines mit Heizöl beheizten Altbaus und eines mit Erdgas beheizten Neubaus nach EnEV-Standard dargestellt. Der Unterschied liegt hier bei dem eingesetzten Kapitalinput (Gebäudeinput). Bei Passivhaus- und

<sup>215</sup> Das bedeutet, dass entweder die Anzahl der beheizten Räume erhöht oder verringert werden kann, oder dass die Temperatur in den beheizten Räumen verändert wird, was sich gedanklich in die Einheit „auf 20 °C beheizte Wohnfläche“ umrechnen lässt.

Standard-Neubauten sowie sanierten Altbauten stellt der Gebäudeinput, wie bei den Fahrzeugen, ein präferenzloses Aggregat aus bestehendem Gebäude und einem in der jeweiligen Periode neu hinzu gebautem bzw. neu saniertem Gebäude dar ( $\sigma^{SG} = 4$ ). Im Ausgangsgleichgewicht besteht dieser Gebäudeinput bei Passivhaus- und Standard-Neubauten sowie sanierten Altbauten ausschließlich aus den im Basisjahr 2007 gebautem bzw. sanierten Gebäuden. In den nachfolgenden Perioden stellt dieses Aggregat eine Mischung aus den in vorhergegangenen Perioden gebauten bzw. sanierten Gebäuden und denen in der laufenden Periode gebauten bzw. sanierten Gebäuden dar. Die hier zugrundeliegende Dynamik wird unten in Abschnitt 3.4.3 näher beschrieben. Bei Altbauten gibt es diese Dynamik nicht. Per Definition können keine Altbautypen neu hinzu gekauft werden. Der Gebäudeinput in der fixierten Leontief-Beziehung zwischen Energie- und Gebäudeinput besteht ausschließlich aus Bestandsgebäuden, die im Zeitverlauf kontinuierlich abgeschrieben werden.

Des Weiteren gibt es, analog zu den Fahrzeugtechnologien, eine moderate Transformationsbeziehung zwischen Neubau- und Sanierungstätigkeiten in der Bauwirtschaft ( $\sigma^{NG} = 1$ ). Für jede eingesetzte Einheit Heizöl, Kohle oder Erdgas ist zudem ein CO<sub>2</sub>-Zertifikat vorzuhalten, sollte es zu einem Emissionshandel im Wohngebäudebereich kommen.

### 3.4.2 Datensatz und Parametrisierung

Die technologische Disaggregation der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland erfordert das Aufteilen der bestehenden, in der GTAP-Datenbank enthaltenen Wertströme zwischen den anbietenden Produktionssektoren und dem nachfragenden repräsentativen Verbraucher auf einzelne Verwendungszwecke, das heißt auf die einzelnen Fahrzeug- und Gebäudetechnologien zur Erzeugung der jeweiligen Energiedienstleistungen. Dies umfasst die Nachfrage nach Mineralöl, Gas, Kohle, land- bzw. forstwirtschaftlichen Erzeugnissen (v. a. Holz), Strom, Fahrzeugen, Transportdienstleistungen und Dienstleistungen der Bauwirtschaft (Gebäude). Die Wertströme müssen dabei in eine Preis- und eine Mengenkomponekte aufgeteilt werden, um den (spezifischen) Energieverbrauch anhand physikalischer Einheiten, wie kWh/km oder kWh/m<sup>2</sup>, darstellen zu können. Außerdem müssen den Neukäufen von Fahrzeugen und Gebäuden ein entsprechender Fahrzeug- und Gebäudebestand gegenübergestellt werden, um den Kapitalinput in der Herstellung der Energiedienstleistungen adäquat abbilden zu können. Neben den Energiekosten schließt dies die Berücksichtigung der unterschiedlichen Kapitalkosten der einzelnen Fahrzeug- und Gebäudetechnologien mit ein. Für diese Disaggregation sind externe, das heißt über die GTAP8-Datenbank (vgl. Abschnitt 3.2.1) hinausgehende Datenquellen notwendig, die im Folgenden einzeln erläutert werden. Eine Gesamtübersicht über die verwendeten Daten findet sich in Anhang A.3.

**Fahrzeugtechnologien**

Der Fahrzeugbestand in Deutschland im Basisjahr 2007 wurde mithilfe von Daten des Kraftfahrt-Bundesamts ermittelt.<sup>216</sup> Dabei wurden privat und dienstlich genutzte Fahrzeuge getrennt betrachtet und letztere entsprechend abgezogen, da der Kraftstoffverbrauch von Dienstwagen in der Systematik der Input-Output-Tabellen nicht den privaten Haushalten, sondern den Produktionssektoren zugerechnet wird. Dienstlich genutzte Fahrzeuge haben im Jahr 2007 rund 5 % des Gesamtbestandes ausgemacht.<sup>217</sup> Um die Konsumausgaben privater Haushalte für Fahrzeuge im Sinne der IO-Systematik auf die einzelnen Fahrzeugtechnologien aufteilen zu können, mussten zusätzlich die Neuzulassungen privat genutzter Fahrzeuge ermittelt werden.<sup>218</sup> Als „Neufahrzeuge“ werden im Folgenden alle im Jahr 2007 zugelassenen Fahrzeuge des deutschen Gesamtbestandes bezeichnet. „Bestandsfahrzeuge“ umfassen demgegenüber alle vor dem 1.01.2007 zugelassenen Fahrzeuge. Für die Definition der einzelnen Fahrzeugtechnologien wurden anhand von KBA (2008a) pro Hubraumklasse und Antriebsart die am häufigsten vorkommenden Modellreihen identifiziert, um sie als Referenzfahrzeuge zur Definition der technischen Merkmale der Fahrzeugtechnologien verwenden zu können. Tabelle 3-10 gibt eine Übersicht über die Anzahl an Bestands- und Neufahrzeugen der einzelnen Fahrzeugtechnologien sowie der verwendeten Referenzmodelle.

**Tabelle 3-10:** Anzahl privat zugelassener Fahrzeuge in Deutschland im Jahr 2007 (in Tsd.) und verwendete Referenzmodelle pro Fahrzeugtechnologie

		Anzahl (Tsd.)			Referenzmodelle
		Bestand	Neu	Gesamt	
Klein	Benzin	11.274	405	11.679	Renault Twingo, VW Polo
	Diesel	229	18	247	Opel Corsa
	Erdgas	84	8	92	Opel Adam LPG, VW eco-up! CNG
	Strom	8	0,03	8	Renault Zoe
Mittel	Benzin	15.280	518	15.798	VW Golf, BMW 3er, Renault Scenic
	Diesel	4.958	358	5.316	VW Golf, BMW 3er, Renault Scenic
	Erdgas	111	7	118	Mercedes B 200 CNG, VW Golf 1.6 BiFuel LPG
	PHEV	35	11	46	Toyota Prius
Groß	Benzin	3.146	145	3.291	Mercedes E, BMW 7er, Toyota ML350
	Diesel	2.309	159	2.469	Mercedes E, BMW 7er, VW Touran,
	PHEV	21	7	28	Mitsubishi Outlander, Porsche Cayenne
Gesamt		37.454	1.638	39.092	

Quellen: KBA, 2008a, KBA, 2008b und KBA 2008c.

<sup>216</sup> KBA, 2008b, S. 79.

<sup>217</sup> KBA, 2008b, S. 114. Der Anteil privater Fahrten in Dienstwagen wird hier nicht gesondert berücksichtigt.

<sup>218</sup> KBA, 2008c, S. 34 und 68.

Tabelle 3-11 beschreibt die technischen Merkmale der Fahrzeugtechnologien, basierend auf den in Tabelle 3-10 aufgeführten Referenzmodellen. Die Angaben zu Hubraum und Leistung basieren auf Informationen von ADAC (2016) und Autobild (2015). Die Angaben zu Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden mithilfe des Internetportals „Spritmonitor.de“ ermittelt, wo Fahrzeugnutzer ihre real gemessenen Durchschnittsverbräuche ihrer Fahrzeugmodelle eintragen können. Anhand dieser Informationen ergibt sich der gesamte Energieverbrauch pro Fahrzeugtechnologie in Tabelle 3-11 als Produkt aus Fahrleistung, spezifischem Energieverbrauch und der jeweiligen Anzahl der Fahrzeuge.

**Tabelle 3-11:** Technische Merkmale der Fahrzeugtechnologien (Deutschland, 2007)

		Hubraum (ccm)	Leistung (kW)	Kraftstoff- verbrauch (l/100km)	Spezifischer Energie- verbrauch (kWh/100km)	CO <sub>2</sub> - Emissionen (g CO <sub>2</sub> /km)	Gesamter Energie- verbrauch (GWh)
Klein	Benzin	1.188	47	6,5	58	137	70.072
	Diesel	1.248	55	5,1	50	124	1.285
	Erdgas	1.199	57	-	48	99	458
	Strom	-	65	-	20	-	16
Mittel	Benzin	1.661	75	8,3	74	175	174.678
	Diesel	1.907	75	6,2	60	134	48.076
	Erdgas	1.795	88	0,0	59	131	1.038
	PHEV	1.798	100	3,6	36	49	248
Groß	Benzin	2.954	156	11,0	98	223	56.705
	Diesel	2.595	132	8,2	80	183	34.717
	PHEV	2.497	228	5,9	63	62	310
						Summe:	387.602

Quellen: ADAC, 2016, Autobild, 2015 und Spritmonitor.de.

Aus diesen Informationen lassen sich in Kombination mit den Kaufpreisen für Fahrzeuge und Energie die in Tabelle 3-12 dargestellten Energie- und Kapitalpreise (in €<sub>2007</sub>) für Kauf und Nutzung der Fahrzeugtechnologien berechnen. Die Energieträgerpreise stammen aus Destatis (2016). Beim Strompreis war zu berücksichtigen, dass der im Modell berechnete Strompreis dem Preis für den aggregierten Output des Stromsektors entspricht, welcher auch Fernwärme beinhaltet. Unter Verwendung von Preisabschätzungen für Fernwärme gemäß Bundeskartellamt (2012) und einer entsprechenden Mengengewichtung für Strom und Fernwärme nach Destatis (2010) wurde ein Durchschnittspreis für Strom und Fernwärme berechnet. Die spezifischen Energiekosten bei der Fahrzeugnutzung (Nutzungspreis) ergeben sich schließlich aus dem Produkt aus Energieträgerpreis und spezifischem Energieverbrauch pro Fahrzeugtechnologie.

**Tabelle 3-12:** Energie- und Kapitalkosten pro Fahrzeugtechnologie (Deutschland, 2007)

		Energiekosten		Kapitalkosten		Gesamt (€ <sub>2007</sub> /100km)
		Kaufpreis** (€ <sub>2007</sub> /MWh, brutto)	Nutzungspreis (€ <sub>2007</sub> /100km)	Kaufpreis (€ <sub>2007</sub> /Neuwagen)	Nutzungspreis (€ <sub>2007</sub> /100km)	
Klein	Benzin	146,22	8,41	11.766	36,15	44,56
	Diesel	113,56	5,65	15.111	41,19	46,84
	Erdgas	61,30	2,93	16.208	35,55	38,48
	Strom	185,05*	3,65	21.700	54,30	57,95
Mittel	Benzin	146,22	10,81	21.410	42,65	53,46
	Diesel	113,56	6,86	24.543	47,00	53,86
	Erdgas	61,30	3,61	24.882	44,16	47,77
	PHEV	153,99*	5,51	36.200	47,46	52,97
Groß	Benzin	146,22	14,34	38.422	64,78	79,12
	Diesel	113,56	9,09	40.159	57,49	66,58
	PHEV	153,99*	9,75	61.039	67,25	77,00

(\*) Der Haushaltsstrompreis ist im Modell ein gewichteter Preis für Strom und Fernwärme.

(\*\*) Der Kaufpreis bezeichnet den Energieträgerpreis.

Quellen: ADAC, 2014, ADAC, 2016, Autobild, 2015, Bundeskartellamt, 2012, DAT, 2008, Destatis 2016 und eigene Berechnungen.

Zur Bestimmung der Kapitalkosten, das heißt der Kosten für die Kapitalkomponente in der Herstellung der Energiedienstleistung „Motorisierter Individualverkehr“, sind einerseits die Preise für Neuwagen zu berücksichtigen, andererseits die Nutzungspreise für das Aggregat aus Neu- und Bestandsfahrzeugen. Die Angaben zu den Neuwagenpreisen basieren, wie die technischen Merkmale der Referenzmodelle, auf Informationen von ADAC (2016) und Autobild (2015). Für die wertmäßige Bestimmung der Bestandsfahrzeuge werden die Neuwagenpreise im Modell durch den Faktor 3,1 geteilt, der laut DAT (2008) das Verhältnis zwischen Neuwagen- und Gebrauchtwagenpreisen im Jahr 2007 im Durchschnitt widerspiegelt. Zur Bestimmung der Nutzungspreise konnte die Studie „ADAC-Autokosten 2014“ hinzugezogen werden, die die einzelnen Kostenkomponenten zusammenstellt, die ein Auto in der Realität verursacht (inkl. Wertverlust).<sup>219</sup> Die Nutzungspreise für Fahrzeuge in Tabelle 3-12 entsprechen der in der Studie ausgewiesenen Summe aus Wertverlust, Fixkosten und Werkstattkosten pro Fahrzeugtechnologie und Jahr. Im Modell können sie auch als implizite Mietkosten für das Fahrzeug interpretiert werden.<sup>220</sup>

<sup>219</sup> Vgl. ADAC, 2014.

<sup>220</sup> Die Nutzungspreise wurden auf die im Modell betrachtete Fahrleistung pro Bedarfsklasse angepasst, da die Studie „ADAC-Autokosten 2014“ für alle Fahrzeuge eine durchschnittliche Jahresfahrleistung von 15.000 km annimmt. Für die im Modell betrachteten Fahrzeugtechnologien findet sich in Tabelle A-11 in Anhang A.3 eine detailliertere Übersicht.

**Gebäudetechnologien**

Die Daten zum Gebäudebestand in Deutschland im Basisjahr 2007 wurden hauptsächlich aus dem Mikrozensus des Statistischen Bundesamts entnommen.<sup>221</sup> Dort sind Angaben über Gebäude, Wohnungen, Wohnflächen, Baualtersklassen und Heizungstypen enthalten. Tabelle 3-13 beschreibt die Aufteilung der gesamten Wohnfläche in Deutschland im Jahr 2007 auf die im Modell enthaltenen Gebäudetechnologien sowie den zugehörigen spezifischen Energiebedarf sowie gesamten Energieverbrauch.

**Tabelle 3-13:** Wohnfläche und Energieverbrauch pro Gebäudetechnologie (Deutschland, 2007)

		Wohnfläche		Energieverbrauch	
		Bestand (Bj. < 2007) (Mio. m <sup>2</sup> )	Neu (Bj. = 2007) (Mio. m <sup>2</sup> )	Wärmebedarf (kWh/m <sup>2</sup> a)	Gesamt (GWh)
Altbau	Heizöl	975,3	-	160	155.978
	Erdgas	1.570,9	-	160	251.230
	Kohle	33,1	-	160	5.295
	Holz	96,3	-	160	15.406
	Strom	559,0	-	160	89.408
Sanierter Altbau	Heizöl	-	2,1	65	136
	Erdgas	-	19,6	65	1.273
	Holz	-	2,0	65	130
	Strom	-	5,7	65	371
Neubau (EnEV- Standard)	Heizöl	-	1,4	65	90
	Erdgas	-	13,0	65	843
	Holz	-	1,3	65	86
	Strom	-	3,8	65	245
Neubau (Passivhaus)	Erdgas	-	1,4	15	22
	Holz	-	0,2	15	3
	Strom	-	0,5	15	7
<b>Gesamt</b>		3.235	51		520.523

Quellen: Destatis, 2008a, Destatis, 2008b, Destatis, 2010 und Destatis, 2015d.

Zur Ermittlung der Neubautätigkeiten im Jahr 2007 wurden weitere Quellen des Statistischen Bundesamts hinzugezogen.<sup>222</sup> Der Anteil der neugebauten bzw. sanierten Wohnfläche an der gesamten Wohnfläche lag 2007 bei 1,6 %.<sup>223</sup> Laut Kohler (2012) betrug die Sanierungsrate im Jahr 2007 ca. 0,9 %. Die eigentliche Neubaurate lag demnach bei 0,7 %. Der Anteil von Passivhäusern am gesamten Neubau wurde im Modell mit 10 % angenommen.<sup>224</sup>

Der Energieverbrauch privater Haushalte für Raumwärme und Warmwasser betrug nach Daten der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen gemäß Destatis (2010) in Deutschland im

<sup>221</sup> Vgl. Destatis, 2008a.

<sup>222</sup> Vgl. Destatis, 2008b und Destatis, 2015d.

<sup>223</sup> Vgl. Modellstruktur gemäß Tabelle 3-9 und Abbildung 3-13.

<sup>224</sup> Tatsächlich betrug er laut KfW-Förderstatistik (Diefenbach et al., 2013) im Jahr 2007 nur rund 1 %. Um im Modell jedoch numerische Skalenprobleme zu vermeiden, wurde er auf 10 % hochgesetzt.

Jahr 2007 rund 520.523 GWh bzw. 1.874 PJ. Anhand des oben definierten spezifischen Energiebedarfs von sanierten Altbauten (65 kWh/m<sup>2</sup>a), EnEV-Standard-Neubauten (65 kWh/m<sup>2</sup>a) und Passivhaus-Neubauten (15 kWh/m<sup>2</sup>a) lässt sich als Residualwert für Altbauten ein spezifischer jährlicher Energiebedarf von rund 160 kWh/m<sup>2</sup>a berechnen.

Tabelle 3-14 beschreibt die Energie- und Kapitalkosten der einzelnen Gebäudetechnologien. Die Energieträgerpreise stammen aus Destatis (2016), Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2016) und depi (2016). Die jährlichen Energiekosten der einzelnen Gebäudetechnologien je m<sup>2</sup> Wohnfläche ergeben sich als Produkt aus Energieträgerpreis und spezifischem Wärmebedarf. Die jährlichen Mietkosten wurden auf Basis des regelmäßig veröffentlichten Wohn-Preisspiegels des deutschen Immobilienverbands (IVD) als Durchschnittswerte für Deutschland im Jahr 2007 ermittelt.<sup>225</sup> Die Baukosten für Neubauten und sanierte Altbauten pro m<sup>2</sup> wurden einer Studie der „Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.“ entnommen.<sup>226</sup> Der unterstellte Kaufpreis für Altbauten wurde in konsistenter Weise aus den Baukosten für einen Neubau (EnEV-Standard) und dem Mietkosten-Verhältnis zwischen Altbau und Neubau (EnEV-Standard) ermittelt.<sup>227</sup>

Für die gesamte Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland im Jahr 2007 ergibt sich ein Wert von 992 TWh (3.570 PJ), deren Zusammensetzung in Tabelle 3-15 gegenübergestellt ist. Bei der Energienachfrage für motorisierten Individualverkehr tritt eine Differenz in Höhe von 10 TWh (ca. 2,5 %) zwischen dem ermitteltem Bottom-Up-Ergebnis des hier entwickelten Modells und dem Top-Down-Wert nach Destatis (2010) zum Vorschein. Um das Modell auf den Gesamtwert von 992 TWh zu kalibrieren, wird diese Differenz von der Energiedienstleistung „Sonstiger Strom“ abgezogen. Die Energienachfrage für Raumwärme und Warmwasser wurde bereits über den spezifischen Wärmebedarf von Altbauten auf die Angaben von Destatis (2010) kalibriert.

---

<sup>225</sup> Vgl. IVD, 2008.

<sup>226</sup> Vgl. Wahlberg et al., 2011.

<sup>227</sup> Dieser Wert ist vergleichbar mit Angaben vom Statistischen Bundesamt zum Anlagevermögen von Wohnbauten im Jahr 2007, wonach sich ein spezifischer Wert von 1.143 €/m<sup>2</sup> ergeben würde (vgl. Destatis, 2014a, S. 12).

**Tabelle 3-14:** Energie- und Kapitalkosten pro Gebäudetechnologie (Deutschland, 2007)

		Energiekosten		Kapitalkosten		Gesamt (€ <sub>2007</sub> /m <sup>2</sup> a)
		Kaufpreis*	Nutzungspreis	Kaufpreis/ Baukosten	Nutzungspreis (Miete)	
		(€ <sub>2007</sub> /MWh, brutto)	(€ <sub>2007</sub> /m <sup>2</sup> a)	(€ <sub>2007</sub> /m <sup>2</sup> )	(€ <sub>2007</sub> /m <sup>2</sup> a)	
Altbau	Heizöl	59,18	9,46	1.111	57,50	66,96
	Erdgas	61,30	9,80	1.111	57,50	67,30
	Kohle	9,94	1,59	1.111	57,50	59,09
	Holz	40,00	6,40	1.111	57,50	63,89
	Strom	185,05	29,60	1.111	57,50	87,09
Sanierter Altbau	Heizöl	59,18	3,85	1.410	72,10	75,95
	Erdgas	61,30	3,98	1.410	72,10	76,09
	Holz	40,00	2,60	1.410	72,10	74,70
	Strom	185,05	12,03	1.410	72,10	84,13
Neubau (EnEV- Standard)	Heizöl	59,18	3,85	1.560	80,73	84,58
	Erdgas	61,30	3,98	1.560	80,73	84,71
	Holz	40,00	2,60	1.560	80,73	83,33
	Strom	185,05	12,03	1.560	80,73	92,76
Neubau (Passiv- haus)	Erdgas	61,30	0,92	1.872	96,88	97,79
	Holz	40,00	0,60	1.872	96,88	97,48
	Strom	185,05	2,78	1.872	96,88	99,65

(\*) Der Kaufpreis bezeichnet den Energieträgerpreis.

Quellen: Destatis, 2016, depi, 2016, IVD, 2008, Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2016, und Wahlberg et al., 2011.

**Tabelle 3-15:** Die Zusammensetzung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland im Jahr 2007 gemäß Destatis, 2010 und eigenem Modell (in TWh)

	Destatis (2010)	Eigenes Modell	
Raumwärme und Warmwasser	521	521	(kalibriert auf Destatis, 2010)
Motorisierter Individualverkehr	378	388	(eigenes Bottom-Up-Ergebnis)
Sonstiges (mechanische Energie, Beleuchtung, sonst. Prozesswärme)	93	83	(Verrechnung der Differenz aus motorisiertem Individualverkehr)
Gesamt (TWh)	992	992	

Quelle: Destatis, 2010 und eigene Berechnungen.

### 3.4.3 Dynamik der Fahrzeug- und Gebäudebestände

Für die Modellierung energie- und klimapolitischer Instrumente im Zeitablauf ist es wichtig, die Modellperioden in einen modellendogenen Zusammenhang zu setzen, um zu berücksichtigen, dass sich Investitionsentscheidungen der laufenden Periode über die Bestandseffekte auf die Energienachfrage der Folgeperiode auswirken. Die Dynamik der Fahrzeug- und Ge-



bäudebestände wird im Modell ähnlich behandelt wie die des Produktivkapitals (vgl. Abschnitt 3.3).

### **Dynamik des Fahrzeugbestands**

Der Fahrzeugbestand  $FB_{m,t}$  pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$  wird dynamisch wie folgt modelliert:

$$FB_{m,t} = (1 - \vartheta)FB_{m,t-1} + c_{m,t-1} * p_m^F \quad (3-34)$$

- mit
- $FB_{m,t}$  Wert des Fahrzeugbestands pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$
  - $\vartheta$  Abschreibungsrate des Fahrzeugbestands pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$  (entspricht der gesamten Neuwagenquote)
  - $c_{m,t}$  Anzahl Neuwagen pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$
  - $p_m^F$  Nutzungspreis (Mietkosten) von Bestandsfahrzeugen pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$  (€/Fahrzeug)

Der wertmäßige Fahrzeugbestand ( $FB_{m,t}$ ) pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$  verringert sich jede Periode um die Abschreibungsrate  $\vartheta$ , die sich aus der Neuwagenquote, das heißt dem Anteil neu gekaufter Fahrzeuge am Gesamtbestand, ergibt. Gleichzeitig steigt der Wert des Fahrzeugbestands um das Produkt aus der Anzahl neu gekaufter Fahrzeuge (Mengenkomponente) und den Mietkosten bzw. dem Nutzungspreis von Bestandsfahrzeugen pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$  (Preiskomponente; vgl. auch Tabelle 3-12).

### **Dynamik des Gebäudebestands**

Die Dynamik des Gebäudebestands  $GB_{k,t+1}$  pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$  wird für Altbauten und Neubauten bzw. sanierte Altbauten wie folgt erzeugt:

$$GB_{k,t}^{NBS} = GB_{k,t-1}^{NBS} + b_{k,t}^{NBS} * \frac{p_k^{NBS}}{\pi} \quad (3-35)$$

$$GB_{k,t}^A = (1 - s\varphi_{k,t-1})GB_{k,t-1}^A \quad (3-36)$$

- mit
- $GB_{k,t}^{NBS}$  Wert des Gebäudebestands von neuen bzw. sanierten Gebäuden pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$
  - $GB_{k,t}^A$  Wert des Gebäudebestands von Altbauten pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$
  - $b_{k,t}^{NBS}$  Neu gebaute bzw. sanierte Wohnfläche pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$  (in m<sup>2</sup>)
  - $p_k^{NBS}$  Mietkosten pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$  (in €/m<sup>2</sup>)

$\pi$	Diskontfaktor, um Gebäude-Neuwert in Gebäude-Gebrauchtwert zu überführen ( <i>Annahme</i> : $\pi = 2$ )
$\varphi_{k,t}$	Neubau- und Sanierungsrate pro Periode $t$ und Gebäudetechnologie $k$ (in % des jeweiligen Gesamtbestands)
$s$	Dämpfungsfaktor, um Wohnflächenwachstum zu ermöglichen ( <i>Annahme</i> : $s = 0,8$ ; vgl. Held & Waltersbacher, 2015)

Eine Bestandserhöhung findet nicht bei Altbauten, sondern nur bei neugebauten bzw. sanierten Gebäuden statt ( $GB_{k,t}^{NBS}$ ). Mengenmäßig geschieht dies je m<sup>2</sup> Wohnfläche im Maße der neu gebauten bzw. sanierten Wohnfläche pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$  ( $b_{k,t}^{NBS}$ ). Wertmäßig gehen die neugebauten bzw. sanierten Gebäude aber nicht mit ihrem Neuwert  $p_k^{NBS}$ , sondern mit ihrem Gebrauchtwert ( $p_k^{NBS}/\pi$ ) in den für die folgende Periode gültigen Bestand ein. Für den Diskontfaktor  $\pi$ , der den Gebäude-Neuwert in den Gebäude-Gebrauchtwert überführt, wurde hier  $\pi = 2$  angenommen, da Gebäude weniger schnell an Wert verlieren als Fahrzeuge, bei denen der Gebrauchtwert nach DAT (2008) rund ein Drittel vom Neuwert beträgt (vgl. Abschnitt 3.4.2).

Bei Altbauten ( $GB_{k,t}^A$ ) finden keine Bestandserhöhungen, sondern nur Abschreibungen statt. Die Geschwindigkeit der Abschreibungsrate ( $s\varphi_{k,t}$ ) wird jedoch modellendogen ermittelt. Das bedeutet, sie ist abhängig von der Bestandserhöhung von neugebauten bzw. sanierten Gebäuden.  $\varphi_{k,t}$  bezeichnet dabei die Neubau- und Sanierungsrate pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$ , in Prozent des jeweiligen Gesamtbestands.<sup>228</sup> Um bis zum Jahr 2030 Wohnflächenwachstum zu ermöglichen, wird hier ein Dämpfungsfaktor ( $s$ ) eingeführt, damit die Abschreibungen pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$  nicht in vollem Umfang durchgeführt werden, sondern nur zu ca. 80 %. Diese Annahme wurde auf Basis der Prognosen von Held & Waltersbacher (2015) kalibriert, die bis zum Jahr 2030 von einem gesamten Wohnflächenwachstum in Deutschland um rund 7 % auf ca. 3,5 Mrd. m<sup>2</sup> ausgehen.<sup>229</sup>

### 3.5 Modellierung von energie- und klimapolitischen Instrumenten für private Haushalte

Um die volkswirtschaftlichen Auswirkungen bestimmter energie- und klimapolitischer Ziele und Maßnahmen für private Haushalte analysieren zu können, müssen die jeweiligen energie- und klimapolitischen Instrumente ins Modell integriert werden. Dazu zählen vor allem die folgenden Instrumente (vgl. Abbildung 2-10):

---

<sup>228</sup> Die Sanierungsrate in Deutschland soll im Rahmen der klimapolitischen Ziele auf 2 % p.a. erhöht werden (vgl. Tabelle 2-5).

<sup>229</sup> Gründe hierfür liegen u. a. in einer steigenden Eigentümerquote und einer steigenden Pro-Kopf-Wohnfläche. Für weitere Ausführungen siehe Held & Waltersbacher, 2015.

- Marktbasierte Instrumente
  - ⇒ Emissionshandel
  - ⇒ CO<sub>2</sub>-Steuer
- Technologieförderung
  - ⇒ Förderinstrumente (Gewährung von Zuschüssen)
- Ordnungsrechtliche Instrumente
  - ⇒ CO<sub>2</sub>-Grenzwerte
  - ⇒ Energieverbrauchsstandards

Die Modellierung des Emissionshandels ist teilweise bereits in Abschnitt 3.3 erläutert worden. Für jede Modellregion wird pro Periode eine bestimmte Zertifikateausstattung vorgegeben, die sich im Zeitverlauf an den nationalen Reduktionszielen orientiert. Je nach Emissionshandels-Regime können diese Zertifikate entweder zwischen den am Emissionshandel teilnehmenden Sektoren innerhalb einer Modellregion oder zwischen Sektoren und Modellregionen untereinander gehandelt werden. Beim EU-ETS (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) würde der Handel zwischen den teilnehmenden Sektoren der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrie innerhalb der EU-28 stattfinden. Die am Emissionshandel teilnehmenden Sektoren des hier entwickelten Modells sind neben der Stromerzeugung, die folgenden Sektoren der energieintensiven Industrie: Mineralöl (OIL), Eisen & Stahl (IRS), NE-Metalle (NFM), Nichtmetallische Mineralien (NMM), Papier, Pappe & Druck (PPP), Chemische Erzeugnisse (CHM).

Die Zertifikate-Ausstattung wird pro Modellregion gleichmäßig reduziert, so dass sich im Jahr 2030 ein um 40 % geringeres Emissionsberechtigungsbudget im Vergleich zum Niveau von 1990 einstellt. Welcher Sektor und welche Modellregion in welcher Periode Zertifikate verkauft oder kauft, entscheidet der Lösungsalgorithmus preisabhängig und modellen-dogen.

Eine CO<sub>2</sub>-Steuer wird als Wertsteuer auf die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen gelegt. Da die verschiedenen fossilen Brennstoffe (Mineralölprodukte, Erdgas und Kohle) pro eingesetzte Wert- oder Mengeneinheit unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Intensitäten aufweisen, wird zunächst ein bestimmter CO<sub>2</sub>-Preis in der Einheit €/t CO<sub>2</sub> festgelegt und anschließend mithilfe der Brennstoffpreise sowie der brennstoffspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren berechnet, wie hoch die jeweilige Wertsteuer ausfällt. Eine Übersicht über zwei mögliche Ausprägungen einer CO<sub>2</sub>-Steuer, relativ zur eingesetzten Brennstoff-Werteinheit in Prozent, findet sich in Tabelle 3-16. Dabei wurde zwischen einem CO<sub>2</sub>-Preis von 7, 30 und 50 €/t CO<sub>2</sub> unterschieden. Für Benzin, beispielsweise, würde sich bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 7 €/t CO<sub>2</sub> ein Steuersatz von 5,3 %, bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von 30 €/t CO<sub>2</sub> ein Steuersatz von 16,0 % und bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von

50 €/t CO<sub>2</sub> ein Steuersatz von 26,7 % ergeben (jeweils bezogen auf den Netto-Benzinpreis, vgl. auch Tabelle 2-8).<sup>230</sup>

**Tabelle 3-16:** Brennstoffspezifische CO<sub>2</sub>-Steuersätze bei 7 €/t CO<sub>2</sub>, 30 €/t CO<sub>2</sub> und 50 €/t CO<sub>2</sub>

	Energieträgerpreis im Jahr 2015 (€/MWh, netto)	CO <sub>2</sub> -Gehalt (t CO <sub>2</sub> /MWh)	CO <sub>2</sub> -Steuer bei 7 €/t CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Steuer bei 30 €/t CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Steuer bei 50 €/t CO <sub>2</sub>
Benzin	48,60	0,259	3,7 %	16,0%	26,7 %
Diesel	45,20	0,266	4,1 %	17,7%	29,5 %
Heizöl	42,33	0,266	4,4 %	18,9%	31,5 %
Erdgas	51,31	0,202	2,8 %	11,8%	19,6 %
Kohle	7,78	0,353	31,7 %	136,0%	226,7 %

Quellen: Destatis, 2016, Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2014 und 2016 sowie Tabelle 2-8 oben.

Förderinstrumente werden analog zur CO<sub>2</sub>-Steuer modelliert. Für jede produzierte oder nachgefragte Werteinheit wird ein bestimmter Fördersatz (Kaufzuschuss) gewährt, der im Modell einer negativen Wertsteuer entspricht. Kaufzuschüsse für Elektroautos werden auf die Neuwagennachfrage im Fahrzeugaggregat, Förderzuschüsse für Neubauten bzw. sanierte Altbauten auf die Neubau- bzw. Sanierungsnachfrage im Gebäudeaggregat gelegt.

CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Fahrzeuge lenken die Produktionsaktivität der Automobilindustrie. Sie forcieren dort eine Senkung des Durchschnittswerts der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller verkauften Fahrzeuge in einer Periode (vgl. Tabelle 2-7 in Abschnitt 2.2.3.2). Dieser Durchschnittswert ( $\bar{\mu}_t^F$ ) ist wie folgt gegeben.<sup>231</sup>

$$\bar{\mu}_t^F = \frac{\sum_m \mu_{m,t}^F N F_{m,t}}{\sum_m N F_{m,t}} \quad (3-37)$$

Dabei bezeichnet  $N F_{m,t}$  die Anzahl der Neuwagen pro Periode  $t$  und Fahrzeugtechnologie  $m$  und  $\mu_{m,t}^F$  die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der jeweiligen Fahrzeugtechnologie  $m$  in Periode  $t$ . Die forcierte Senkung dieses Durchschnittswerts hat im Modell zwei grundsätzliche Anpassungsreaktionen zur Folge. Ausschlaggebend hierfür ist die Tatsache, dass emissionsärmere Fahrzeugtechnologien tendenziell höhere Kapitalkosten aufweisen als emissionsintensivere (vgl. Tabelle 3-12). Einerseits müssen emissionsärmere Fahrzeuge verstärkt zugekauft bzw. produziert werden, um einen niedrigeren Durchschnittswert einzuhalten (Substitutionseffekt). Hierfür sind besonders reine Elektrofahrzeuge attraktiv, da sie vollkommen emissionsfrei sind. Andererseits bedeutet die Substitution zu emissionsärmeren Fahrzeugtechnologien, bei Aufrechterhaltung desselben Kaufvolumens, ceteris paribus eine Verteuerung der Neufahrzeuge und damit einen Anstieg der Nutzungskosten. In Folge der Budgetbeschrän-

<sup>230</sup> Pro Liter Benzin wären damit Kosten in Höhe von 0,02 bzw. 0,15 Cent verbunden (vgl. Tabelle 2-8).

<sup>231</sup> Die aktuell gültigen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte in der EU gelten für jeden Hersteller. Im hier betrachteten Modell gibt es nur einen repräsentativen Automobil-Hersteller in Deutschland.

kung der privaten Haushalte führt ein exogen vorgegebener niedrigerer Durchschnittswert daher *ceteris paribus* zu einem Rückgang des Kaufvolumens, das heißt, es werden weniger Fahrzeuge gekauft (Budgeteffekt). Stattdessen werden ältere Fahrzeuge verstärkt genutzt oder die Konsumausgaben für andere Zwecke verwendet. Die Höhe bzw. Quantifizierung der beiden Effekte wird durch den Lösungsalgorithmus des Modells bestimmt.

Die EnEV für Gebäude ist im Ausgangsgleichgewicht über die Definition des spezifischen Energieverbrauchs der neugebauten bzw. sanierten Gebäudetypen explizit gegeben. Eine Verschärfung der EnEV über die Zeit kann aber über die Reduktion des durchschnittlichen Energieverbrauchsstandards forciert werden. Analog zu den CO<sub>2</sub>-Grenzwerten der Fahrzeuge ist der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch ( $\bar{\varepsilon}_t^G$ ) der in Periode ( $t$ ) neugebauten bzw. sanierten Gebäudetypen ( $k$ ) wie folgt gegeben.

$$\bar{\varepsilon}_t^G = \sum_k \varepsilon_{k,t}^G NSG_{k,t} / \sum_k NSG_{k,t} \quad (3-38)$$

Dabei bezeichnet  $NSG_{k,t}$  die Anzahl der neugebauten bzw. sanierten Gebäude pro Periode  $t$  und Gebäudetechnologie  $k$  und  $\varepsilon_{k,t}^F$  den spezifischen Energieverbrauch der jeweiligen Gebäudetechnologie  $k$  in Periode  $t$ . Auch hier löst eine forcierte Senkung des Durchschnittsverbrauchs einerseits Substitutionseffekte hin zu mehr Passivhäusern aus, und andererseits einen Rückgang der Neubauten und Sanierungen (Budgeteffekt). In letzterem Falle werden nicht sanierte Altbauten verstärkt genutzt und die Konsumausgaben der privaten Haushalte für andere Zwecke verwendet. Auch hier wird die Höhe bzw. Quantifizierung der beiden Effekte modellendogen bestimmt.



## 4 Modellgestützte Szenarioanalyse

Im Folgenden werden die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der in Kapitel 2 beschriebenen klimapolitischen Instrumente mit dem in Kapitel 3 beschriebenen technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell untersucht. Dies geschieht im Rahmen einer modell- und szenariogestützten Kostenwirksamkeitsanalyse, die sich in zwei Teile gliedert. Im ersten Teil wird ein klimapolitischer Instrumentenvergleich durchgeführt, in dem unterschiedliche Instrumente dahin gehend untersucht werden, welche Technologieentscheidungen sie innerhalb der Energienachfrage privater Haushalte anstoßen und welche volkswirtschaftlichen Kosten damit verbunden sind (Abschnitt 4.1). Im zweiten Teil wird der Frage nachgegangen, welchen Beitrag unterschiedliche Sektoren und Länder – darunter vor allem die privaten Haushalte in Deutschland – in einem EU-weiten kostenminimierenden sektorübergreifenden Emissionshandelssystem zur CO<sub>2</sub>-Emissionsvermeidung leisten sollten (Abschnitt 4.2). Dadurch treten die Rückkopplungseffekte zwischen der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland und der restlichen (globalen) Wirtschaft zum Vorschein und machen die Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte für den Klimaschutz sichtbar.

### 4.1 Vergleich klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich

#### 4.1.1 Szenariodefinition und Modellierung

In Teil 1 der modellgestützten Szenarioanalyse werden verschiedene Strategien der klimapolitischen Regulierung im Haushaltsbereich auf ihre gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen untersucht und miteinander verglichen. Dazu zählen marktbasierende Instrumente, wie eine Erweiterung des EU-ETS oder eine Implementierung einer CO<sub>2</sub>-Steuer, sowie ordnungsrechtliche Ansätze (Standards) und Förderinstrumente (vgl. Abschnitt 3.5). Tabelle 4-1 beschreibt die vier zu untersuchenden Fälle, die sich durch das jeweilige klimapolitische Instrument zur Regulierung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland unterscheiden. Das Szenario „Standards“ sowie das Szenario „Förderung“ untersuchen dabei bestehende Instrumente, während die Szenarien „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ marktbasierende Alternativen zur gegenwärtigen Regulierung darstellen.

**Tabelle 4-1:** Szenariodefinition zum Vergleich klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich

	Szenario	Klimapolitische Regulierung privater Haushalte in Deutschland	Sonstige klimapolitische Regulierung
1	Standards	Effizienzstandards für Fahrzeuge und Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fortführung des EU-ETS bis 2030 (-43 % ggü. 2005)</li> </ul>
2	Förderung	Bezuschussung von neuen Elektroautos, Passivhausbauten und energetischen Sanierungen	
3	ETS+	Erweiterung des EU-ETS um private Haushalte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energiesteuern (bereits in GTAP-Datenbank enthalten)</li> </ul>
4	CO <sub>2</sub> -Steuer	CO <sub>2</sub> -Steuer auf die Energienachfrage privater Haushalte	

In allen vier Szenarien wird zunächst eine Fortführung des gegenwärtig implementierten EU-ETS angenommen, das für die teilnehmenden Sektoren eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 43 % ggü. dem Niveau von 2005 vorsieht. Der im Modell angenommene Emissionspfad ist in Tabelle 4-2 aufgeführt. Die Angaben der Jahre 2005, 2007 und 2010 entsprechen den im Markt verfügbaren Emissionsberechtigungen nach EEA (2015a). Der Verlauf für die Jahre 2015 bis 2030 wurde so berechnet, dass die EU-ETS-Zielvorgaben gegenüber 2005, das heißt -21 % im Jahr 2020 und -43 % im Jahr 2030, eingehalten werden.

**Tabelle 4-2:** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionsberechtigungen im EU-ETS bis zum Jahr 2030

	Einheit	2005	2007	2010	2015	2020	2025	2030
EU-ETS-Zertifikate	Mio.	2.458	2.429	2.197	2.064	1.942	1.671	1.401
Veränderung ggü. 2005	%	0	-1	-11	-16	-21	-32	-43

Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf EEA, 2015a.

Als implizite klimapolitische Regulierung sind in allen vier Szenarien außerdem die im Basisjahr gültigen Energiesteuern aus der GTAP-Datenbank durch die Unterscheidung von Marktpreisen (brutto) und Faktorkosten (netto) gemäß VGR-Systematik gegeben. Die Steuersätze werden in dieser Betrachtung jedoch nicht verändert.

### **Szenario „Standards“**

In dem hier betrachteten Vergleich fungiert das Szenario „Standards“ als Referenzentwicklung, mit der die Entwicklungen der anderen drei Szenarien zu klimapolitischen Instrumenten verglichen werden. In diesem Szenario werden die aktuell gültigen Effizienzstandards für Fahrzeuge (CO<sub>2</sub>-Grenzwerte) und Gebäude (EnEV) in Deutschland bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben. Die vorgegebene zeitliche Entwicklung der Effizienzstandards ist in Tabelle 4-3 dargestellt.

**Tabelle 4-3:** Vorgabe der Effizienzstandards für Fahrzeuge und Gebäude in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 im Szenario „Standards“

	Einheit	2007	2010	2015	2020	2025	2030
Durchschnittl. spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen aller zugelassenen Neuwagen	g CO <sub>2</sub> /km	159	145	115	95	78	65
Durchschnittl. spez. Wärmebedarf aller neugebauten bzw. sanierten Gebäude	kWh/m <sup>2</sup> a	63	56	47	39	32	27

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Automotive News Europe, 2015, IKA, 2014 und Tuschinski, 2015.

Demnach verringern sich die durchschnittlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller neu zugelassenen Fahrzeuge in Deutschland bis 2020 gemäß EU-Ziel auf 95 g CO<sub>2</sub>/km (vgl. auch Tabelle 2-7 in Abschnitt 2.2.3.2). Für das Jahr 2025 plant die EU-Kommission einen Zielkorri-



von 68 bis 78 g CO<sub>2</sub>/km.<sup>232</sup> Für das Jahr 2030 gibt es hingegen keine EU-Ziel-Vorgabe. Setzt man für 2025 den oberen Wert des Zielkorridors von 78 g CO<sub>2</sub>/km und schreibt man die Entwicklung weiter fort, ergibt sich für das Jahr 2030 eine Zielvorgabe von 65 g CO<sub>2</sub>/km.<sup>233</sup> Insgesamt müssen die Fahrzeughersteller in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 eine Reduktion der durchschnittlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 4 % p.a. erzielen.<sup>234</sup>

Die EnEV für Gebäude (vgl. Abschnitt 2.2.3.1) ist im Ausgangsgleichgewicht über die Definition des spezifischen Wärmebedarfs der neugebauten bzw. sanierten Gebäudetypen explizit gegeben. Die seit 1.01.2016 gültigen energetischen Neubau-Anforderungen der EnEV 2014 bedeuten im Vergleich zur EnEV 2009 eine Verschärfung um ca. 25 %.<sup>235</sup> Unterstellt man diese Entwicklung pauschal im gesamten Zeitraum 2007 bis 2030 (3,5 % pro Jahr), erhält man die in Tabelle 4-3 dargestellte Zeitreihe, die im Modell vorgegeben wird. Demnach sinkt der durchschnittliche spezifische Wärmebedarf aller neugebauten bzw. sanierten Gebäude von 63 kWh/m<sup>2</sup>a im Jahr 2007 auf 27 kWh/m<sup>2</sup>a im Jahr 2030.

### **Szenario „Förderung“**

Um die Wirkung von Förderinstrumenten von der Wirkung von Effizienzstandards zu unterscheiden, werden diese in zwei getrennten Szenarien untersucht. Das Szenario „Förderung“ untersucht daher die Bezuschussung von neuen Elektroautos, Passivhausbauten und energetischen Sanierungen ohne Vorgabe von Effizienzstandards. Die Zuschüsse werden als Subventionen modelliert und im Modell auf neue Fahrzeuge im Fahrzeug-Aggregat (vgl. Abbildung 3-12) und auf neugebaute bzw. sanierte Gebäude im Gebäude-Aggregat (vgl. Abbildung 3-13) gelegt. Tabelle 4-4 listet die hierfür verwendeten Fördersätze auf, die anschließend einzeln erläutert werden.

Für den Kauf neuer Elektrofahrzeuge (inkl. PHEV) soll es nach Angaben von DIE WELT (26.02.16) ab Juli 2016 einen Kaufzuschuss in Höhe von 5.000 € geben. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Kaufpreise der im Modell betrachteten Referenzfahrzeuge gemäß Tabelle 3-12 ergeben sich daraus Fördersätze in Höhe von 23 % (kleine Elektrofahrzeuge), 14 % (mittlere PHEV-Fahrzeuge) und 8 % (große PHEV-Fahrzeuge).

---

<sup>232</sup> Vgl. IKA (2014).

<sup>233</sup> Der Grund, warum hier die obere Grenze des Zielkorridors von 68 bis 78 g CO<sub>2</sub>/km als Vorgabe für das Jahr 2025 angenommen wurde, liegt darin, dass die größten Effizienzfortschritte für klassische Verbrennungsmotoren vermutlich bereits getätigt worden sind und weitere Einsparungen über das 2020-Ziel hinaus nur durch eine verstärkte „Hybridisierung“ der Flotte erreicht werden können (vgl. Automotive News Europe, 2015).

<sup>234</sup> Dabei sind die Effizienzverbesserungen auf eine politikinduzierte und eine autonom stattfindende Entwicklung zurückzuführen. Letztere tritt nicht mit der Rate der allgemeinen Energieproduktivitätsverbesserung von im Schnitt 0,6 % in Deutschland p.a. ein (vgl. Tabelle 3 8), sondern mit einer höheren Rate von 1 % p.a.. Hier wird eine, im Vergleich zur Energieproduktivität, überdurchschnittliche Entwicklung unterstellt.

<sup>235</sup> Vgl. Tuschinski, 2015.

**Tabelle 4-4:** Unterschiedliche Fördersätze im Szenario „Förderung“

Politikinstrument	Fahrzeug-/ Gebäudetechnologie		Zuschuss (Tsd. €)	Kaufpreis (Tsd. €)	Fördersatz (pro €)
„Umweltbonus“	Fahrzeuge	Strom (Klein)	5	22	23 %
		PHEV (Mittel)	5	36	14 %
		PHEV (Groß)	5	61	8 %
KfW-Investitionszuschuss (CO <sub>2</sub> -Gebäudes.-Progr.)	Gebäude	Sanierter Altbau	25	127	24 %
KfW-Förderkredit		Passivhaus-Neubau	-	-	25 %

Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf Destatis, 2008a, Destatis, 2008b, KfW, 2015a, KfW, 2014 und DIE WELT, 26.02.16.

Für Neubauten und Sanierungen stehen KfW-Förderkredite und Investitionszuschüsse zur Verfügung.<sup>236</sup> Für Altbausanierungen werden bis zu 25.000 € als Investitionszuschuss pro Wohneinheit gewährt.<sup>237</sup> Setzt man diese Summe in Relation zum Kaufpreis für eine Wohneinheit, ergibt sich ein Fördersatz für Altbausanierungen in Höhe von 24 %.<sup>238</sup> Bei Neubauten stehen keine direkten Investitionszuschüsse zur Verfügung, sondern zinsverbilligte KfW-Darlehen in Verbindung mit einem maximalen Tilgungszuschuss in Höhe von 10 % der Darlehenssumme. Um die Bedeutung des KfW-Zinsvorteils im Vergleich zu Angeboten anderer (privater) Geschäftsbanken, in Relation zur Investitionssumme, abschätzen zu können, wird folgende Beispielrechnung verwendet: Bei Baukosten von 200.000 €, einem Eigenkapitalanteil von 50 % und einer entsprechenden Darlehenssumme von 100.000 € bietet die KfW, mit einer Laufzeit von 20 Jahren, Darlehen mit einem effektiven Sollzins von 0,75 % p.a. an.<sup>239</sup> Am Markt wird ein vergleichbares Darlehen derzeit mit einem effektiven Jahreszins von 1,9 % angeboten.<sup>240</sup> Bezogen auf die Baukosten ergibt sich durch die KfW-Finanzierung ein Zinsvorteil von rund 15 %. In Kombination mit einem Tilgungszuschuss von 10 % ergibt sich daraus ein Fördersatz für Passivhaus-Neubauten von 25 %. Standard-Neubauten, die nicht wie Passivhäuser über die energetischen EnEV-Anforderungen hinausgehen, werden von der KfW ab 1.04.2016 nicht mehr gefördert.

Im Modell wird das für die Bezuschussung nötige Geld aus dem Einkommen des repräsentativen Verbrauchers entnommen, das anschließend nicht mehr für andere Konsum- oder Sparzwecke zur Verfügung steht.

<sup>236</sup> Vgl. KfW (2015a), KfW (2015b), KfW (2014) sowie Diefenbach et al. (2013)

<sup>237</sup> Dies gilt für den KfW-Effizienzhaus-70-Standard (vgl. KfW, 2015a).

<sup>238</sup> Für die Größe der Wohneinheit wurde die durchschnittliche Wohnungsgröße von Altbauten im Basisjahr in Höhe von 90 m<sup>2</sup> angenommen (vgl. Destatis 2008a).

<sup>239</sup> Vgl. KfW (2015b).

<sup>240</sup> Vgl. FOCUS Online (2016).

**Szenario „ETS+“**

Im Szenario „ETS+“ wird untersucht, welche Auswirkungen ein um die Energienachfrage der privaten Haushalte in Deutschland erweitertes EU-ETS hätte. Im Vergleich zu den beiden zuvor beschriebenen Szenarien ist dieses Politikinstrument in Deutschland derzeit nicht implementiert. Es wird aber diskutiert (vgl. Abschnitt 2.2.3). Im Modell wird das um die Energienachfrage privater Haushalte erweiterte EU-ETS dadurch berücksichtigt, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte in Deutschland im Basisjahr, bzw. die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Zertifikate pro Tonne CO<sub>2</sub>, zur bestehenden Zertifikatmenge des EU-ETS (vgl. Tabelle 4-2) hinzugezählt werden und anschließend derselbe Reduktionspfad bis zum Jahr 2030 angenommen wird (-43 % ggü 2005). Tabelle 4-5 beschreibt die Entwicklung der Emissionsberechtigungen in einem um die Energienachfrage der privaten Haushalte in Deutschland erweiterten EU-ETS bis zum Jahr 2030 im Szenario „ETS+“.

**Tabelle 4-5:** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionsberechtigungen in einem um die Energienachfrage der privaten Haushalte in Deutschland erweiterten EU-ETS bis zum Jahr 2030

	Einheit	2007	2010	2015	2020	2025	2030
EU-ETS-Zertifikate	Mio.	2.642	2.409	2.277	2.154	1.884	1.613
davon private Haushalte	Mio.	212	<i>(wird modellendogen berechnet)</i>				

Quellen: GTAP8-Datenbank und Tabelle 4-2.

**Szenario „CO<sub>2</sub>-Steuer“**

Das Szenario „ETS+“ ist als marktbasierter Ansatz eng verbunden mit dem vierten Szenario „CO<sub>2</sub>-Steuer“. Hier wird ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis (€/t CO<sub>2</sub>) definiert und in einen brennstoffspezifischen CO<sub>2</sub>-Steuersatz (% pro €) umgerechnet (vgl. Tabelle 3-16 in Abschnitt 3.5), der wiederum auf die Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland gelegt wird.<sup>241</sup> Die Höhe des Steuersatzes muss im Voraus festgelegt werden. Hier soll ein mittlerer Wert in Höhe von 30 €/t CO<sub>2</sub> angenommen werden. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3-16 dargestellten brennstoffspezifischen CO<sub>2</sub>-Steuersätze. Im Modell werden die daraus resultierenden Steuereinnahmen des Staates pauschal (*lump-sum*) an den repräsentativen Verbraucher zurückverteilt.

Die hier durchgeführte Szenarioanalyse kann letztendlich als eine Kombination aus explorativer und normativer Szenariotechnik verstanden werden.<sup>242</sup> Explorativ bedeutet, dass unterschiedlich ausgeprägte klimapolitische Instrumente auf ihre damit verbundenen gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen analysiert werden. Dies gilt hier hauptsächlich für die Analyse der Effizienzstandards (Szenario „Standards“), der CO<sub>2</sub>-Steuer (Szenario „CO<sub>2</sub>-Steuer“) so-

<sup>241</sup> Die CO<sub>2</sub>-Steuer gilt ausschließlich für die Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland. Andere Nicht-ETS-Sektoren, wie z. B. der Dienstleistungssektor, sind davon nicht betroffen.

<sup>242</sup> Vgl. Kosow & Gaßner (2008) für eine ausführliche Erörterung verschiedener Techniken der Szenarioanalyse.

wie der Förderinstrumente (Szenario „Förderung“), da diese keine expliziten CO<sub>2</sub>-Minderungsziele beinhalten. Ihre ökologische Treffsicherheit ist nicht garantiert (vgl. Abschnitt 2.3.2). Eine andere Perspektive wird durch die normative Szenarioanalyse angestrebt. Hier wird im Voraus ein Ziel definiert, dessen Erreichung auf unterschiedliche Weise stattfinden kann. Dies gilt im hier betrachteten Szenarienvergleich für den Emissionshandel (Szenario „ETS+“), bei dem im Voraus eine Emissionsobergrenze festgelegt wird, deren Zustandekommen dem Zertifikate-Markt über den Zertifikate-Handel überlassen wird. Dadurch ist eine ökologische Treffsicherheit gewährleistet.

**Tabelle 4-6:** Brennstoffspezifische CO<sub>2</sub>-Steuersätze im Szenario „CO<sub>2</sub>-Steuer“

<b>Energieträger</b>	<b>Energieträgerpreis im Jahr 2015 (€/MWh, netto)</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Gehalt (t CO<sub>2</sub>/MWh)</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Steuersatz bei 30 €/t CO<sub>2</sub></b>
Benzin	48,60	0,259	16,0 %
Diesel	45,20	0,266	17,7 %
Heizöl	42,33	0,266	18,9 %
Erdgas	51,31	0,202	11,8 %
Kohle	7,78	0,353	136,0 %

Quellen: Destatis, 2016, Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2014 und 2016 sowie Tabelle 3-16 oben.

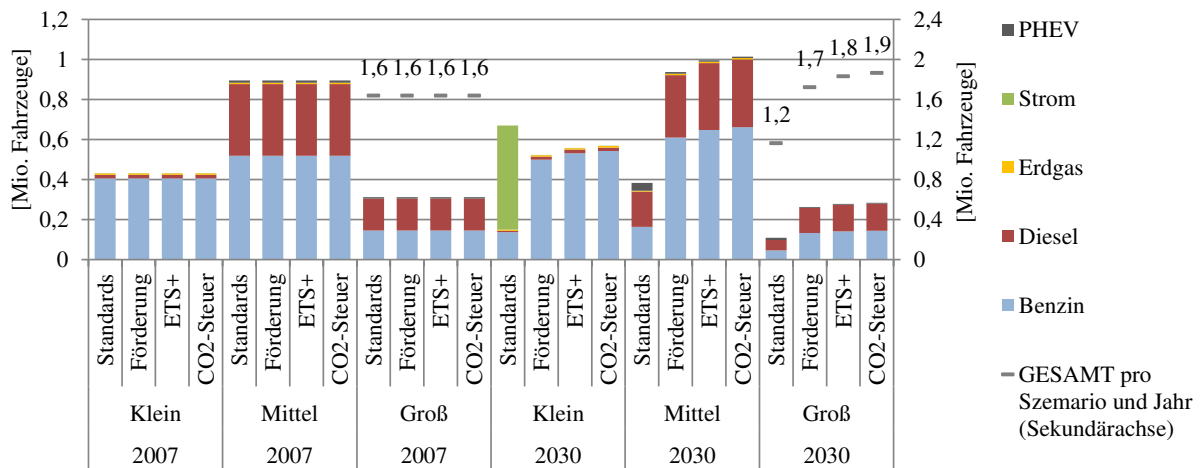
#### 4.1.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellrechnungen der oben definierten vier Szenarien in einem Szenariovergleich ausgewertet. Dabei liegt das Augenmerk einerseits auf den Mechanismen, die die unterschiedlichen klimapolitischen Instrumente im Haushaltsbereich auslösen und andererseits auf ihren volkswirtschaftlichen Kosten. Folgende Fragen stehen dabei im Vordergrund: Wie beeinflussen die klimapolitischen Instrumente die Fahrzeug- und Gebäudetechnologiewahl der privaten Haushalte? Wie verändert sich die Zusammensetzung der Fahrzeug- und Gebäudebestände? Wie hoch fallen die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen jeweils aus? Und wie unterscheiden sich die klimapolitischen Instrumente hinsichtlich ihrer volkswirtschaftlichen Kostenwirksamkeit?

Abbildung 4-1 veranschaulicht die Entwicklung der Neukäufe der einzelnen Fahrzeugtechnologien im Szenarienvergleich.<sup>243</sup> Demnach verändern sich die Neukäufe im Laufe der Zeit im Szenario „Standards“ am stärksten. Um die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte einzuhalten, kommt es dort sowohl zu Substitutionseffekten zwischen den Bedarfsklassen und Antriebsarten als auch zu Budgeteffekten in Bezug auf die absolute Höhe der Neuwagenkäufe. Diese sinken von 1,6 Mio. Fahrzeugen im Basisjahr 2007 auf 1,2 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2030. Dagegen steigt die Anzahl der neuen Fahrzeuge in den anderen drei Szenarien auf 1,7 bis 1,9 Mio. Fahrzeuge leicht an.

<sup>243</sup> Die zugrundeliegenden Ergebniszahlen sind in Tabelle A-12 und Tabelle A-13 in Anhang A.4 aufgelistet.

**Abbildung 4-1:** Anzahl der Neuwagenkäufe der einzelnen Fahrzeugtechnologien in den Jahren 2007 und 2030 in Deutschland im Szenarienvergleich



Gleichzeitig kommt es im Szenario „Standards“ zu einer deutlichen Verschiebung des Erwerbs von großen und mittleren Fahrzeugen zu kleinen Fahrzeugen, da diese im Schnitt geringere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen und somit die Einhaltung der Durchschnittsgrenzwerte erleichtern. Im Jahr 2030 werden mit einer Anzahl von 0,7 Mio. rund 20 % mehr kleine Fahrzeuge gekauft als in den anderen drei Szenarien. Dagegen beträgt die Anzahl mittlerer (0,4 Mio.) und großer Fahrzeuge (0,1 Mio.) im Schnitt nur gut ein Drittel des Niveaus der anderen drei Szenarien.

Besonders auffällig ist der deutliche Anstieg der Verkäufe von kleinen Elektrofahrzeugen im Szenario „Standards“. Diese sind aufgrund ihrer Emissionsfreiheit für die Fahrzeughersteller im Modell zur Einhaltung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte besonders attraktiv. Mit 0,5 Mio. machen sie rund 40 % der gesamten Neuwagenkäufe im Jahr 2030 aus. Einer der Hauptgründe für dieses Ergebnis liegt darin, dass die Anforderungen an die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte stärker zunehmen (3,5 % p.a., vgl. Tabelle 4-3) als die exogen vorgegebenen und politikunabhängig stattfindenden Effizienzverbesserungen der Fahrzeugtechnologien von 1 % p.a. Von allen Fahrzeugtechnologien liegen im Jahr 2030 nur noch die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der reinen Elektrofahrzeuge sowie der PHEV-Fahrzeuge unter dem bindenden CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 65 g CO<sub>2</sub>/km (vgl. Tabelle 3-11).

Während der Anteil benzin- und dieselbetriebener Fahrzeuge an den Neuwagenkäufen in den Szenarien „Förderung“, „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ mit 99 % im Jahr 2007 und 98 % im Jahr 2030 annähernd gleichbleibt, sinkt er im Szenario „Standards“ auf die Hälfte (50 %). Elektrisch betriebene Fahrzeuge (inkl. PHEV) stellen mit 49 % knapp die andere Hälfte dar. Erdgasbetriebene Fahrzeuge kommen auf 1 %. Auffällig ist die geringe Nachfrage nach elektrisch betriebenen Fahrzeugen im Szenario „Förderung“, obwohl die elektrischen Antriebe dort explizit bezuschusst werden (vgl. Tabelle 4-4). Offenbar sind die im Modell hinterlegten Fördersätze aber zu niedrig, um die kostenseitigen Nachteile der elektrischen Antriebsarten aufzufangen oder zumindest eine ähnliche Wirkung wie die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte im Szenario „Standards“ zu entfalten.

In den Szenarien „Förderung“, „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ unterscheiden sich Höhe und Struktur der Neufahrzeuge wenig. Tendenziell nehmen die Verkäufe im Szenario „CO<sub>2</sub>-Steuer“ pro Fahrzeugtechnologie stärker zu als im Szenario „ETS+“, welches wiederum höhere Verkaufszahlen aufweist als das Szenario „Förderung“. Die Gründe hierfür sind in den Kreislaufzusammenhängen des Modells zu suchen. Aufgrund der Gleichheit von Ersparnissen und Investitionen (IS-Gleichheit), muss jede Bezuschussung aus dem laufenden Einkommen der privaten Haushalte „entnommen“ werden. Das heißt, die Bezuschussungssumme steht dem repräsentativen Verbraucher nicht mehr für andere Konsumausgaben zur Verfügung. Hierdurch kommt es zu negativen Rückkopplungseffekten zwischen Fahrzeugkäufen und anderen Konsumausgaben. Dagegen fällt die Wirkung von CO<sub>2</sub>-Steuern und Emissionszertifikaten nicht beim Kauf, sondern erst bei der Nutzung der Fahrzeuge an. Offenbar führt dies gesamtwirtschaftlich zu geringeren Budgeteinbußen auf Seiten der Konsumenten und damit zu geringeren Kaufhemmnissen als die Kreislaufwirkung der Förderinstrumente.<sup>244</sup>

Die veränderten Kaufaktivitäten schlagen sich schließlich in der Struktur des Fahrzeugbestands nieder, der für die vier Szenarien in Abbildung 4-2 dargestellt ist.<sup>245</sup> Bis zum Jahr 2030 steigt der Gesamtbestand von 39,1 Mio. auf 42,3 Mio. Fahrzeugen im Szenario „Standards“ und auf 44 bis 45 Mio. in den Szenarien „Förderung“, „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“. Der Anteil kleiner Fahrzeuge steigt in allen vier Szenarien, im Szenario „Standards“ jedoch besonders deutlich an. Dagegen geht die Anzahl mittlerer und großer Fahrzeuge im Szenario „Standards“ zurück, während sie in den anderen drei Szenarien leicht ansteigt, insbesondere die Anzahl mittlerer Fahrzeuge.

Der Nachfrageanstieg nach kleinen Fahrzeugen im Szenario „Standards“ wird primär durch die Nachfrage nach kleinen (emissionsfreien) Elektrofahrzeugen getrieben. Während der Anteil benzin- und dieselgetriebener Fahrzeuge in den Szenarien „Förderung“, „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ im Jahr 2030 mit 99 % annähernd gleich bleibt, sinkt er im Szenario „Standards“ auf 77 %. Der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge macht in diesem Fall 22 % aus, der Anteil erdgasbetriebener Fahrzeuge 1 %. Insgesamt sind im Szenario „Standards“ in Deutschland im Jahr 2030 mehr als 9 Mio. Elektrofahrzeuge zugelassen.<sup>246</sup> Offensichtlich entfalten die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Neuwagen im Modell eine stärkere Wirkung auf den Kauf von Elektrofahrzeugen als die Kaufprämie in Höhe von 5.000 €.

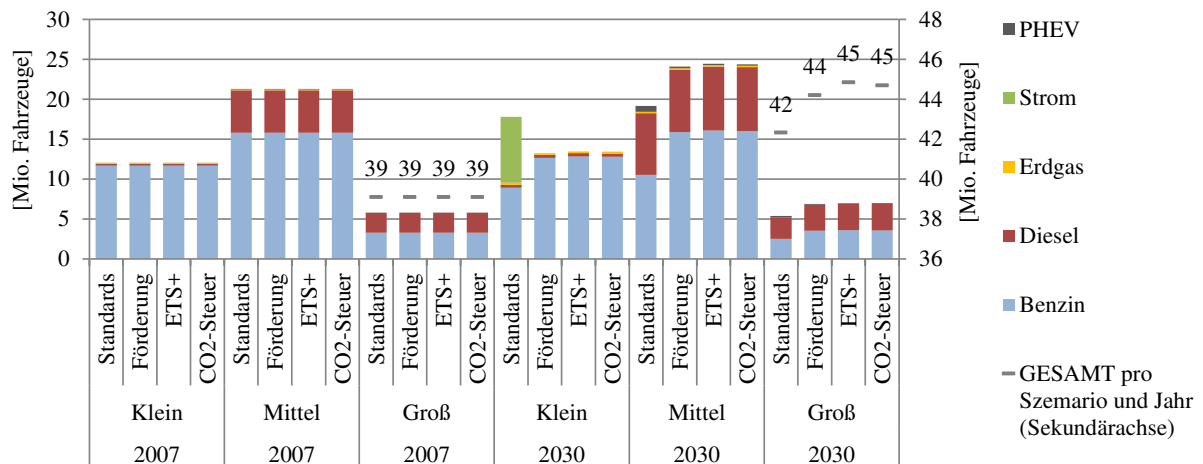
---

<sup>244</sup> Angebot und Nachfrage werden mithilfe des Preisvektors ausgeglichen.

<sup>245</sup> Vgl. auch Tabelle A-14 und Tabelle A-15 in Anhang A.4.

<sup>246</sup> Bei dieser hohen Zahl muss berücksichtigt werden, dass bei der Anschaffung von Elektrofahrzeugen im Modell wichtige Einflussgrößen der Realität, wie Reichweite der Batterien oder die Infrastruktur der Ladestationen, nicht berücksichtigt werden können, da sie nicht explizit im Preis enthalten sind. Das rationale Entscheidungskalkül von Anbietern und Nachfragern im Modell wägt lediglich die spezifischen Energie- und Kapitalkosten gegeneinander ab. Andere Einflussgrößen bleiben außen vor. Letzten Endes muss hier berücksichtigt werden, dass sämtliche verfügbare Fahrzeugtechnologien in Deutschland top-down auf 11 repräsentative Durchschnittstechnologien im Modell aufgeteilt wurden. Weitere Ausführungen zu den Grenzen der Analyse finden sich weiter unten in Abschnitt 5.2.

**Abbildung 4-2:** Bestandsstruktur nach Fahrzeugtechnologie in den Jahren 2007 und 2030 in Deutschland im Szenarienvergleich

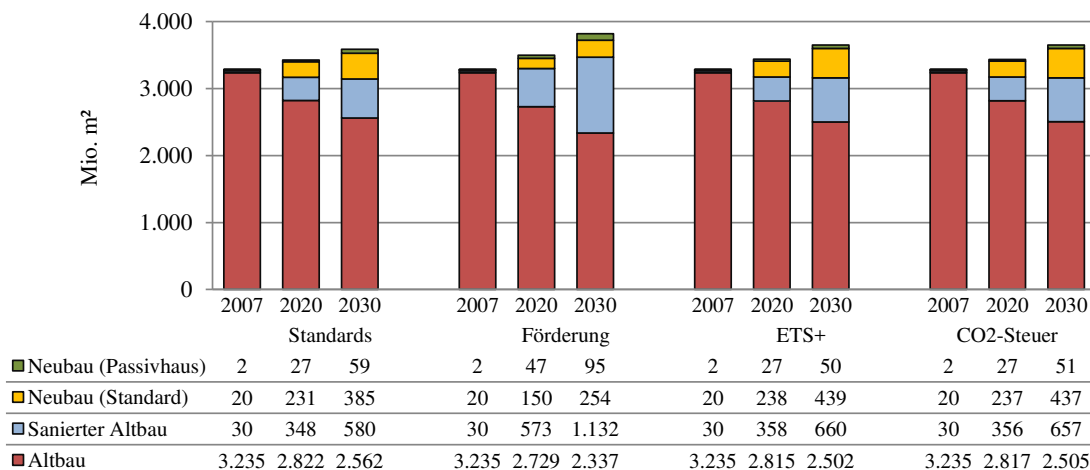


Welche Auswirkungen haben die untersuchten klimapolitischen Instrumente auf die Nachfrage nach Sanierungen und Neubauten? Abbildung 4-3 veranschaulicht die Entwicklung der Wohnfläche nach Gebäudeklassen pro Szenario in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030. Die Neubau- und Sanierungsaktivitäten ersetzen die Altbau-Wohnflächen kontinuierlich. Im Szenario „Standards“ fällt der Rückgang bis 2030 mit -670 Mio. m<sup>2</sup> am geringsten (-21 %), im Szenario „Förderung“ mit -900 Mio. m<sup>2</sup> am höchsten aus (-28 %). In den Szenarien „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ beträgt der Rückgang -730 Mio. m<sup>2</sup> (-23 %). Der Rückgang wird jedoch durch die Neubau- und Sanierungstätigkeiten überkompensiert, am meisten im Szenario „Förderung“ (+16 %), am geringsten im Szenario „Standards“ (+9 %).

Anhand der Wohnflächenentwicklung in Abbildung 4-3 lässt sich zudem feststellen, dass die Zunahme der Wohnflächen von Neubauten und sanierten Altbauten in den Szenarien „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ technologieneutral, das heißt proportional gleich, ausfällt. In allen drei Gebäudeklassen nimmt die Wohnfläche bis zum Jahr 2030, bezogen auf das Basisjahr 2007, ungefähr um das 20-fache zu.<sup>247</sup> Dagegen gibt es im Szenario „Förderung“ eine beabsichtigte Bevorzugung der geförderten sanierten Altbauten und neuen Passivhäusern. Dort ist zwischen 2007 und 2030 ein Wohnflächenanstieg um das 37- bzw. 42-fache zu verzeichnen, während er bei den nicht geförderten Neubauten nach EnEV-Standard nur das 12-fache beträgt (jeweils bezogen auf das Basisjahr 2007). Hier kommt es aufgrund des geringen spezifischen Energieverbrauchs von Passivhäusern zu einem Anstieg um das 26-fache ihrer Wohnfläche im Vergleich zum Basisjahr. Dagegen kommt es in den beiden anderen Gebäudeklassen zu einer geringeren Wohnflächenzunahme um das 18-fache.

<sup>247</sup> Der Anteil der Wohnfläche von Neubauten und sanierten Altbauten an der gesamten Wohnfläche in Deutschland beträgt im Basisjahr 2007 definitionsgemäß nur ca. 1,6 % (vgl. Tabelle 3-13 in Abschnitt 3.4.2).

**Abbildung 4-3:** Entwicklung der Wohnfläche und ihre Zusammensetzung nach Gebäudeklassen pro Szenario in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030



Welche Auswirkungen entfalten die untersuchten klimapolitischen Instrumente auf die Sanierungsrate? Abbildung 4-4 veranschaulicht die Entwicklung der Sanierungsrate im Zeitraum 2007 bis 2030 in Deutschland im Szenarienvergleich. Dabei ist auffällig, dass sich die Sanierungsrate bei Standards und Förderinstrumenten gegenläufig entwickelt. Förderinstrumente treiben die Sanierungsrate von 0,9 % auf 1,8 % im Jahr 2030 hoch. Dies ist nahe an der im Rahmen der Energiewende anvisierten 2 %-Marke (vgl. Tabelle 2-5). Dagegen sinkt die Sanierungsrate im Szenario „Standards“ auf 0,6 % ab. Die Vorgabe anspruchsvoller Energieverbrauchsstandards entfaltet im Modell über den Budgeteffekt offenbar eine hemmende Wirkung auf die Neubau- und Sanierungstätigkeiten. In den Szenarien „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ unterscheidet sich das Ausmaß der Sanierungsaktivitäten kaum. In beiden Szenarien sinkt die Sanierungsrate zunächst auf 0,7 % und steigt daraufhin bis zum Jahr 2030 auf 1,0 %.<sup>248</sup>

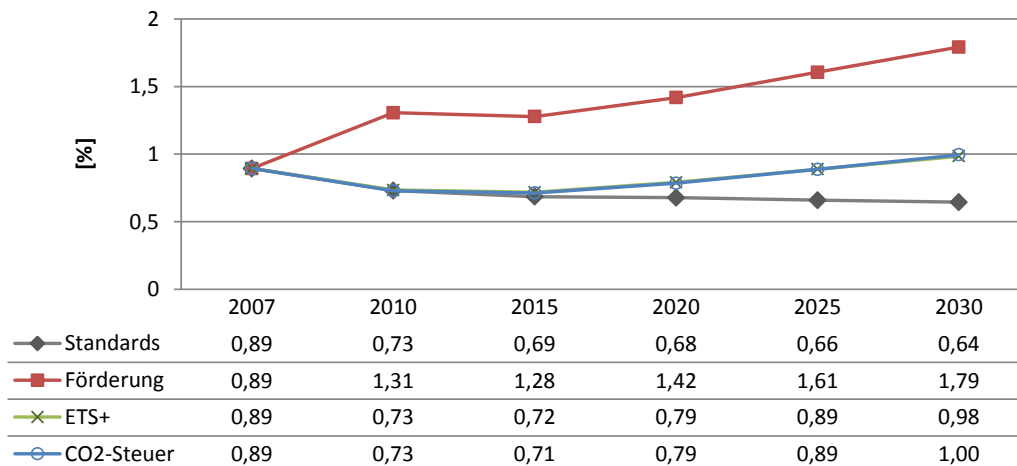
Abbildung 4-5 veranschaulicht die Veränderungen der verwendeten Heizungstypen in Deutschland, gemessen an der Wohnflächenzunahme in Mio. m<sup>2</sup> im Jahr 2030 im Vergleich zum Basisjahr 2007. Dies verdeutlicht die Veränderung der Nachfrage nach verschiedenen Heizungstypen im Zeitverlauf bzw. die Veränderung des Energieträgereinsatzes zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser unabhängig von der Gebäudeklasse. Die Veränderungen bei Passivhaus-Neubauten wurden dabei aus Darstellungsgründen auf einer Sekundärachse dargestellt, die einem Zehntel der Werte der Primärachse entspricht.<sup>249</sup>

<sup>248</sup> Ausschlaggebend hierfür sind u. a. steigende Heizöl- und Erdgaspreise (vgl. Ausführungen zu Abbildung 4-7 unten).

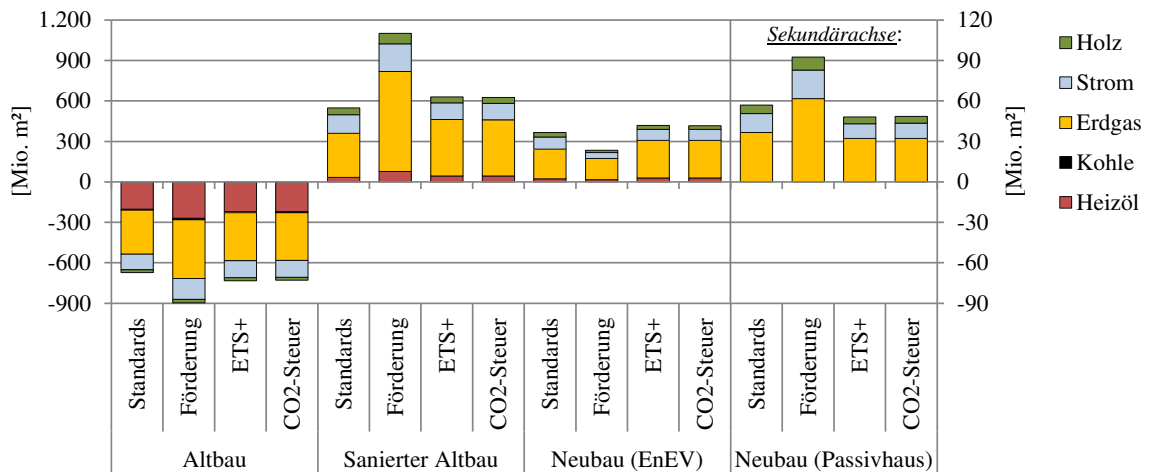
<sup>249</sup> Statt den gesamten Veränderungsbereich von -900 bis +1.200 Mio. m<sup>2</sup> abzudecken, umfasst sie demnach nur eine Spanne von -90 bis +120 Mio. m<sup>2</sup>.



**Abbildung 4-4:** Entwicklung der Sanierungsrate im Zeitraum 2007 bis 2030 in Deutschland pro Szenario

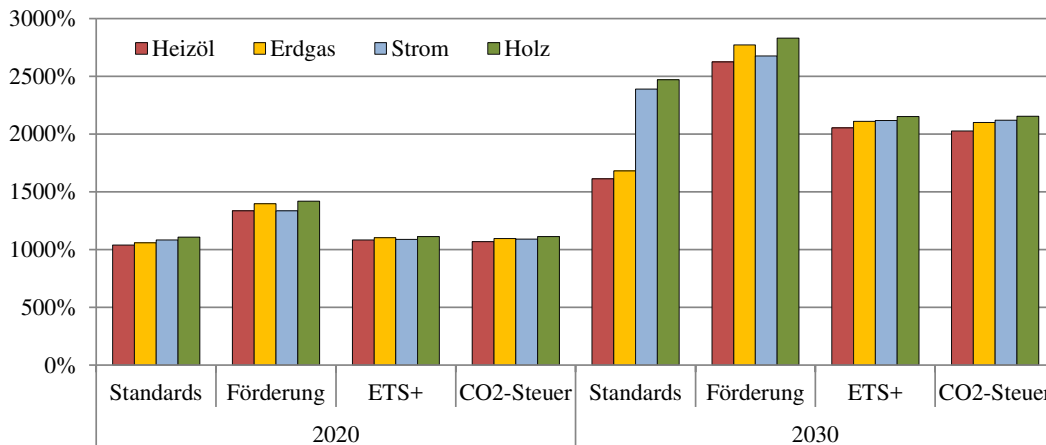


**Abbildung 4-5:** Veränderungen der Wohnfläche nach Heizungstyp und Gebäudeklasse im Jahr 2030 in Deutschland (Differenz zum Basisjahr 2007, in Mio. m<sup>2</sup>)



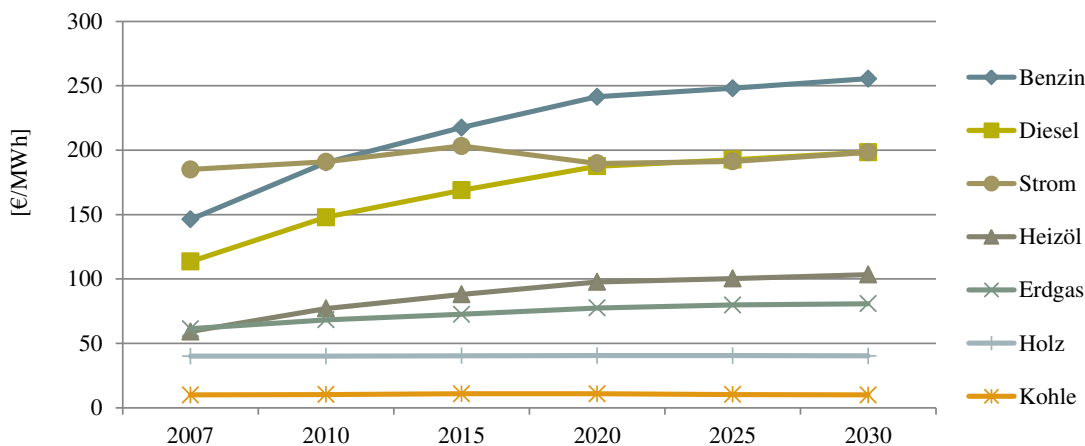
Die Veränderung der Heizungsstruktur pro Szenario wird hier allerdings kaum deutlich. Daher zeigt Abbildung 4-6 die Veränderungen der Wohnfläche nach Heizungstyp in den Jahren 2020 und 2030 in Deutschland als relative Differenz zum Basisjahr 2007. Es fällt auf, dass sich die Heizungsstruktur, das heißt die über die Bedarfsklassen summierte Wohnfläche pro Heizungstyp, in den Szenarien „Förderung“, „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ im gesamten Zeitraum jeweils nur wenig verändert. Dagegen wächst die Wohnfläche von mit Strom und Holz beheizten Gebäuden im Szenario „Standards“ bis zum Jahr 2030 stärker als die Wohnfläche von mit Erdgas und Heizöl beheizten Gebäuden. Verglichen mit dem jeweiligen Niveau im Jahr 2007 beträgt der Wohnflächenanstieg im Jahr 2030 der mit Strom und Holz beheizten Gebäude im Szenario „Standards“ knapp das 25-fache, der Wohnflächenanstieg der mit Erdgas und Heizöl beheizten Gebäude dagegen nur gut das 15-fache.

**Abbildung 4-6:** Veränderungen der Wohnfläche nach Heizungstyp in den Jahren 2020 und 2030 in Deutschland als relative Differenz zum Basisjahr 2007 im Szenariovergleich



Dieser Unterschied ist keine direkte Auswirkung der vorgegebenen Energieverbrauchsstandards, sondern ergibt sich indirekt über die veränderten spezifischen Energiekosten pro Heizungstyp. Die Energieverbrauchsstandards im Modell beeinflussen zunächst nur die Nachfrage nach Gebäudeklassen, deren spezifischer Energieverbrauch per Definition unabhängig vom eingesetzten Energieträger ist. Im Szenario „Standards“ werden aufgrund ihres geringen spezifischen Verbrauchs rund 15 % mehr Passivhäuser bzw. Passivhauswohnfläche gebaut als in den Szenarien „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ (vgl. Abbildung 4-3). Bei Energieverbrauchsstandards gibt es somit, im Gegensatz zu CO<sub>2</sub>-Grenzwerten bei Fahrzeugen, eine gewisse Freiheit in der Wahl des Heizungstyps. Ausschlaggebend für die Nachfrage nach einem bestimmten Heizungstyp im Szenario „Standards“ sind die damit verbunden spezifischen Energiekosten, die maßgeblich von den modellendogen bestimmten Energieträgerpreisen bestimmt werden. Deren Entwicklung im Zeitraum 2007 bis 2030 ist in Tabelle 4-7 dargestellt, und für das Szenario „Standards“ beispielhaft in Abbildung 4-7.<sup>250</sup>

**Abbildung 4-7:** Modellendogene Entwicklung der Energieträgerpreise für Haushalte im Zeitraum 2007 bis 2030 in Deutschland im Szenario „Standards“



<sup>250</sup> Eine detaillierte Auflistung findet sich in Tabelle A-18 im Anhang.

**Tabelle 4-7:** Modellendogene Entwicklung der Energieträgerpreise für Haushalte in Deutschland in den Jahren 2007 und 2030 im Szenariovergleich

			Strom	Benzin	Diesel	Erdgas	Heizöl	Holz	Kohle
Standards	2007	€ <sub>2007</sub> /MWh	185,1	146,2	113,6	61,3	59,2	40,0	9,9
	2030	€ <sub>2007</sub> /MWh	198,3	255,5	198,4	80,8	103,4	40,3	10,0
	Veränd. ggü. 2007	%	7,1	74,7	74,7	31,9	74,7	0,7	0,4
Förderung	2007	€ <sub>2007</sub> /MWh	185,1	146,2	113,6	61,3	59,2	40,0	9,9
	2030	€ <sub>2007</sub> /MWh	192,9	255,7	198,6	81,0	103,5	40,3	10,0
	Veränd. ggü. 2007	%	4,2	74,9	74,9	32,1	74,9	0,9	0,5
	Veränd. ggü. Std.	%	-2,7	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
ETS+	2007	€ <sub>2007</sub> /MWh	185,1	146,2	113,6	61,3	59,2	40,0	9,9
	2030	€ <sub>2007</sub> /MWh	197,3	258,8	201,0	81,0	104,7	40,2	9,9
	Veränd. ggü. 2007	%	6,6	77,0	77,0	32,1	77,0	0,5	-0,9
	Veränd. ggü. Std.	%	-0,5	1,3	1,3	0,2	1,3	-0,2	-1,3
CO <sub>2</sub> -Steuer	2007	€ <sub>2007</sub> /MWh	185,1	146,2	113,6	61,3	59,2	40,0	9,9
	2030	€ <sub>2007</sub> /MWh	196,9	255,8	198,7	80,9	103,5	40,2	10,0
	Veränd. ggü. 2007	%	6,4	74,9	74,9	32,0	74,9	0,6	0,2
	Veränd. ggü. Std.	%	-0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,2	-0,2

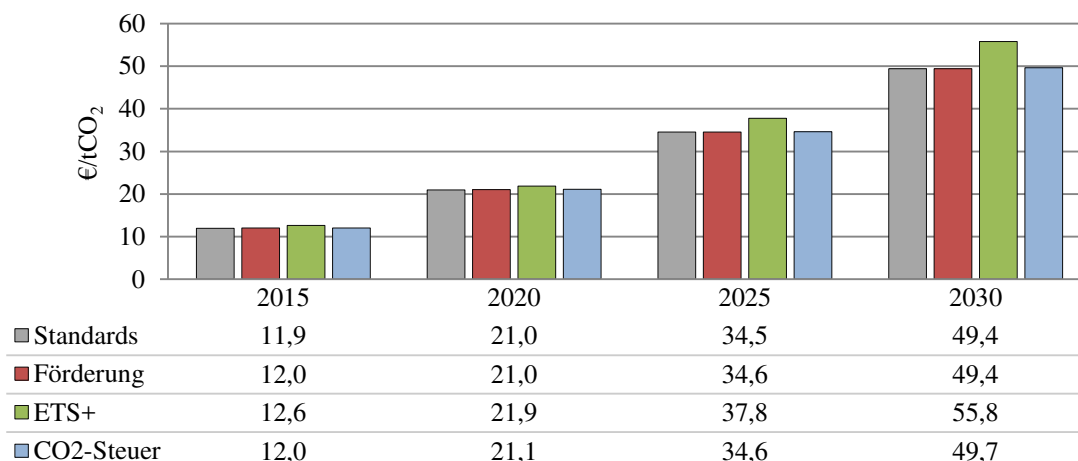
Demzufolge steigen die Preise der Mineralölprodukte (Benzin, Diesel, Heizöl) im Szenario „Standards“ modellendogen um 75 %, für Erdgas um 32 %, für Strom um 7 % und für Holz (Pellets) um knapp 1 %. Dies erklärt die relative Bevorzugung von Holz befeuerten sowie strombetriebenen Heizungstypen im Szenario „Standards“ sowie in vermindertem Ausmaß auch in den Szenarien „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“.<sup>251</sup> Dagegen sorgt die Aufnahme der Energienachfrage privater Haushalte in das EU-ETS dafür, dass die Mineralölpreise stärker ansteigen als in den anderen Szenarien (+77 %, vgl. Tabelle 4-7). Die Erklärung hierfür ist in einem relativen Anstieg der durchschnittlichen Grenzvermeidungskosten innerhalb des EU-ETS zu suchen. Das bedeutet, dass die Grenzvermeidungskosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte im Schnitt höher zu liegen scheinen als die der anderen Emittenten, das heißt die der Stromerzeugung und der energieintensiven Industrie. Der höhere Anstieg der Mineralölpreise bzw. geringere Rückgang des Strompreises bis zum Jahr 2030 in Deutschland im Szenario „ETS+“ im Vergleich zum Szenario „Standards“ legt den Schluss nahe, dass die Stromwirtschaft und energieintensive Industrie den erhöhten Emissionsminderungsdruck einpreisen, zumindest bis zu dem Grad, den der Marktwettbewerb erlaubt.

Der gestiegene Emissionsminderungsdruck im Szenario „ETS+“ im Vergleich zum Szenario „Standards“ ist auch an der Entwicklung der EU-ETS-Zertifikatspreise erkennbar. Abbildung

<sup>251</sup> Eine verstärkte Nachfrage nach bestimmten Gütern im Modell bringt, infolge der Markträumungsbedingungen, ceteris paribus auch relative Preisanstiege mit sich. Aufgrund der Simultanität bzw. Gleichzeitigkeit der Gleichgewichtszustände lässt sich anhand der Modellergebnisse nicht zweifelsfrei klären, ob relative Preisänderungen eine Nachfragereaktion ausgelöst haben oder umgekehrt. In der Regel ist es eine Kombination aus beiden Wirkungsrichtungen.

4-8 stellt die Entwicklung der EU-ETS-Zertifikatspreise im Zeitraum 2015 bis 2030 pro Szenario dar. Während die EU-ETS-Zertifikatspreise in den Szenarien „Standards“, „Förderung“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ im Jahr 2030 knapp 50 €<sub>2007</sub> pro Zertifikat bzw. pro t CO<sub>2</sub> betragen, liegt er im Szenario „ETS+“ mit knapp 56 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> um 12 % höher. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der EU-ETS-Zertifikatspreis vor dem Jahr 2025 unterhalb der im Szenario „CO<sub>2</sub>-Steuer“ implementierten CO<sub>2</sub>-Steuer von 30 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> liegt und anschließend darüber.

**Abbildung 4-8:** Entwicklung der EU-ETS-Zertifikatspreise im Zeitraum 2015 bis 2030 pro Szenario (in €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>)



Nachdem die einzelnen Auswirkungen der klimapolitischen Instrumente auf die Technologiewahl sowie die Energie- und CO<sub>2</sub>-Preise erläutert wurden, stellt sich die Frage, was sich zur eigentlichen Zielerreichung der betrachteten klimapolitischen Instrumente aussagen lässt. Dazu müssen die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte sowie der anderen Emittenten in Deutschland betrachtet werden. Tabelle 4-8 beschreibt die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland pro Szenario im Zeitraum 2007 bis 2030.<sup>252</sup> Im Szenario „Standards“ verringern sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 um 32 % und bis 2030 um 43 % (jeweils ggü. 1990). Dies liegt unterhalb der Energiewende-Zielmarken von -40 % bis 2020 und -55 % bis 2030 (vgl. Tabelle 2-4). In den anderen Szenarien fallen die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen geringer aus. Im Vergleich zum Szenario „Standards“ wird im Jahr 2030 in den Szenarien „Förderung“ und „ETS+“ 1,4 % mehr und im Szenario „CO<sub>2</sub>-Steuer“ 2,9 % mehr CO<sub>2</sub> emittiert.

<sup>252</sup> Diese Darstellung umfasst die gesamten Treibhausgasemissionen, nicht nur CO<sub>2</sub>. Da im Modell jedoch nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet werden, wurde für die Berechnung der gesamtdeutschen Treibhausgasemissionen der sich im Modell ergebende Entwicklungspfad mit dem Ausgangswert der gesamtdeutschen Treibhausgasemissionen multipliziert.

**Tabelle 4-8:** CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland pro Szenario im Zeitraum 2007 bis 2030

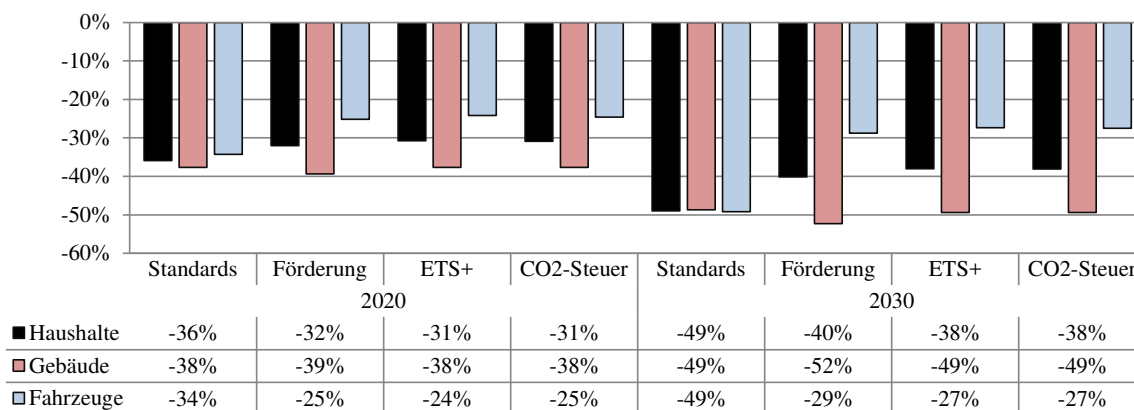
Szenario	Einheit	2007	2010	2015	2020	2025	2030
Standards	Mio. t CO <sub>2</sub> -äq	977	887	858	849	797	710
	% ggü. Standards*	-	-	-	-	-	-
	% ggü. 1990**	-22	-28,9	-31,3	-32,0	-36,1	-43,1
Förderung	Mio. t CO <sub>2</sub> -äq	977	888	861	857	807	719
	% ggü. Standards*	0	0,1	0,4	0,9	1,3	1,4
	% ggü. 1990**	-22	-28,9	-31,0	-31,4	-35,3	-42,4
ETS+	Mio. t CO <sub>2</sub> -äq	977	886	862	860	809	719
	% ggü. Standards*	0	-0,1	0,5	1,3	1,6	1,4
	% ggü. 1990**	-22	-29,0	-30,9	-31,1	-35,2	-42,4
CO <sub>2</sub> -Steuer	Mio. t CO <sub>2</sub> -äq	977	888	864	861	815	730
	% ggü. Standards*	0	0,1	0,7	1,4	2,3	2,9
	% ggü. 1990**	-22	-28,9	-30,8	-31,0	-34,7	-41,5

(\*) Relative Differenz gegenüber dem Szenario „Standards“ in %

(\*\*) Relative Differenz gegenüber dem Niveau von 1990

Für die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte gibt es keine explizite Zielvorgabe in Deutschland. Abbildung 4-9 stellt die relativen Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 im Vergleich zu 1990 dar. Verglichen mit dem gesamtdeutschen Schnitt gemäß Tabelle 4-8 ist im Szenario „Standards“ eine überdurchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion (-36 % in 2020 bzw. -49 % in 2030), in den anderen Szenarien eine unterdurchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion der privaten Haushalte zu verzeichnen (-31 bis -32 % in 2020 bzw. -38 bis -40 % in 2030). Dabei teilt sich die CO<sub>2</sub>-Emissionsverringerung im Szenario „Standards“ gleichmäßig auf den Fahrzeug- und Gebäudebereich auf. In den anderen Szenarien kommt es dagegen zu einer Verschiebung bzw. ungleichmäßigen CO<sub>2</sub>-Emissionsverringerung zwischen Fahrzeugen und Gebäuden. Während die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden annähernd gleich bleiben, werden sie im motorisierten Individualverkehr deutlich weniger reduziert. Dort betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen im Jahr 2030 rund -27 % bis -29 %. Dadurch fallen auch die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen der privaten Haushalte in einer Spannweite von -38 % bis -40 % geringer aus als im sektorübergreifenden, gesamtdeutschen Schnitt.

**Abbildung 4-9:** Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 im Vergleich zum Jahr 1990 (in %)



Für die umweltökonomische Beurteilung der klimapolitischen Instrumente hinsichtlich ihrer ökologischen Effektivität lässt sich aus Tabelle 4-8 und Abbildung 4-9 schlussfolgern, dass Standards im hier betrachteten, konkreten Szenarienvergleich das effektivste Instrument zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte in Deutschland darstellen oder, anders ausgedrückt, in der hier betrachteten Ausgestaltung die größten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen mit sich bringen.<sup>253</sup> Die anderen klimapolitischen Instrumente, das heißt Förderinstrumente, Erweiterung des EU-ETS und CO<sub>2</sub>-Steuern, verursachen geringere CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen der privaten Haushalte in Deutschland. Beim Szenario „ETS+“ muss jedoch berücksichtigt werden, dass die ökologische Effektivität einer Erweiterung des Emissionshandelssystems nicht aus sektoraler oder nationaler, sondern aus EU-weiter Perspektive erfolgt. Durch die Festlegung einer EU-weiten Emissionsobergrenze, und unter der Voraussetzung, dass diese auch eingehalten wird, ist die ökologische Treffsicherheit per Definition gegeben. Die hier erzeugten Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass im Falle eines erweiterten EU-ETS, die nötigen CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen nicht im Bereich der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland, sondern in anderen Sektoren oder Mitgliedsstaaten erfolgen. Wo diese stattfinden, und wie genau dieser Mechanismus funktioniert, wird gesondert in Teil 2 der modellgestützten Szenarioanalyse betrachtet (vgl. Abschnitt 4.2).

Die regulatorischen, klimapolitisch bedingten Eingriffe in das Wirtschaftssystem mittels unterschiedlicher Instrumente lösen eine Vielzahl von Effekten aus. Über die Kreislaufverflechtung werden simultan Preis-, Mengen- und Einkommenseffekte ausgelöst. Im Modell werden die entsprechenden Preis-, Mengen- und Einkommensvariablen in derjenigen Art und Weise an die veränderten Gegebenheiten (z. B. Einführung von Kaufprämien oder einer CO<sub>2</sub>-Steuer) angepasst, dass die Gleichgewichtsbedingungen (Nullgewinne, Markträumung und Budgetrestriktion) simultan gelten (vgl. Abschnitt 3.1.2).

<sup>253</sup> Dies gilt jedoch nur für die hier getroffenen Rahmenannahmen bzw. die hier gewählte Parametrisierung der vier Szenarien. Eine andere Parametrisierung könnte zu einer andersartigen Beurteilung führen.

Die zentrale Frage, die sich bei der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung stellt, ist die, zu welchen Kosten die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen der untersuchten klimapolitischen Instrumente erreicht werden. Bei den unterschiedlichen Instrumenten sind schließlich unterschiedliche Mechanismen am Werk. Bei Standards werden die Ziele per Zwang erreicht, indem bestimmte Verbrauchswerte direkt beim Kauf neuer Fahrzeug- und Gebäudetechnologien einzuhalten sind. Dies ist der ordnungsrechtliche Ansatz. Bei den anderen drei betrachteten Instrumenten werden dagegen marktwirtschaftliche Anreize entfaltet. Während Förderinstrumente den Kauf verbrauchsarmer Technologien belohnen, setzen der erweiterte Emissionshandel sowie die CO<sub>2</sub>-Steuer an der eigentlichen Energienutzung bzw. dem eigentlichen Verbrauch der Energieträger an. Bei rational entscheidenden Wirtschaftssubjekten löst dies entsprechende Kaufanreize aus.

Der Wert der volkswirtschaftlichen Leistung eines Landes in einer Periode lässt sich über das Bruttoinlandsprodukt (BIP) messen. Hierbei handelt es sich um die Summe aller privaten und staatlichen Konsumausgaben, der Investitionen sowie der Nettoexporte.<sup>254</sup> Die Veränderung des BIP von einer Periode zur nächsten wird in der VGR als Wirtschaftswachstum ausgewiesen. Das jeweilige Ausmaß des BIP in den vier Szenarien gibt Aufschluss darüber, wie viele Waren und Dienstleistungen in einem Land in einer Periode produziert bzw. konsumiert werden. Je höher es ausfällt, desto geringer sind die mit dem jeweiligen klimapolitischen Instrument verbundenen volkswirtschaftlichen Kosten.

Tabelle 4-9 beschreibt die Entwicklung des realen BIP in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 im Szenariovergleich. Insgesamt steigt es in allen vier Szenarien kontinuierlich an, von 2,8 Bio. €<sub>2007</sub> im Basisjahr 2007 auf 3,2 bis 3,4 Bio. €<sub>2007</sub> im Jahr 2030. Dabei fällt das BIP im Szenario „Standards“ mit 3,2 Bio. €<sub>2007</sub> im Jahr 2030 am geringsten, in den Szenarien „ETS+“ und „CO<sub>2</sub>-Steuer“ mit 3,4 Bio. €<sub>2007</sub> im Jahr 2030 am höchsten aus. Im Szenario „Förderung“ beträgt es 3,3 Bio. €<sub>2007</sub> in 2030.

Daraus lässt sich folgern, dass eine Erweiterung des EU-ETS um die Energienachfrage privater Haushalte oder die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive zu einem höheren Einkommen oder geringeren Kosten führen, als die betrachteten Förderinstrumente oder Standards. Letztere schneiden im BIP-Vergleich am schlechtesten ab.

---

<sup>254</sup> Vgl. Destatis, 2015e. Neben der Verwendungsrechnung lässt sich das BIP auch über die Entstehungsseite und Verteilungsseite definieren.

**Tabelle 4-9:** Bruttoinlandsprodukt (real) in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 im Szenariovergleich<sup>255</sup>

Szenario	Einheit	2007	2010	2015	2020	2025	2030
Standards	Mrd. € <sub>2007</sub>	2.839	2.911	3.017	3.117	3.191	3.240
	% ggü. Standards *	-	-	-	-	-	-
Förderung	Mrd. € <sub>2007</sub>	2.839	2.914	3.031	3.155	3.256	3.314
	% ggü. Standards *	0,0	0,1	0,5	1,2	2,0	2,3
ETS+	Mrd. € <sub>2007</sub>	2.839	2.914	3.041	3.181	3.304	3.394
	% ggü. Standards *	0,0	0,1	0,8	2,0	3,5	4,7
CO <sub>2</sub> -Steuer	Mrd. € <sub>2007</sub>	2.839	2.913	3.041	3.180	3.305	3.397
	% ggü. Standards *	0,0	0,1	0,8	2,0	3,6	4,8

(\*) Relative Differenz gegenüber dem Szenario „Standards“ in %

Doch was lässt sich daraus für die Kostenwirksamkeit dieser klimapolitischen Instrumente aussagen? Schließlich führt eine CO<sub>2</sub>-Steuer zu dem im Vergleich höchsten BIP, aber auch zu den höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur geringsten ökologische Effektivität. Um die Kostenwirksamkeit der hier betrachteten klimapolitischen Instrumente beurteilen zu können, müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen daher mit dem jeweils erzielten BIP in Relation gesetzt werden.

Teilt man die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Szenarien einer Periode durch das jeweils erzielte BIP erhält man die CO<sub>2</sub>-Intensität des BIP. Dieser Indikator gibt an, wie viele Einheiten CO<sub>2</sub> (z. B. Gramm) zur Erwirtschaftung einer BIP-Einheit (€) eingesetzt werden. Ihr Kehrwert kann als CO<sub>2</sub>-Produktivität bezeichnet werden und gibt an, wie viele BIP-Einheiten (€) mit einer Einheit CO<sub>2</sub> (z. B. Tonne) erwirtschaftet werden können. Je höher die CO<sub>2</sub>-Produktivität und je geringer die CO<sub>2</sub>-Intensität je Szenario ausfällt, desto höher kann die Kostenwirksamkeit des jeweiligen klimapolitischen Instruments eingestuft werden. Die Entwicklung beider Indikatoren im hier betrachteten Szenarienvergleich ist vollständig in Tabelle 4-10 aufgelistet. Im Zeitraum 2007 bis 2030 sinkt die CO<sub>2</sub>-Intensität des BIP von 290 g CO<sub>2</sub>/€<sub>2007</sub> BIP im Jahr 2007 auf 179 bis 185 g CO<sub>2</sub>/€<sub>2007</sub> BIP im Jahr 2030. Analog steigt die CO<sub>2</sub>-Produktivität von 3,4 Tsd. €<sub>2007</sub> BIP/t CO<sub>2</sub> im Jahr 2007 auf 5,4 bis 5,6 Tsd. €<sub>2007</sub> BIP/t CO<sub>2</sub> im Jahr 2030.

<sup>255</sup> Das hier angegebene BIP ist nicht identisch mit dem amtlich berichteten BIP, das gemäß Destatis, 2015a im Jahr 2007 insgesamt 2.513 Mrd. €<sub>2007</sub> betrug. Der Grund dafür ist, dass aufgrund der expliziten Berücksichtigung des Fahrzeug- und Gebäudebestands im Modell die impliziten Mietkosten für bestehende Fahrzeuge und Gebäude als Produktionsfaktoren zur Herstellung der privaten Energiedienstleistungen mit bewertet werden, was in der amtlichen VGR nicht geschieht.

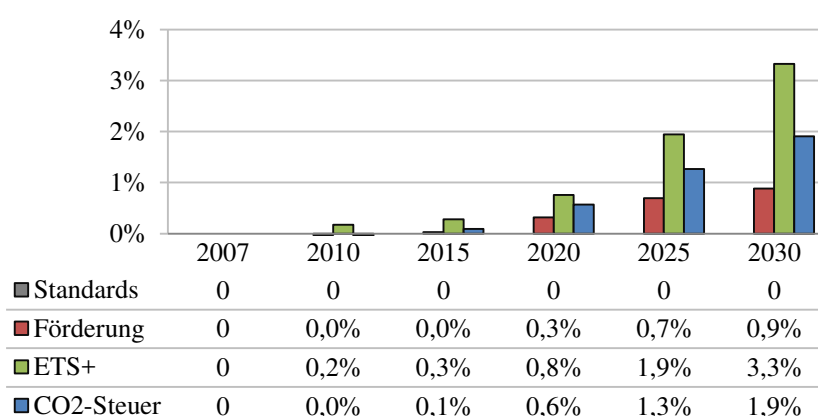


**Tabelle 4-10:** CO<sub>2</sub>-Intensität und -Produktivität in Deutschland pro Szenario im Zeitraum 2007 bis 2030

Szenario	Indikator	Einheit	2007	2010	2015	2020	2025	2030
Standards	CO <sub>2</sub> -Intensität	g CO <sub>2</sub> / € <sub>2007</sub> BIP	290	257	240	230	211	185
		% ggü. Standards*	-	-	-	-	-	-
	CO <sub>2</sub> -Produktivität	€ <sub>2007</sub> BIP / t CO <sub>2</sub>	3.444	3.888	4.168	4.348	4.743	5.409
		% ggü. Standards*	-	-	-	-	-	-
Förderung	CO <sub>2</sub> -Intensität	g CO <sub>2</sub> / € <sub>2007</sub> BIP	290	257	240	229	209	183
		% ggü. Standards*	0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9
	CO <sub>2</sub> -Produktivität	€ <sub>2007</sub> BIP / t CO <sub>2</sub>	3.444	3.887	4.169	4.362	4.776	5.457
		% ggü. Standards*	0	0,0	0,0	0,3	0,7	0,9
ETS+	CO <sub>2</sub> -Intensität	g CO <sub>2</sub> / € <sub>2007</sub> BIP	290	257	239	228	207	179
		% ggü. Standards*	0	-0,2	-0,3	-0,8	-1,9	-3,2
	CO <sub>2</sub> -Produktivität	€ <sub>2007</sub> BIP / t CO <sub>2</sub>	3.444	3.895	4.179	4.381	4.836	5.590
		% ggü. Standards*	0	0,2	0,3	0,8	1,9	3,3
CO <sub>2</sub> -Steuer	CO <sub>2</sub> -Intensität	g CO <sub>2</sub> / € <sub>2007</sub> BIP	290	257	240	229	208	181
		% ggü. Standards*	0	0,0	-0,1	-0,6	-1,3	-1,9
	CO <sub>2</sub> -Produktivität	€ <sub>2007</sub> BIP / t CO <sub>2</sub>	3.444	3.887	4.171	4.373	4.803	5.513
		% ggü. Standards*	0	0,0	0,1	0,6	1,3	1,9

(\*) Relative Differenz ggü. dem Szenario „Standards“

Zum besseren Vergleich der Kostenwirksamkeit der unterschiedlichen Szenarien veranschaulicht Abbildung 4-10 die Entwicklung der relativen Differenz der CO<sub>2</sub>-Produktivität zwischen dem Szenario „Standards“ und den anderen Szenarien grafisch. Demnach fällt die CO<sub>2</sub>-Produktivität im Szenario „Standards“ geringer aus als in den anderen Szenarien. Am höchsten ist sie im Falle einer Erweiterung des EU-ETS (+3,3 % im Jahr 2030, verglichen mit dem Szenario „Standards“), gefolgt von der Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer in Höhe von 30 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> (+2 %) und den betrachteten Förderinstrumenten (+1 %). Demnach ist die Kostenwirksamkeit einer EU-ETS-Erweiterung im Falle des hier betrachteten Szenarienvergleichs am höchsten, so dass dieses Instrument unter den gewählten Rahmenannahmen als das kosteneffiziente Instrument identifiziert werden kann.

**Abbildung 4-10:** CO<sub>2</sub>-Produktivität in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 in den Szenarien im Vergleich zum Szenario „Standards“ (in %)

### 4.1.3 Zwischenfazit

Im ersten Teil der modellgestützten Szenarioanalyse wurde analysiert, welche volkswirtschaftlichen Auswirkungen verschiedene klimapolitische Instrumente zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte nach sich ziehen. Dazu zählen die Auswirkungen auf die Technologiewahl privater Haushalte zur Erzeugung der Energiedienstleistungen „Raumwärme und Warmwasser“ sowie „motorisierter Individualverkehr“, die Auswirkungen auf die Struktur des Fahrzeug- und Gebäudebestandes, auf die Energieträgerpreise, die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte sowie nicht zuletzt die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen, gemessen am BIP und der CO<sub>2</sub>-Produktivität.

Die Ergebnisse zeigen, dass Standards zwar im Hinblick auf die erreichten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen effektiv, aber ökonomisch nicht effizient sind, da ihr ordnungsrechtlicher Ansatz die freie Technologiewahl der privaten Haushalte mit vergleichsweise hohen volkswirtschaftlichen Kosten einschränkt. Die absolute Höhe von verbrauchsarmen Neuanschaffungen sinkt dadurch kontinuierlich, wie beispielsweise an der niedrigeren Sanierungsrate zu erkennen ist (0,6 % im Jahr 2030 im Vergleich zu 0,9 % im Jahr 2007). Sowohl die absolute Höhe des realen BIP als auch die CO<sub>2</sub>-Produktivität als Indikator für Kostenwirksamkeit fallen über den Zeitraum 2007 bis 2030 schließlich geringer aus als bei den anderen klimapolitischen Instrumenten.

Die aktuell implementierten bzw. diskutierten Förderinstrumente zeigen sich vor allem im Gebäudebereich als sehr effektiv, wo sie ein hohes Maß an zusätzlichen, energiesparenden Sanierungen und Passivhaus-Neubauten durch entsprechende Kaufanreize erreichen (z. B. KfW-Kredite). Dagegen sind die analysierten Kaufprämien für Elektrofahrzeuge offenbar zu niedrig, um deutliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen im motorisierten Individualverkehr in Deutschland anzureizen. Eine dämpfende Wirkung auf verbrauchsarme Neuanschaffungen sowohl im Fahrzeug- als auch im Gebäudebereich entfaltet der im Modell berücksichtigte geschlossene Einkommenskreislauf. Er führt dazu, dass gewährte Kaufprämien aus dem laufenden Einkommen des repräsentativen Verbrauchers entnommen werden müssen, welches dann nicht mehr für andere, möglicherweise „nützlichere“ Konsumausgaben zur Verfügung steht. BIP und CO<sub>2</sub>-Produktivität fallen bei den hier betrachteten Fördersätzen dennoch höher aus als bei den betrachteten Standards.

Die Wirkungen der marktbasierenden Instrumente, das heißt die Erweiterung des EU-ETS um die CO<sub>2</sub>-Emissionen privater Haushalte in Deutschland sowie die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer im deutschen Haushaltsbereich, beeinträchtigen nur indirekt die Neuanschaffung CO<sub>2</sub>-armer Technologien. Ihre primäre Wirkung entfalten sie bei der Energienutzung privater Haushalte zum Zwecke der Befriedigung der Energiedienstleistungen „Raumwärme und Warmwasser“ und „motorisierter Individualverkehr“. Die Technologiewahl der privaten Haushalte aber wird durch die rationale Entscheidung, die antizipierten Kosten der Energienutzung bereits bei der Anschaffung neuer Technologien zu minimieren, trotzdem indirekt

beeinflusst. Die Kostenwirksamkeit der marktbasieren Instrumente ist deutlich höher als bei Standards oder Förderinstrumenten. Am höchsten fällt sie bei der EU-ETS-Erweiterung aus. Anhand der quantitativen Ergebnisse lässt sich damit die in der Literatur vielfach diskutierte theoretische Kosteneffizienz des Emissionshandels untermauern. Im Gegensatz zur hier betrachteten CO<sub>2</sub>-Steuer, die nicht EU-weit, sondern nur in der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland implementiert ist, bringt er zusätzlich eine hohe ökologische Treffsicherheit mit sich, da eine bestimmte Emissionsmenge per Definition eingehalten wird und somit, im Gegensatz zur CO<sub>2</sub>-Steuer, kein Mengenrisiko besteht.

## **4.2 Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte in einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel**

Im zweiten Teil der modellgestützten Analyse soll die Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland in einen breiteren, europäischen Kontext eingeordnet werden. Hier wird der Frage nachgegangen, wie eine kostenoptimale Aufteilung der für die Erreichung der klimapolitischen Ziele notwendigen Emissionsreduktionen zwischen den unterschiedlichen Ländern und Wirtschaftsbereichen innerhalb der EU aussieht. Dazu wird ein EU-weites alle Sektoren umfassendes Emissionshandelssystem implementiert und mit der Situation nationaler Zielvorgaben verglichen. Dadurch soll die Bedeutung unterschiedlicher Sektoren, insbesondere die Energienachfrage privater Haushalte, für die EU-Klimapolitik herausgearbeitet werden.

### **4.2.1 Szenariodefinition und Modellierung**

Insgesamt werden zwei Szenarien unterschieden, die in Tabelle 4-11 aufgeführt sind. Zum einen wird ein Szenario „Nat-40“ entworfen, in dem das gegenwärtige EU-ETS bis zum Jahr 2030 fortgeführt wird und parallel dazu länderspezifische Emissionsreduktionsvorgaben für die Nicht-ETS-Sektoren gemacht werden. Damit soll die Erreichung der EU-weiten Emissionsreduktionsziele bis 2030 sichergestellt werden. Im Vergleich dazu wird ein Szenario „EU-40“ entworfen, in dem das EU-ETS auch auf die Nicht-ETS-Sektoren ausgeweitet wird. Die Sicherstellung der Zielerreichung bis 2030 erfolgt in diesem Fall über ein sektorübergreifendes, EU-weites Emissionshandelssystem, das eine kosteneffiziente Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen impliziert.

Außer dem jeweils unterschiedlichen Emissionshandelsregime werden in beiden Szenarien keine weiteren klimapolitischen Instrumente betrachtet.<sup>256</sup> Die dynamischen Rahmenannahmen hinsichtlich der Entwicklung des Erwerbspotenzials, der Energieeffizienz und der totalen Faktorproduktivität sind identisch mit den Rahmenannahmen des ersten Teils der modellgestützten Analyse (vgl. Abschnitt 3.3).

---

<sup>256</sup> Außerhalb der EU werden keine klimapolitischen Vorgaben gemacht. Diese Annahme führt dazu, dass die klimapolitischen Kosten in der EU im Modell tendenziell überschätzt werden. Dadurch treten die zugrundeliegenden Modellmechanismen aber stärker zum Vorschein.

**Tabelle 4-11:** Szenariodefinition zur Analyse der Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte in einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel

Nr.	Szenario	Definition des Klimaschutzregimes
1	Nat-40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortführung des EU-ETS bis 2030 gemäß Pfad in Tabelle 4-2</li> <li>• National differenzierte Emissionsreduktionen für die Nicht-ETS-Sektoren gemäß „EU Effort Sharing Decision“ (vgl. Tabelle 4-13)</li> <li>• Einhaltung der EU-weiten Emissionsreduktionsziele bis 2030</li> </ul>
2	EU-40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sektorübergreifender EU-Emissionshandel (ETS- und Nicht-ETS-Sektoren)</li> <li>• Einhaltung der EU-weiten Emissionsreduktionsziele bis 2030</li> </ul>

Zur Verdeutlichung der in Tabelle 4-11 aufgeführten Szenariodefinition enthält Tabelle 4-12 eine Übersicht über die in diesen beiden Szenarien geltenden EU-weiten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionspfade vor dem Hintergrund der einzuhaltenden klimapolitischen EU-Ziele bis 2020 und 2030 jeweils ggü. 2005 und 1990. Der Emissionsreduktionspfad für die Fortführung des gegenwärtigen EU-ETS im Szenario „Nat-40“ entspricht dem im ersten Teil der modellgestützten Analyse unterstellten Pfad (vgl. Tabelle 4-2 oben). Bis 2030 werden die Emissionsberechtigungen im EU-ETS so weit reduziert, dass sich eine Emissionsreduktion in Höhe von -43 % ggü. 2005 einstellt. Für die Nicht-ETS-Sektoren wird im Szenario „Nat-40“ eine Emissionsreduktion angenommen, die sich gemäß „EU Effort Sharing Decision“ auf -10 % im Jahr 2020 ggü. 2005 beläuft.<sup>257</sup> Um das EU-weite, alle Sektoren umfassende Emissionsreduktionsziel von -40 % ggü. 1990 zu erreichen, müssen, nach Berechnungen von Verdonk & Hof (2013), die Emissionen der Nicht-ETS-Sektoren bis zum Jahr 2030 um ca. 30 % ggü. 2005 zurückgehen.

Im Hinblick auf die Modellrechnungen ist zu berücksichtigen, dass die Ziele für die gesamte EU in Tabelle 4-12 (-20 % bis 2020 und -40 % bis 2030 jeweils ggü. 1990) nur als indikative Ziele behandelt werden können, da nicht gleichzeitig Ziele für die beiden Teilsektoren „ETS“ und „Nicht-ETS“ sowie für das Gesamtsystem vorgegeben werden können. Die Emissionen des Gesamtsystems ergeben sich schließlich aus den Emissionen der Teilsektoren. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die Teilziele von Seiten der EU so formuliert wurden, dass sie mit dem Gesamtziel kohärent sind. Daher wird im Szenario „Nat-40“ kein Ziel für das Gesamtsystem, sondern lediglich die Teilziele für die ETS- und Nicht-ETS-Sektoren vorgegeben. Der in diesem Szenario berechnete Emissionsreduktionspfad wird anschließend als Emissionsreduktionsvorgabe für den EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel im Szenario „EU-40“ verwendet (vgl. Ergebnisse dazu in Tabelle 4-13 unten). Dies soll eine

<sup>257</sup> Vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2009b, Anhang II.

exakte Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien im Hinblick auf ihre ökologische Effektivität herstellen.<sup>258</sup>

**Tabelle 4-12:** EU-weite CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionspfade in den ETS- und Nicht-ETS-Sektoren in den Szenarien „EU-40“ und „Nat-40“ inklusive der einzuhaltenden Ziele bis 2020 und 2030 jeweils ggü. 2005 und 1990

Sz.	Sektor	Index (2005 = 100)					Diff. ggü. 2005		Diff. ggü. 1990	
		Historie			Ziel		Ziel		Ziel	
		1990	2005	2007	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Nat-40	ETS	-	100	99	79	57	-21 %	-43 %	-	-
	Nicht-ETS	-	100	99	90	70	-10 %	-30 %	-	-
	Gesamt	109	100	99	87	65	-13 %	-35 %	-20 %	-40 %
EU-40	Gesamt	109	100	99	87	65	-13 %	-35 %	-20 %	-40 %

Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf Verdonk & Hof, 2013 und UNFCCC, 2014.

Die „EU Effort Sharing Decision“ beinhaltet aber nicht nur eine Zielformulierung für die Nicht-ETS-Sektoren der ganzen EU (-10 % bis 2020 ggü. 2005), sondern auch länderspezifische Zielvorgaben, die zum Teil deutlich voneinander abweichen. So reicht die Spanne von -20 % in Dänemark, Luxemburg und Irland bis +20 % in Bulgarien.<sup>259</sup> Deutschland hat sich zu einem Emissionsreduktionsziel von -14 % verpflichtet. Verdonk & Hof (2013) haben darauf basierend länderspezifische Emissionsreduktionspfade berechnet, die in Tabelle 4-13 für die im Modell betrachteten Länder und Ländergruppen aggregiert wurden. Diese werden für die Modellrechnungen im Szenario „Nat-40“ vorgegeben, um unterschiedliche wirtschaftliche Rahmenbedingungen innerhalb der EU zu berücksichtigen.

In beiden Szenarien wird jedes Land in jeder Periode mit einer gewissen Zertifikate-Menge ausgestattet. Innerhalb eines Landes erfolgt die Allokation der Zertifikate-Ausstattung auf die einzelnen Emittenten dagegen nicht kostenlos. Stattdessen muss jeder Emittent für jede geplante Emissionseinheit (t CO<sub>2</sub>) ein Zertifikat kaufen. Die Einnahmen aus dem Zertifikate-Kauf fließen anschließend in Form von Pro-Kopf-Transfers (*lump-sum*) in das Einkommen des repräsentativen Verbrauchers des betrachteten Landes zurück, wo sie ihm für Konsumausgaben zur Verfügung stehen. Je nach Emissionshandelsregime können die Zertifikate eines Landes auch an Emittenten anderer Länder verkauft werden bzw. dort Zertifikate gekauft werden. Darüber hinaus muss jedes Zertifikat in derselben Periode gekauft werden, in der die entsprechende Emissionsaktivität stattfindet. Eine Zertifikate-Vorhaltung ist nicht möglich.

<sup>258</sup> Szenario „Nat-40“ kann demnach als exploratives, Szenario „EU-40“ dagegen als normatives Szenario aufgefasst werden (vgl. Abschnitt 4.1.1 sowie Kosow & Gaßner, 2008 für eine ausführliche Erörterung verschiedener Szenariotechniken).

<sup>259</sup> Vgl. EU-Parl. & EU-Rat, 2009b, Anhang II.

**Tabelle 4-13:** National differenzierte CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionspfade für die Nicht-ETS-Sektoren der einzelnen Länder bzw. Ländergruppen bis 2030 im Rahmen der „EU Effort Sharing Decision“

	<i>Index (2005 = 100)</i>						<i>Diff. ggü. 2005</i>	
	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2020	2030
Deutschland	100	97	91	86	75	64	-14 %	-36 %
Frankreich	100	97	91	86	75	65	-14 %	-35 %
EU-Nord	100	96	90	85	74	63	-15 %	-37 %
EU-Süd	100	98	94	90	82	74	-10 %	-26 %
EU-Ost	100	103	108	114	103	93	14 %	-7 %
EU-28	100	98	94	91	81	70	-10 %	-30 %

Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf Verdonk & Hof, 2013 und UNFCCC, 2014.

#### 4.2.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der modellgestützten Szenarioanalyse dargestellt. Zunächst wird der im Szenario „Nat-40“ resultierende und daraufhin der im Szenario „EU-40“ vorzugebende EU-weite Emissionsreduktionspfad berechnet. In Tabelle 4-14 ist er zusammen mit den EU-Zielen dargestellt. Anhand der dargestellten Ergebnisse ist erkennbar, dass die EU-Ziele durch die Vorgabe der Teilziele für die Sektoren „ETS“ und „Nicht-ETS“ im Szenario „Nat-40“ übererfüllt werden. Im Vergleich zum Jahr 1990 verringern sich die Emissionen um -22 % im Jahr 2020 (Ziel: -20 %) und um -42 % im Jahr 2030 (Ziel: -40 %).<sup>260</sup>

**Tabelle 4-14:** Entwicklung der im Modell berechneten EU-weiten Emissionsreduktionen in beiden Szenarien im Zeitraum 2015 bis 2030 und im Vergleich zu den EU-Zielen

	<i>Index (2005 = 100)</i>							<i>Diff. ggü. 2005</i>		<i>Diff. ggü. 1990</i>	
	<i>Historie</i>			<i>Modellergebnis</i>				2020	2030	2020	2030
	1990	2005	2010	2015	2020	2025	2030				
„Nat-40“	109	100	92	88	84	74	63	-16 %	-37 %	-22 %	-42 %
„EU-40“	109	100	92	88	84	74	63	-16 %	-37 %	-22 %	-42 %
	EU-Ziele:							-13 %	-35 %	-20 %	-40 %

Die Übereinstimmung des EU-weiten, sektorübergreifenden Emissionsreduktionspfades in beiden Szenarien ermöglicht es, das Zustandekommen dieses Pfades in Bezug auf die jeweiligen Beiträge der unterschiedlichen Wirtschaftsbereiche der gesamten EU-Volkswirtschaft zwischen den beiden Szenarien zu vergleichen und so einen Eindruck über die Kostenwirksamkeit der beiden klimapolitischen Regimes zu gewinnen. Daraus lassen sich Rückschlüsse

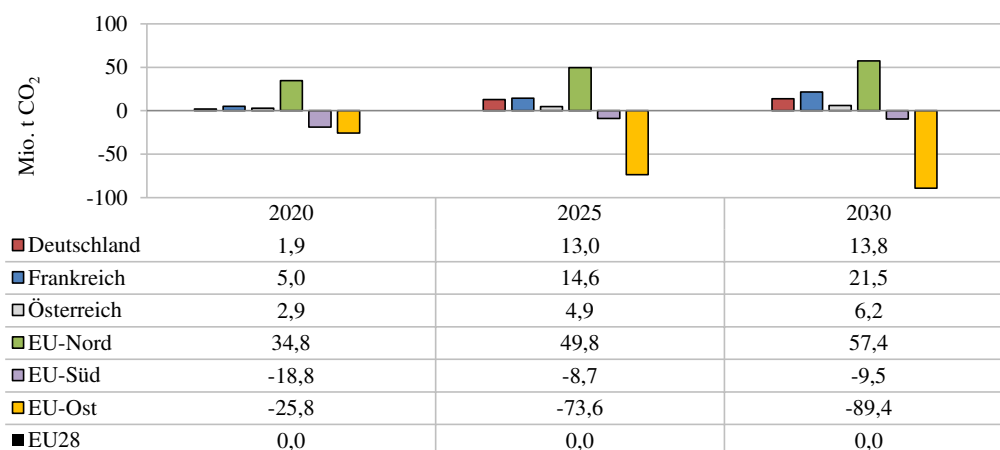
<sup>260</sup> Die Zielformulierungen der EU sowie die Berechnungen von Verdonk & Hof, 2013 basieren auf jeweils eigenen Modellansätzen, die offenbar unterschiedliche Ergebnisse erzeugen. Die Gründe dafür liegen in modellspezifischen Systemgrenzen, der methodischen Charakteristika, der unterstellten Datengrundlage und den dynamischen Annahmen.

bezüglich der Bedeutung einzelner Teilssektoren, wie der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland, ziehen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellrechnungen in Bezug auf die Veränderungen der sektoralen ökonomischen Aktivitäten, der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, der gesamtwirtschaftlichen Produktion und der Veränderungen des relativen Preisgefüges von Gütern und Faktoren präsentiert.

Abbildung 4-11 verdeutlicht die Wirkung des Emissionshandels auf aggregierter Ebene anhand der Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den einzelnen EU-Mitgliedsstaaten im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Zeitverlauf bis 2030 (in Mio. t CO<sub>2</sub>). Während es in der nördlichen EU infolge des sektorübergreifenden Emissionshandels zu einer deutlichen Emissionsausweitung im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ kommt (+57 Mio. t CO<sub>2</sub> bzw. +9 %), gehen die Emissionen in der östlichen EU im Szenario „EU-40“ stärker zurück als im Szenario „Nat-40“ (-89 Mio. t CO<sub>2</sub> bzw. -24 %). In der restlichen EU fallen die Änderungen geringer aus, wobei diese in Deutschland, Frankreich und Österreich ein positives, in der südlichen EU ein negatives Vorzeichen aufweisen. Die zusätzlichen Emissionen in Deutschland im Jahr 2030 in Höhe von 13,8 Mio. t CO<sub>2</sub> machen knapp 3 % des entsprechenden Werts des Szenarios „Nat-40“ aus.<sup>261</sup>

**Abbildung 4-11:** Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der EU im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in Mio. t CO<sub>2</sub>)



Die Emissionsverschiebung innerhalb der EU lässt sich größtenteils durch die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise erklären, die wiederum die Knappheit des Produktionsfaktors „CO<sub>2</sub>-Zertifikate“ widerspiegeln. Aufgrund des Annahmegerüsts des Modells der vollständigen Konkurrenz entsprechen die CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise im Modell den jeweiligen Grenzvermeidungskosten. Ein Anstieg der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise im Zeitverlauf bedeutet, dass die Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Zertifikaten das Angebot in zunehmendem Maße übersteigt. Das Angebot an CO<sub>2</sub>-Zertifikaten wird pro Land und Periode im Rahmen der klimapolitischen Regulierung modellexogen vorgegeben. Die Nachfrage nach bzw. der Bedarf an CO<sub>2</sub>-Zertifikaten

<sup>261</sup> Vgl. auch Tabelle A-19 im Anhang für eine detailliertere Übersicht.

pro Land und Periode wird zum einen modellendogen durch die Entwicklung der Produktionsaktivitäten und des Konsums sowie modellexogen durch die Vorgabe der allgemeinen Wachstumstrends, insbesondere der Entwicklung der Energieeffizienz, bestimmt (vgl. Tabelle 3-8). Da sich Angebot und Nachfrage pro Land unterschiedlich entwickeln, kommt es in jedem Land und Sektor zu einer unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Kostenbelastung. Während es im Szenario „EU-40“ einen einzigen EU-weiten CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis gibt, existieren im Szenario „Nat-40“ mehrere Preise: ein EU-weiter CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis innerhalb des EU-ETS sowie ein länderspezifischer CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis für die jeweiligen Nicht-ETS-Sektoren.

Die Entwicklung der szenariospezifischen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise in den einzelnen Teilsektoren und Ländern bzw. Ländergruppen im Zeitraum 2020 bis 2030 ist in Tabelle 4-15 dargestellt. Im Szenario „Nat-40“ steigt der EU-weite CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis des EU-ETS im Zeitraum 2020 bis 2030 von 9 auf 23 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>. Bei einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel im Szenario „EU-40“ steigt der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis im selben Zeitraum dagegen von 8 auf 34 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Nicht-ETS-Sektoren im Durchschnitt höhere Grenzvermeidungskosten aufweisen als die ETS-Sektoren und dadurch die durchschnittlichen Grenzvermeidungskosten eines sektorübergreifenden Emissionshandels höher ausfallen als der Emissionshandel im Rahmen des gegenwärtigen EU-ETS, der lediglich auf Stromerzeugung und energieintensive Industrie begrenzt ist. Die Substitutionsmöglichkeiten fossiler Brennstoffe durch andere Energieträger sind in den ETS-Sektoren offenbar höher, sprich kostengünstiger, als in den Nicht-ETS-Sektoren.

**Tabelle 4-15:** Entwicklung der szenariospezifischen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise in den einzelnen Teilsektoren und Ländern im Zeitraum 2020 bis 2030 (in €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>)

Szenario	Sektor	Modellregion	Einheit	2020	2025	2030
„Nat-40“	Nicht-ETS	Deutschland	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	23	133	310
		Frankreich	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	28	95	169
		Österreich	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	51	142	249
		EU-Nord	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	50	126	213
		EU-Süd	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	9	60	105
		EU-Ost	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	0	2	18
	ETS	EU-28	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	8,8	15,1	23,2
„EU-40“	Sektorübergreifend	EU-28	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	7,7	15,5	33,6

In den Nicht-ETS-Sektoren bildet sich im Szenario „Nat-40“ pro Modellregion ein eigenständiger CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis, da in den Nicht-ETS-Sektoren kein Handel zwischen den Modellregionen zugelassen ist. Es fällt auf, dass der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis in der östlichen EU im Jahr 2030 mit 18 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> unterhalb des EU-ETS-Preises liegt. Dies liegt zum einen an der „EU Effort Sharing Decision“, die Osteuropa bis 2020 einen Anstieg der Nicht-ETS-Emissionen und damit des CO<sub>2</sub>-Zertifikatsangebots gewährt (vgl. Tabelle 4-13). Zum anderen implizieren die vermuteten CO<sub>2</sub>-Emissionsvermeidungspotentiale in Osteuropa ein im



europäischen Vergleich überdurchschnittliches Energieeffizienzwachstum (vgl. Tabelle 3-8). Im Szenario „EU-40“ sieht sich die östliche EU einem höherem CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis ausgesetzt als im Szenario „Nat-40“. Dadurch ist es aus Gründen der Kostenminimierung bzw. Wohlfahrtsmaximierung für die östliche EU vorteilhaft, auf einen gewissen Teil der geplanten Emissionsaktivitäten zu verzichten und die dadurch nicht benötigten Zertifikate an andere EU-Länder zu verkaufen.<sup>262</sup>

Auf der anderen Seite treten in den Modellregionen Deutschland, Frankreich, Österreich und EU-Nord deutlich höhere Grenzvermeidungskosten bzw. CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise in den Nicht-ETS-Sektoren zu Tage. Im Jahr 2030 betragen sie zwischen 169 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> in Frankreich und 310 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> in Deutschland. Dadurch haben diese Länder den Anreiz, die Kosten der Emissionsvermeidung zu sparen und stattdessen über ihre Allokation hinausgehende zusätzliche Zertifikate aus anderen EU-Ländern zu erwerben, um ihre Emissionsaktivitäten steigern zu können. In der südlichen EU ist das Kalkül ähnlich dem der östlichen EU, nur in abgeschwächter Form. Hier liegt der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis der Nicht-ETS-Sektoren im Szenario „Nat-40“ zwar nicht unterhalb des EU-ETS-Preises. Allerdings scheint der durch die Einführung eines sektorübergreifenden Emissionshandels bedingte Kostenvorteil in den anderen EU-Ländern (außer EU-Ost) den Kostenvorteil der EU-Süd zu kompensieren, wodurch im Szenario „EU-40“ in der EU-Süd letztlich eine Emissionsreduktion im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ hervorgerufen wird.<sup>263</sup>

Die beiden Szenarien bewirken aber nicht nur kostenbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionsverschiebungen zwischen den EU-Mitgliedsstaaten, sondern auch zwischen den Produktionssektoren und dem Konsum innerhalb der EU-Mitgliedsstaaten, inklusive der Energienachfrage privater Haushalte. Abbildung 4-12 stellt die sektoralen Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 dar (in Mio. t CO<sub>2</sub>). Die gesamte Emissionsausweitung im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ in Deutschland in Höhe von knapp 14 Mio. t CO<sub>2</sub> ist dabei hauptsächlich auf zusätzliche Emissionsaktivitäten der Nicht-ETS-Sektoren zurückzuführen (+41 Mio. t CO<sub>2</sub>), was sich auch im CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisvergleich widerspiegelt. Den größten Anteil daran hat mit rund 27 Mio. t CO<sub>2</sub> der Transportsektor, was daraufhin hindeutet, dass hier die Substitutionsmöglichkeiten fossiler Brennstoffe am geringsten und damit die Nachteile einer strengen klimapolitischen Regulierung des Nicht-ETS-Bereichs am größten sind. Dies dürfte weniger für den Bahnverkehr, aber umso stärker für Straßen-, Schiffs- und Flugverkehr, und somit

---

<sup>262</sup> Die Emissionsreduktion pro Land und/oder Sektor setzt sich stets aus einem Substitutions- und einem Einkommenseffekt zusammen. Ein Teil der Energienachfrage kann durch emissionsfreie Energieträger (z. B. Biomasse, Strom) ersetzt werden (Substitutionseffekt). Sind die Substitutionsmöglichkeiten ausgereizt oder zu teuer, kommen Energiesparmaßnahmen zum Einsatz, um auf einen Teil der Energienachfrage letztlich komplett zu verzichten (Einkommens- oder Budgeteffekt).

<sup>263</sup> Vgl. hierzu die Ausführungen zur Wettbewerbsfähigkeit weiter unten in diesem Abschnitt.

auch für den motorisierten Individualverkehr der privaten Haushalte, gelten.<sup>264</sup> Im Szenario „EU-40“ fallen die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Fahrzeugen um rund 3,4 Mio. t CO<sub>2</sub> höher aus als im Szenario „Nat-40“, was einer Steigerung von knapp 4 % entspricht. Im Gebäudebereich bleiben die CO<sub>2</sub>-Emissionen dagegen gleich bzw. gehen minimal zurück. Hier ist offenbar die Trägheit gegenüber CO<sub>2</sub>-Preissignalen deutlich größer als im Fahrzeugbereich.<sup>265</sup> Dies lässt sich zum einen mit den im Vergleich zum Fahrzeugbereich höheren spezifischen Kapital- und geringeren spezifischen Energiekosten pro Nutzungseinheit erklären (vgl. Tabelle 3-14). Zum anderen bewirkt eine Neubau- und Sanierungsrate von 1,5 % im Zeitverlauf geringere Veränderungen als im Fahrzeugbereich, wo der Neuwagenanteil am Gesamtbestand fast das Dreifache beträgt (vgl. Tabelle 3-10 sowie Tabelle 3-13). Insgesamt fallen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Rahmen der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland im Szenario „EU-40“ um 3,3 Mio. t CO<sub>2</sub> höher aus als im Szenario „Nat-40“. Dies entspricht einer Steigerung um 2,3 %.

**Abbildung 4-12:** Sektorale Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO<sub>2</sub>)

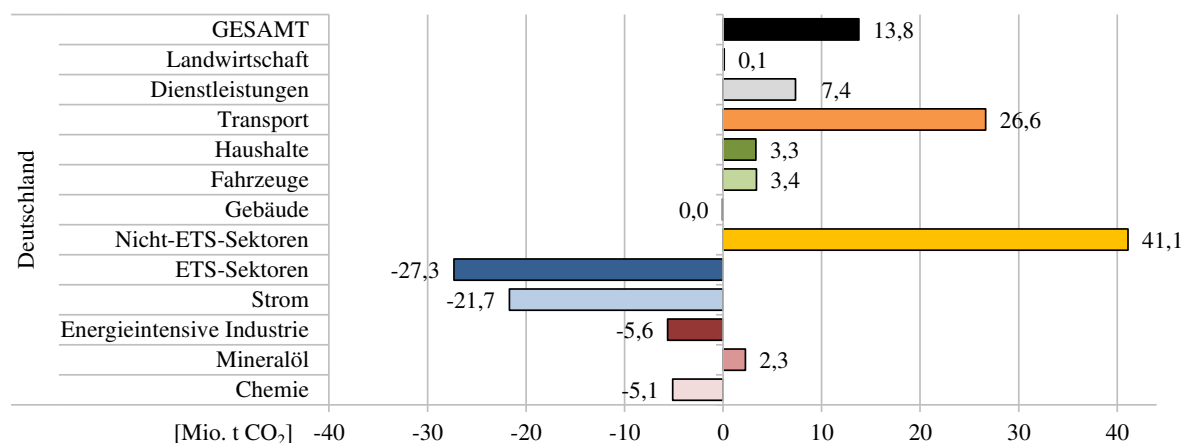


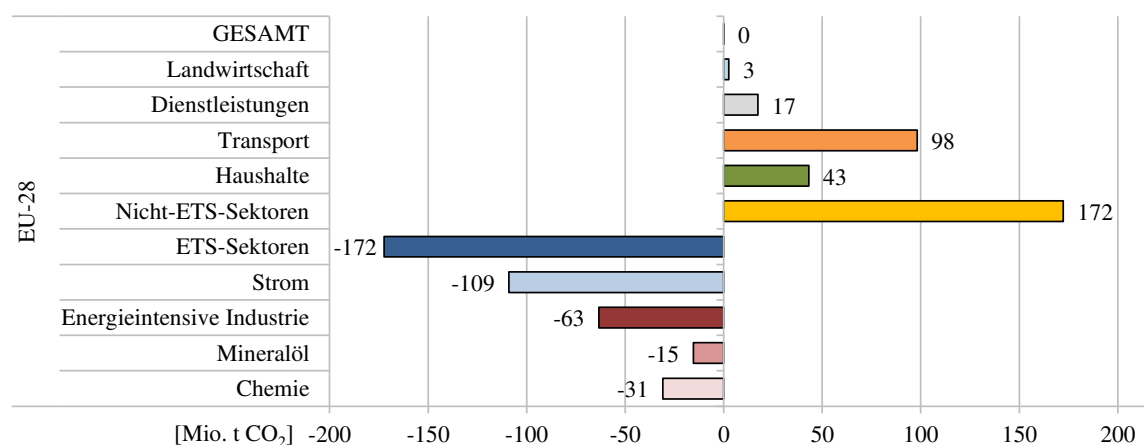
Abbildung 4-13 stellt die sektoralen Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die gesamte EU dar. Die gesamten Emissionen der EU sind in beiden Szenarien per Definition identisch. Es kommt aber zu ähnlichen sektoralen Verschiebungen wie in Deutschland. Die Nicht-ETS-Sektoren profitieren von dem sektorübergreifenden Emissionshandel, da es für sie günstiger ist, Emissionszertifikate aus den ETS-Sektoren zu kaufen, statt Emissionen zu vermeiden. Insgesamt nehmen die Emissionen der Nicht-ETS-Sektoren im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ um 172 Mio. t CO<sub>2</sub> (+13 %) zu, während sie in den ETS-Sektoren entsprechend um den gleichen Betrag sinken (-14 %). Innerhalb der Nicht-ETS-Sektoren profitieren insbesondere der Transport- (+15 %) und der Dienstleistungssektor (+17 %). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der pri-

<sup>264</sup> Im Transportsektor gibt es derzeit kaum kostengünstige Antriebsarten, die ohne Mineralölprodukte auskommen.

<sup>265</sup> Die Raumwärme-Nachfrage ist sehr preisunelastisch. Dagegen ist die Reagibilität im motorisierten Individualverkehr deutlich höher.

vaten Haushalte steigen um 10 %. Innerhalb der ETS-Sektoren sinken die Emissionen in der Stromerzeugung stärker (-20 %) als in der energieintensiven Industrie (-12 %).

**Abbildung 4-13:** Sektorale Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der EU-28 im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO<sub>2</sub>)



Die zusätzliche Emissionsreduktion der ETS-Sektoren im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“, sowohl in Deutschland als auch in der EU, deutet daraufhin, dass die Grenzvermeidungskosten in der Stromerzeugung und der energieintensiven Industrie geringer sind als im Nicht-ETS-Bereich. Dies bedeutet, dass hier fossile Brennstoffe durch kohlenstoffarme Energieträger, wie erneuerbare Energien und Strom, einfacher ersetzt werden können (Substitutionseffekte) oder Einsparmaßnahmen zur Emissionsreduktion leichter umgesetzt werden können (Einkommenseffekt). Bei letzterem ist jedoch zu beachten, ob es sich dabei um tatsächliche oder nur verlagerte Einsparmaßnahmen handelt. So besteht die Möglichkeit, dass CO<sub>2</sub>-Preissteigerungen die Produktionskosten inländischer energieintensiver Unternehmen so weit verschlechtern, dass sie an Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Vergleich verlieren und infolgedessen Teile ihrer Produktion in Länder außerhalb Deutschlands bzw. der EU verlagern, wo die CO<sub>2</sub>-Kosten geringer sind. Durch diesen als „Carbon Leakage“ bezeichneten Effekt werden CO<sub>2</sub>-Emissionen de facto nicht eingespart, sondern nur in andere Weltregionen verlagert.<sup>266</sup>

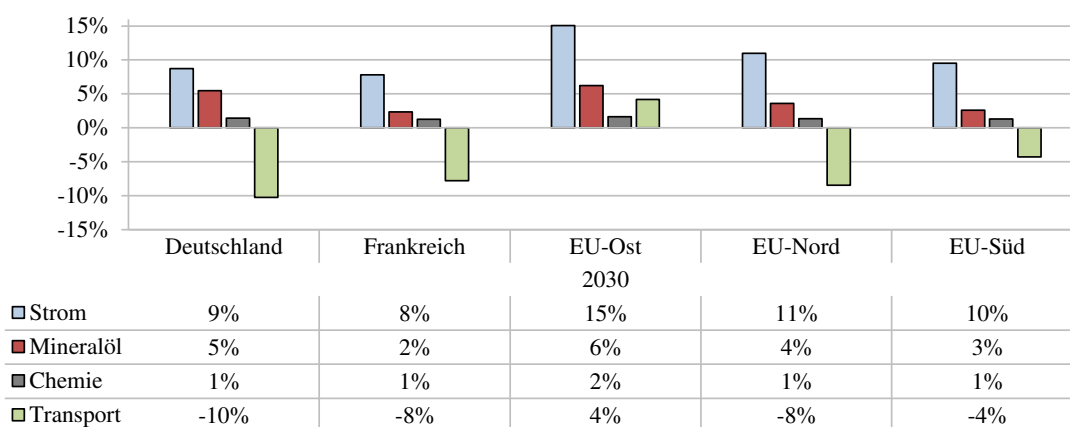
Unterschiedliche Emissionshandelsregimes führen zu unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Kosten, die sich letztlich in veränderten Güterpreisen niederschlagen. Da das Modell sowohl Preiszusammenhänge endogen berücksichtigt als auch den weltweiten Güterhandel vollumfänglich abbildet, können preis- und kostenbedingte Wettbewerbsfähigkeitsänderungen inklusive der damit einhergehenden Carbon Leakage-Effekte analysiert werden. Die Unternehmen haben aufgrund der im Modell vorherrschenden vollkommenen Konkurrenz zwar nicht die Möglich-

<sup>266</sup> Carbon Leakage bezeichnet das Risiko, dass klimapolitisch bedingte CO<sub>2</sub>-Kosten die Produktionskosten inländischer Produktionsunternehmen so stark erhöhen und deren Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Vergleich so stark einschränken, dass die Produktion ins Ausland verlagert wird, wo weniger strenge Klimapolitik vorherrscht. Dort könnte es dann zu einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen kommen, die die Emissionsreduktionen im Inland konterkarieren (für eine umfangreiche Diskussion vgl. beispielsweise Geres et al., 2016 und Vivid Economics with Ecofys, 2014).

keit, ihre Absatzpreise direkt zu beeinflussen. Allerdings können sie ihre Produktion an die Marktgegebenheiten anpassen, in dem sie ihre Kostenstruktur mit dem jeweils vorherrschenden Marktpreis vergleichen (Nullgewinnbedingung), welcher sich wiederum aus dem simultanen Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage ergibt (Markträumungsbedingung). Durch die hier betrachtete Einführung eines sektorübergreifenden Emissionshandels im Szenario „EU-40“ nimmt die CO<sub>2</sub>-Kostenbelastung in den ETS-Sektoren zu, während sie in den Nicht-ETS-Sektoren verringert wird (vgl. Tabelle 4-15 oben), was sich letztlich in den betroffenen Güterpreisen widerspiegelt.

Abbildung 4-14 stellt die Preisdifferenzen ausgewählter Produktionsgüter im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ in den europäischen Modellregionen dar. In der gesamten EU fallen die Strompreise aufgrund der gestiegenen Kostenbelastung durch die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionsvermeidung höher aus als im Szenario „Nat-40“. Die Spannweite reicht von 8 % in Frankreich bis 15 % in Osteuropa. In Deutschland sind es 9 %. Die gestiegenen CO<sub>2</sub>-Kosten verteuern auch die Produktionsgüter der energieintensiven Industrie, wie beispielsweise Chemie- oder Mineralölprodukte. Hier fällt das Ausmaß mit 3 bis 6 % (Mineralöl) bzw. 1 bis 2 % (Chemie) allerdings geringer aus als beim Strom. Beim Preis für Transportdienstleistungen kommt es zu einem umgekehrten Effekt. Zwar steigen die Kosten für Mineralöl im Szenarienvergleich überall an. Allerdings wird diese Preissteigerung durch das Ausmaß der gesunkenen CO<sub>2</sub>-Kostenbelastung (außer in Osteuropa) überkompensiert, so dass die Kosten und damit auch die Preise für Transportdienstleistungen überall (außer in Osteuropa) geringer ausfallen als im Szenario „Nat-40“. In Osteuropa wirkt dagegen der kostensteigernde Effekt des Mineralölpreisanstiegs stärker als die CO<sub>2</sub>-Kostenentlastung.

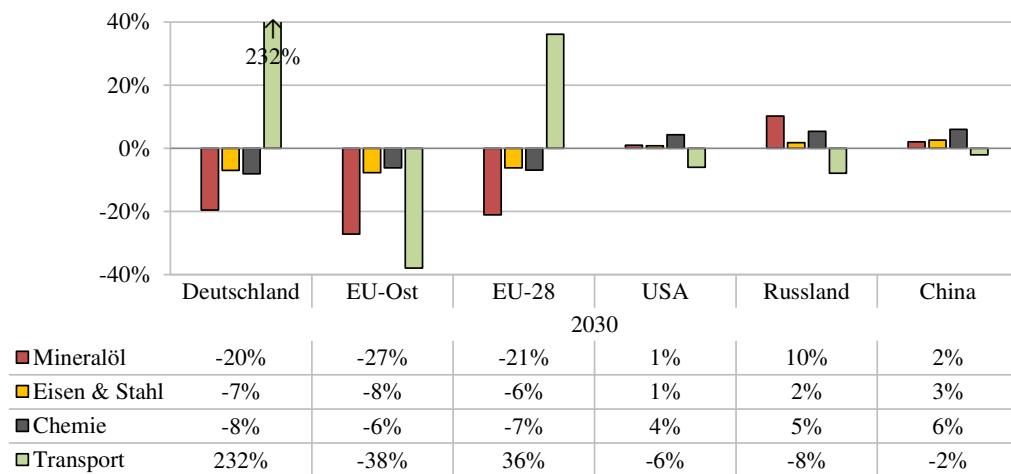
**Abbildung 4-14:** Preisdifferenzen ausgewählter Produktionsgüter im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ in der EU (in %)



Die sich in den Preisen niederschlagenden Kostenänderungen beeinflussen maßgeblich die Wettbewerbsposition im internationalen Vergleich. Diese kann anhand des sektorspezifischen relativen Welthandelsanteils (RWA) gemessen werden, der die Exporte eines Sektors einer Modellregion ins nationale und globale Verhältnis setzt (siehe Gleichung 3-25 in Abschnitt 3.2.3.5). Abbildung 4-18 stellt die im Modell berechneten Änderungen des RWA-Indikators

der energieintensiven Produktionsgüter Mineralöl, Chemie und Eisen & Stahl sowie für Transportdienstleistungen inner- und außerhalb der EU im Jahr 2030 im Szenarienvergleich dar. Die gestiegene CO<sub>2</sub>-Kostenbelastung in den europäischen energieintensiven Produktionssektoren spiegelt sich demnach in einer gesunkenen relativen Wettbewerbsfähigkeit wider. Die relative Wettbewerbsfähigkeit der Mineralölindustrie sinkt um 20 %, in der Chemieindustrie sowie der Eisen- & Stahlindustrie beträgt der Rückgang 7 % bzw. 6 %. Dagegen steigt die relative Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrien außerhalb der EU. In der russischen Mineralölindustrie beträgt der Anstieg der relativen Wettbewerbsfähigkeit im Jahr 2030 10 %, die chinesische Chemieindustrie gewinnt 6 % hinzu. In den USA fallen die Änderungen in allen drei Branchen kleiner aus, wenn auch überall mit positivem Vorzeichen. Bei den Transportdienstleistungen kommt es zu spiegelbildlichen Änderungen. Während deren Wettbewerbsfähigkeit in der EU (außer in Osteuropa) deutlich zulegt (+36 %), sinkt sie außerhalb der EU um bis zu 8 % in Russland. In Deutschland beträgt der relative Anstieg, aufgrund des geringen Ausgangswerts, mehr als das Dreifache (+232 %).

**Abbildung 4-15:** Änderungen des relativen Welthandelsanteils (RWA) ausgewählter Produktionsgüter und Modellregionen im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030

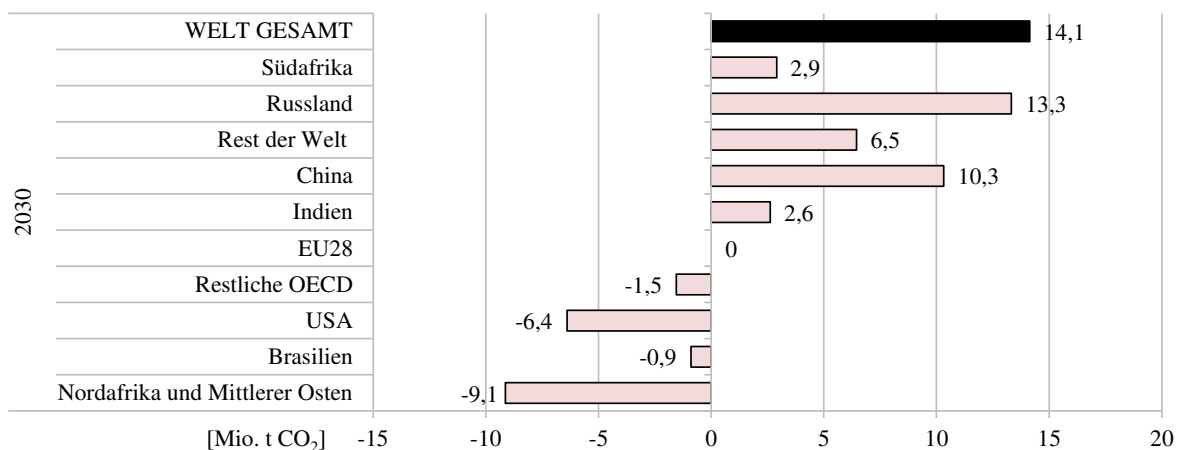


Die Änderungen der relativen Wettbewerbsfähigkeit lassen sich letzten Endes als Produktionsverlagerungen interpretieren.<sup>267</sup> Obwohl die CO<sub>2</sub>-Emissionen der gesamten EU gleich bleiben, kommt es durch die Einführung eines sektorübergreifenden Emissionshandels im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ zu Carbon Leakage. Wie stark sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen außerhalb der EU im Szenarienvergleich verändern, ist in Abbildung 4-16 ersichtlich. Weltweit nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 14,1 Mio. t CO<sub>2</sub> zu (ca. 0,05 %).

<sup>267</sup> Hier ist zu berücksichtigen, dass außerhalb der EU keine Klimaschutzpolitik angenommen wurde. Dies ist eine konservative Annahme, die der Illustration der globalen Carbon Leakage-Effekte dient. Sie führt dazu, dass die berechneten Carbon Leakage-Effekte eine obere Grenze der tatsächlich zu erwartenden Effekte darstellen. Die aktuellen Verpflichtungen der Staaten im Rahmen des Pariser Abkommens (sog. INDCs, vgl. BMUB, 2016a) ließen sich in einer erweiterten Szenarioanalyse ins Modell implementieren. Durch derartige Minderungsverpflichtungen außerhalb der EU würden die volkswirtschaftlichen Auswirkungen infolge einer Einführung des Emissionshandels in der EU tendenziell geringer ausfallen, da die Wettbewerbsfähigkeitsunterschiede im Welthandel geringer ausfallen.

Der größte Anstieg ist in Russland und China mit 13,3 bzw. 10,3 Mio. t CO<sub>2</sub> zu verzeichnen (ca. 0,6 % bzw. 0,1 %). Dagegen kommt es in anderen Ländern, wie den USA oder der Region Nordafrika und Mittlerer Osten, zu geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen (-6,4 Mio. t CO<sub>2</sub> bzw. -9,1 Mio. t CO<sub>2</sub>). Hier liegt offenbar Carbon Leakage in einer negativen Form vor. Dieser Effekt ist Ausdruck der weltweiten Handelsverflechtung, durch die relative Preisänderungen automatisch in andere Länder transportiert werden, wo sie Angebots- und Nachfrageanpassungen auslösen, wenn auch in unterschiedlicher Intensität. So steigt die relative Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrie in Russland und China stärker an als in den USA, was dazu führt, dass überproportional viele Teile der energieintensiven Industrie dorthin verlagert werden, aus deren Produktion die USA wiederum verstärkt Güter importieren statt diese selbst zu produzieren. Des Weiteren sorgt der Anstieg der relativen Wettbewerbsfähigkeit des Transportsektors in der EU dafür, dass beispielsweise ein bestimmter Teil des internationalen Güterverkehrs von europäischen Unternehmen übernommen wird, und somit CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem europäischen Ausland in die EU verlagert werden.

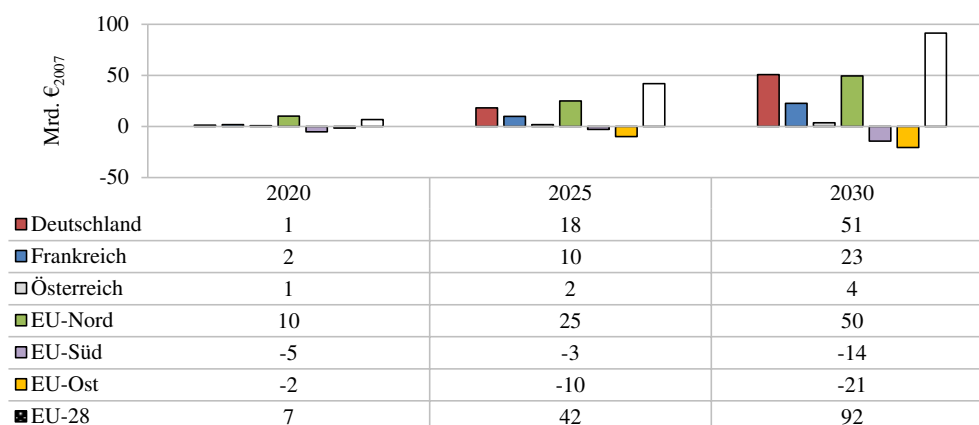
**Abbildung 4-16:** Änderungen der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO<sub>2</sub>)



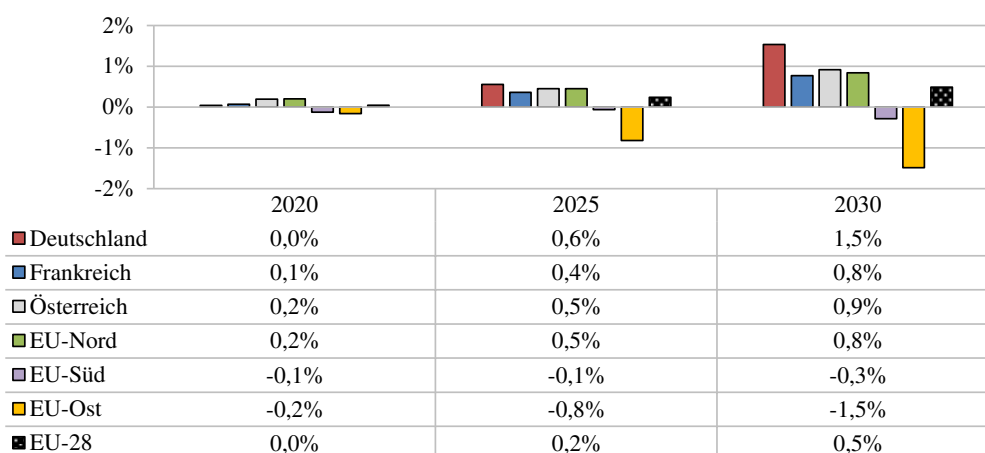
Die infolge der Änderung des Emissionshandelsregimes relativ gestiegenen CO<sub>2</sub>-Emissionen außerhalb der EU sind aber nicht alleine auf Carbon Leakage im Sinne eines Substitutionseffekts zurückzuführen, sondern liegen auch in einem relativ gestiegenen gesamtwirtschaftlichen Einkommen der EU und einer dadurch gestiegenen gesamtwirtschaftlichen Nachfrage begründet (Einkommenseffekt). Über die Handelsverflechtungen wirkt sich ein gesteigener Konsum in der EU auch auf Produktion und Konsum im Rest der Welt aus. Inwiefern sich gesamtwirtschaftliches Einkommen und Produktion innerhalb der EU ändern, ist in Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18 anhand der absoluten und relativen Veränderung des realen BIP dargestellt. Die Veränderungen zwischen den Szenarien entwickeln sich unterschiedlich und nehmen im Zeitverlauf zu. So kommt es in Deutschland, Frankreich und Nordeuropa im Szenario „EU-40“ zu einem deutlich höheren BIP als im Szenario „Nat-40“. In Deutschland liegt das reale BIP im Jahr 2030 im Falle eines sektorübergreifenden Emissionshandels um 1,5 % höher als im Szenario „Nat-40“. In Osteuropa kommt es dagegen spiegelbildlich im

selben Jahr zu einem um 1,5 % niedrigeren BIP. Auch in Südeuropa ist das Vorzeichen negativ. Unterm Strich kommt es in der gesamten EU aber zu einem positiven Nettoeffekt von 0,5 %.

**Abbildung 4-17:** Absolute Veränderung des realen BIP innerhalb der EU im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in Mrd. €<sub>2007</sub>)

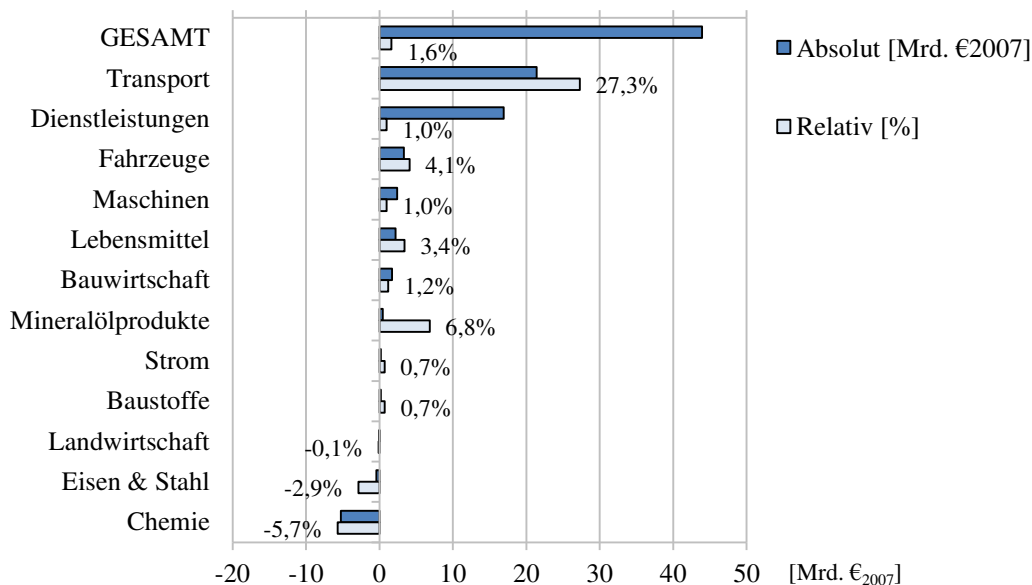


**Abbildung 4-18:** Relative Veränderung des realen BIP innerhalb der EU im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in %)



Der Vorteil aus geringeren klimapolitischen Belastungen in Form von niedrigeren CO<sub>2</sub>-Kosten ist im hier betrachteten Szenarienvergleich per Saldo größer als der Nachteil aus den Energiepreisanstiegen. Der gesamtwirtschaftliche Nachfrageanstieg (z.B. vom Transportsektor) ist sogar so hoch, dass selbst die Mineralölindustrie in Deutschland ihren Rückgang der relativen Wettbewerbsfähigkeit in Höhe von 20 % wettmachen und ihre Bruttowertschöpfung um 6 % steigern kann. Abbildung 4-19 stellt die sektoralen Veränderungen der realen Bruttowertschöpfung in Deutschland im Jahr 2030 im Szenarienvergleich dar. Während sie in der Chemieindustrie sowie der Eisen- & Stahlindustrie um 3 % bzw. 6 % zurückgeht, legt sie im Transportsektor um 27 % zu. Insgesamt liegt die Bruttowertschöpfung im Szenario „EU-40“ in Deutschland im Jahr 2030 um 1,6 % höher als im Szenario „Nat-40“.

**Abbildung 4-19:** Absolute und relative Veränderung der sektoralen, realen Bruttowertschöpfung in Deutschland im Jahr 2030 im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ (in Mrd. €<sub>2007</sub> und %)

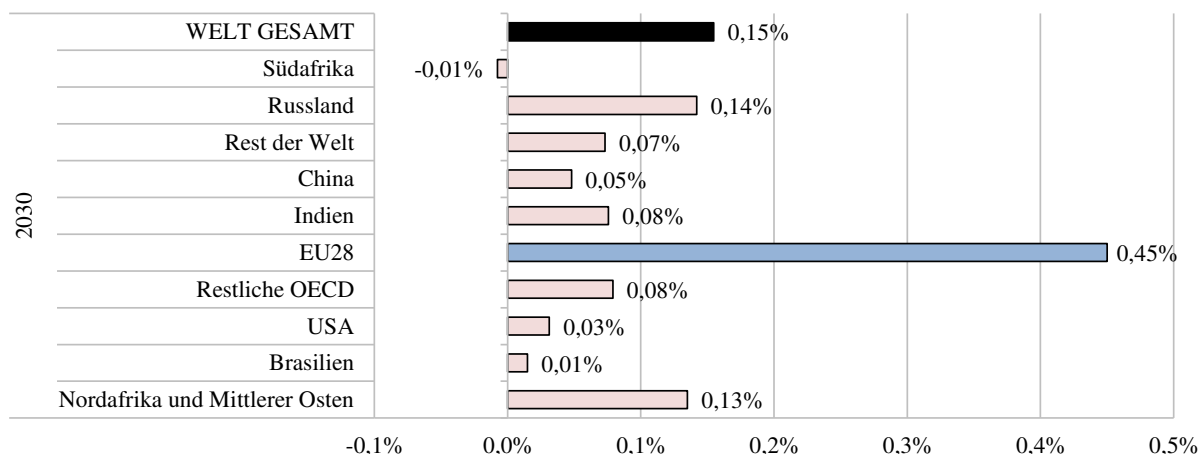


Das zusätzlich generierte Einkommen in der EU pflanzt sich über die weltweiten Handelsverflechtungen auch auf Länder außerhalb der EU fort. Weltweit kommt es durch die Einbeziehung der europäischen Nicht-ETS-Sektoren in einen EU-weiten, sektorübergreifenden Emissionshandel im Vergleich zur nationalen Regulierung der europäischen Nicht-ETS-Sektoren zu einem um 123 Mrd. €<sub>2007</sub> höheren BIP (ca. 0,15 %). Davon profitieren nicht alle Länder außerhalb der EU in gleichem Maße. Wie in Abbildung 4-20 dargestellt, sind die größten relativen Veränderungen des realen BIP in Russland sowie der Region Nordafrika und Mittlerer Osten zu verzeichnen (+0,14 % bzw. +0,13 %), während in Südafrika kaum Änderungen bzw. sogar leicht negative relative Änderungen erkennbar sind (-0,01 %).<sup>268</sup> Die weltweit zur Verfügung stehenden Produktionsfaktoren werden durch Einführung eines sektorübergreifenden Emissionshandels zur Erreichung der klimapolitischen Ziele der EU aus Sicht der gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrt letztlich jedoch besser genutzt.

<sup>268</sup> Dennoch steigt die gesamtwirtschaftliche Wohlfahrt auch in Südafrika, sowie in allen anderen Ländern außerhalb der EU, an. Der Wohlfahrtsindex in Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen, der hier nicht gesondert dargestellt wurde, misst, wie hoch der Nutzen eines bestimmten Gleichgewichtszustandes für den repräsentativen Verbraucher einer Modellregion ist bzw. wie groß die Konsummöglichkeiten sind. Der Wohlfahrtsindex ist definiert als äquivalente Variation (*Hicksian Equivalent Variation*, HEV) und gibt an, wie groß ein bestimmter Geldbetrag sein müsste, um einem Haushalt das durch die relative Preisänderung eines neuen Gleichgewichtszustands veränderte Nutzenniveau zu kompensieren (vgl. Varian, 1999, S. 160 ff). Der Wohlfahrtsindex wird dabei auf das Niveau des Ausgangsgleichgewichts normiert. Im Gegensatz zum realen BIP berücksichtigt der Wohlfahrtsindex als makroökonomischer Indikator auch die Auswirkungen der relativen Preisänderungen auf den Nutzen des repräsentativen Verbrauchers.



**Abbildung 4-20:** Relative Veränderung des realen BIP weltweit im Szenario „EU-40“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40“ (in %)



### 4.2.3 Zwischenfazit

Die Einbeziehung der Energienachfrage privater Haushalte und aller anderen Nicht-ETS-Sektoren in einen EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel bringt im Vergleich zur nationalen Regulierung der Nicht-ETS-Sektoren gesamtwirtschaftliche Vorteile mit sich. Der Grund hierfür ist der kosteneffiziente Ausgleich national unterschiedlicher Grenzvermeidungskosten, die zum einen durch national unterschiedliche Energieeffizienzverbesserungen im Zeitverlauf und zum anderen durch die unterschiedlich ambitionierten nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsvorgaben im Rahmen der „EU Effort Sharing Decision“ bedingt sind.

Dabei sind die Grenzvermeidungskosten in den Nicht-ETS-Sektoren (außer in Osteuropa) höher als in den ETS-Sektoren. Das bedeutet, dass der Stromsektor und die energieintensive Industrie bei einem sektorübergreifenden Emissionshandel und damit verbundenen sektorübergreifend gültigen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen stärker reduzieren würden, während die Nicht-ETS-Sektoren die dadurch frei werdenden CO<sub>2</sub>-Zertifikate erwerben und für eine Ausweitung ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen einsetzen würden. Dies gilt insbesondere für den Transportsektor, und damit auch für den motorisierten Individualverkehr der privaten Haushalte in Deutschland, wo es nach gegenwärtigem Stand weder kostengünstige Substitutionsmöglichkeiten für die fossilen Kraftstoffe noch größere Energieeinsparpotentiale zu geben scheint.<sup>269</sup> Der Einsatz von kohlenstoffarmen Energieträgern, wie Biomasse oder Strom, ist im Fahrzeugbereich relativ teurer als in anderen Bereichen, wie beispielsweise im Gebäudebereich, wo Öl- und Gasheizungen durch Wärmepumpen oder Holzheizungen ohne restriktiv hohe Mehrkosten ersetzt werden können.

Im Gegensatz zum Fahrzeugbereich herrscht im Gebäudebereich zudem eine geringere Energiepreissensitivität, die mitunter darin begründet ist, dass der Anteil der Energiekosten an den

<sup>269</sup> In dieser Betrachtung sind Innovationen von kostengünstigen kohlenstoffarmen Antriebstechnologien nicht berücksichtigt. Diese können das Bild grundlegend verändern, sind aber per se nur schwierig vorherzusagen. Dies wäre Gegenstand eigenständiger Forschungsarbeiten (vgl. auch Zürn, 2010).

gesamten Nutzungskosten, bestehend aus Energie- und Kapitalkosten pro Einheit beheizter Wohnfläche, geringer ist als im Fahrzeugbereich. Zudem tragen längere Nutzungszeiten dazu bei, dass die Anpassungsgeschwindigkeit im Gebäudebereich geringer ausfällt. Dadurch kommt es im Gebäudebereich nur zu einer geringen Reaktion auf die im Szenarienvergleich geänderten klimapolitischen Rahmenbedingungen und damit einhergehenden unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise.

Innerhalb der ETS-Sektoren fallen zudem die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen im Stromsektor nach Einführung eines sektorübergreifenden Emissionshandels größer aus als in der energieintensiven Industrie. Dies deutet darauf hin, dass es in den meisten energienachfragenden Sektoren (außer im Fahrzeugbereich) vergleichsweise großes Potential mit geringeren Vermeidungskosten gibt, fossile Brennstoffe durch Energieanwendungen auf Basis kohlenstoffarm erzeugten Stroms zu ersetzen.

Für die Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte lässt sich schlussfolgern, dass es kostengünstiger erscheint, CO<sub>2</sub> in der Stromerzeugung oder der energieintensiven Industrie zu reduzieren als im Haushaltsbereich. Dort gibt es wiederum einen großen Unterschied zwischen dem motorisierten Individualverkehr, bzw. dem Transportsektor allgemein, wo die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion mit vergleichsweise höheren Nutzeneinbußen verbunden ist als im Gebäudebereich, wo dies kostengünstiger möglich ist.

Die gesamtwirtschaftlichen Vorteile eines sektorübergreifenden Emissionshandels im Vergleich zu nationalen Regelungen sind schließlich nicht auf die EU beschränkt. Die klimapolitisch bedingten Veränderungen des relativen Preisgefüges der EU-Volkswirtschaft strahlen über die Handelsverflechtungen auch auf die internationalen Märkte aus. So kommt es einerseits zu Carbon Leakage-Effekten, wonach Teile der EU-Produktion energieintensiver Güter ins außereuropäische Ausland verlagert werden (u. a. nach China und Russland). Andererseits erzeugen die gesamtwirtschaftlichen Vorteile eines sektorübergreifenden Emissionshandels im Vergleich zu nationalen Regelungen aber auch höhere Einkommen und damit einhergehende Konsummöglichkeiten, von denen auch die restliche Welt, beispielsweise in Form einer gesteigerten Exportnachfrage, profitiert. Letzten Endes werden die weltweit verfügbaren Produktionsfaktoren effizienter genutzt.

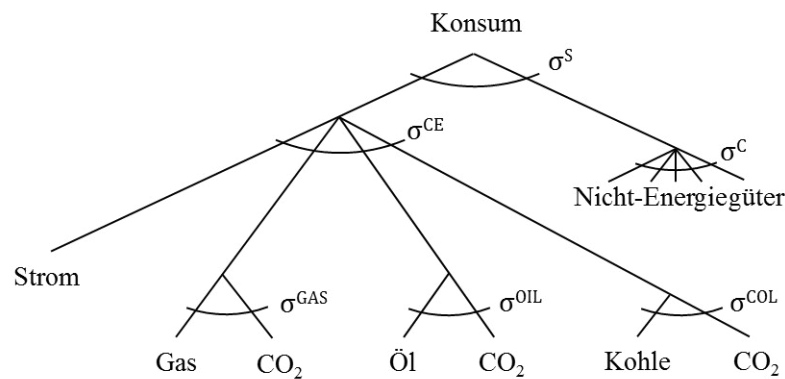
#### **4.2.4 Exkurs: Keine technologisch disaggregierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte**

Um die Bedeutung der in dieser Arbeit vorgenommenen technologisch disaggregierten Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland (Abschnitt 3.4) weiter herauszuarbeiten, können die in Abschnitt 4.2 der modellgestützten Szenarioanalyse dargestellten Rechnungen auch ohne die technologische Disaggregation durchgeführt werden. In einem kurzen Exkurs sollen an dieser Stelle die wesentlichen Unterschiede zwischen einer Modellversion mit und einer Modellversion ohne technologisch disaggregierte Darstellung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland präsentiert werden. Dies trägt zu

einem besseren Verständnis der in dieser Arbeit vorgenommenen modelltechnischen Verbesserung bei.

In Falle einer nicht technologisch disaggregierten Darstellung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland muss die Nesting-Struktur des privaten Konsums in Deutschland aus Abbildung 3-11 zurückgesetzt und so geändert werden, dass sie der Darstellung des privaten Konsums der anderen Modellregionen entspricht. Die folgende Abbildung 4-21 ist daher identisch mit Abbildung 3-8 aus Abschnitt 3.2.3.3.

**Abbildung 4-21:** Nesting-Struktur des Konsums in Deutschland (Exkurs: ohne technologisch disaggregierte Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland)<sup>270</sup>



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Rutherford & Paltsev, 2000, S. 37.

Ansonsten entspricht das Modell exakt der in Abschnitt 4.2 verwendeten Version. Die in Tabelle 4-16 aufgeführte Szenariodefinition für den folgenden Exkurs entspricht ebenfalls der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Szenariodefinition in Tabelle 4-11. Lediglich die Szenarionamen sind der Eindeutigkeit halber mit „Nat-40a“ und „EU-40a“ benannt.

**Tabelle 4-16:** Szenariodefinition zur Analyse der Bedeutung der Energienachfrage privater Haushalte in einem EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandel (Exkurs: keine technologische Disaggregation)

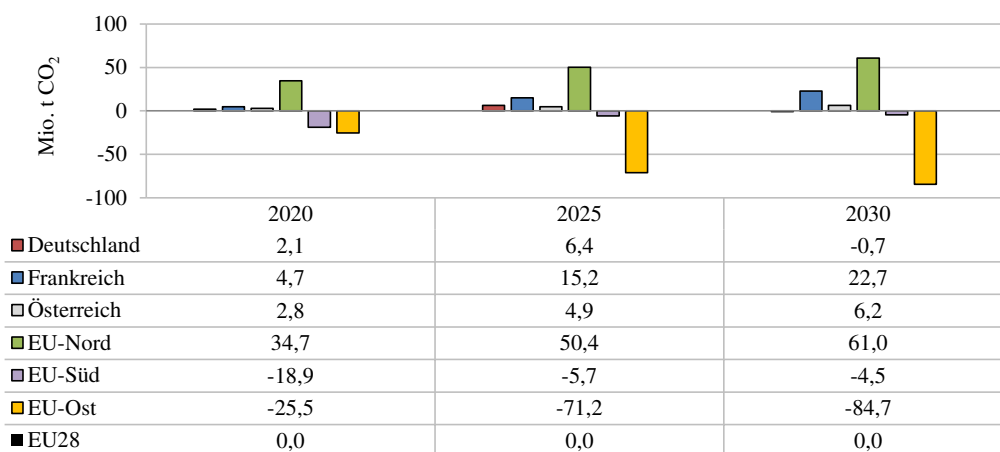
Nr.	Szenario	Definition des Emissionshandelsregimes
1a	„Nat-40a“	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fortführung des EU-ETS bis 2030 gemäß Pfad in Tabelle 4-2</li> <li>National differenzierte Emissionsreduktionen für die Nicht-ETS-Sektoren gemäß „EU Effort Sharing Decision“ (vgl. Tabelle 4-13)</li> <li>Einhaltung der EU-weiten Emissionsreduktionsziele bis 2030</li> </ul>
2a	„EU-40a“	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sektorübergreifender EU-Emissionshandel (ETS- und Nicht-ETS-Sektoren)</li> <li>Einhaltung der EU-weiten Emissionsreduktionsziele bis 2030</li> </ul>

Abbildung 4-22 beschreibt die Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der EU im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in Mio. t

<sup>270</sup> Vgl. Abbildung 3-8 in Abschnitt 3.2.3.3.

CO<sub>2</sub>). Im Vergleich zu Abbildung 4-11 fällt auf, dass es in Deutschland im Szenario „EU-40a“ zu kaum höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen kommt als im Szenario „Nat-40a“. Im Jahr 2030 ist das Vorzeichen sogar negativ (-0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>). In den anderen EU-Ländern kommt es zu vergleichbaren strukturellen Verschiebungen. Das absolute Emissionsniveau ist jedoch in allen EU-Ländern (außer Deutschland) höher als in Abschnitt 4.2. So werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Frankreich im Szenario „EU-40a“ um 22,7 Mio. t CO<sub>2</sub> (statt um 21,5 Mio. t CO<sub>2</sub>) ausgeweitet und in Osteuropa nur um 84,7 Mio. t CO<sub>2</sub> (statt um 89,4 Mio. t CO<sub>2</sub>) reduziert.

**Abbildung 4-22:** Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der EU im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in Mio. t CO<sub>2</sub>; Exkurs)



Diese Veränderungen deuten darauf hin, dass die technologische Disaggregation die Flexibilität und Substitutionsmöglichkeiten in der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland stärker einschränkt als dies in der Modellversion ohne technologische Disaggregation der Fall ist. Die Einführung eines sektorübergreifenden Emissionshandelsregimes bringt dann einen größeren Effizienzgewinn mit sich als dies in der Modellversion ohne technologische Disaggregation der Fall ist.

Dies kann insbesondere an den CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen verdeutlicht werden. Tabelle 4-17 beschreibt analog zu Tabelle 4-15 die Entwicklung der szenariospezifischen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise in den einzelnen Teilsektoren und EU-Ländern bzw. -Ländergruppen im Zeitraum 2020 bis 2030 (in €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>). Im Jahr 2020 sind kaum Änderungen sichtbar. Diese machen sich erst langfristig bemerkbar. Die Grenzvermeidungskosten bzw. der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis in den deutschen Nicht-ETS-Sektoren im Szenario „Nat-40a“ betragen mit 138 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> weniger als die Hälfte des Niveaus von 310 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> im Szenario „Nat-40“ (310 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>, vgl. Tabelle 4-15). Auch in den anderen europäischen Nicht-ETS-Sektoren sinken die CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise. Gleichzeitig liegt der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis der ETS-Sektoren im Jahr 2030 im Szenario „Nat-40a“ mit 24,9 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> um ca. 7 % höher als im Szenario „Nat-40“ mit 23,2 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>. Bei einem sektorübergreifenden Emissionshandel liegt der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis im Szenario „EU-40a“ kontinuierlich höher als im Szenario „EU-40“.

Die Unterschiede in den CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen und damit in den Grenzvermeidungskosten sind darauf zurückzuführen, dass die technologisch disaggregierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland eine bestimmte Bindung an Produktionsfaktoren in ihren jeweiligen spezifischen Verwendungszwecken vorsieht. Insbesondere die Formulierung von Leontief-Produktionsfunktionen mit ihren fixen Inputkoeffizienten trägt dazu bei. Fällt diese Fixierung weg, können die Produktionsfaktoren in der Volkswirtschaft flexibler anderweitig eingesetzt werden (Substitutionseffekt), wodurch insgesamt die Produktions- und Konsummöglichkeiten der Volkswirtschaft steigen und damit auch ihr gesamtwirtschaftliches Einkommen (Einkommenseffekt). Durch diesen Effekt wird die Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland über das EU-ETS auch auf die anderen EU-Länder transportiert. Durch die größeren Substitutionsmöglichkeiten und Flexibilisierungspotentiale fallen letztlich die ökonomischen Vorteile durch die Einführung eines EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandelssystems gegenüber rein nationalen Vorgaben geringer aus, da regulatorische Eingriffe in das Wirtschaftssystem besser abgedeckt werden können. Dies erklärt die geringeren Unterschiede zwischen den CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen in den ETS- und den Nicht-ETS-Sektoren bei einer Modellierung ohne im Vergleich zur Modellierung mit technologischer Disaggregation. Gleichzeitig steigen in einem sektorübergreifenden Emissionshandel im Falle einer Modellierung ohne technologische Disaggregation, aufgrund der damit verbundenen höheren Flexibilität, auch die Opportunitätskosten der klimapolitischen Regulierung im Vergleich zur Modellierung mit technologischer Disaggregation. Dies erklärt letztlich die im Vergleich höheren Grenzvermeidungskosten im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „EU-40“ (33,6 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> im Jahr 2030), auch wenn dieser Effekt vergleichsweise gering ist (33,9 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> ggü. 33,6 €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub> im Jahr 2030).

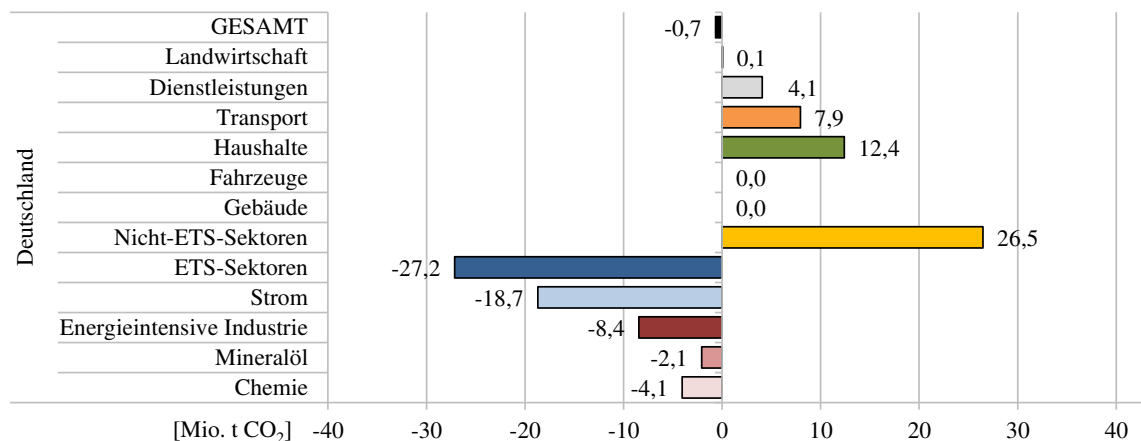
**Tabelle 4-17:** Entwicklung der szenariospezifischen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise in den einzelnen Teilssektoren und Ländern im Zeitraum 2020 bis 2030 (in €<sub>2007</sub>/t CO<sub>2</sub>; Exkurs)

Szenario	Sektor	Modellregion	Einheit	2020	2025	2030
„Nat-40a“	Nicht-ETS	Deutschland	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	22	73	138
		Frankreich	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	28	93	166
		Österreich	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	51	138	242
		EU-Nord	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	50	124	209
		EU-Süd	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	9	59	102
		EU-Ost	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	0	2	17
	ETS	EU-28	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	9,2	15,8	24,9
„EU-40a“	Sektorübergreifend	EU-28	€ <sub>2007</sub> /t CO <sub>2</sub>	7,9	16,0	33,9

Dass die Modellierung mit technologischer Disaggregation letztlich Substitutionsmöglichkeiten in der Energienachfrage privater Haushalte einschränkt, lässt sich auch anhand der Verschiebungen der sektoralen CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb Deutschlands erkennen. Der Unterschied zwischen den beiden klimapolitischen Regimes im Falle einer Modellierung mit

technologischer Disaggregation (Abbildung 4-12) ist geringer als im Falle ohne technologischer Disaggregation (Abbildung 4-23). Insgesamt beträgt er nur -0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>. Die Veränderungen der ETS- und Nicht-ETS-Sektoren gleicht sich nahezu aus, wobei der Rückgang der ETS-Sektoren ungefähr so hoch ist wie im Falle mit technologischer Disaggregation (-27 Mio. t CO<sub>2</sub>). Das heißt, dass die Emissionsausweitung im Falle mit technologischer Disaggregation hauptsächlich in den Nicht-ETS-Sektoren stattgefunden hat (+41 Mio. t CO<sub>2</sub>), und dort insbesondere im Transportsektor (+26,6 Mio. t CO<sub>2</sub>), der von der Veränderung des klimapolitischen Regimes besonders stark profitiert hat (vgl. Abbildung 4-12). Durch den Wegfall der technologischen Disaggregation wird die Energienachfrage privater Haushalte nun im Szenarienvergleich viel stärker als im Falle mit technologischer Disaggregation ausgeweitet (+12,4 im Vergleich zu +3,3 Mio. t CO<sub>2</sub>). Sie übernimmt sozusagen die Ausweitung des Transportsektors, der im Szenarienvergleich nun nur noch bei 7,9 Mio. t CO<sub>2</sub> liegt. Damit verbunden gehen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Mineralölindustrie zurück (-2,1 Mio. t CO<sub>2</sub>), die vorher aufgrund der gestiegenen Mineralölnachfrage des Transportsektors leicht gestiegen waren (+2,3 Mio. t CO<sub>2</sub>). Insgesamt gehen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der energieintensiven Industrie stärker zurück als im Falle mit technologischer Disaggregation (-8,4 im Vergleich zu -5,6 Mio. t CO<sub>2</sub>). Im Stromsektor ist die im Szenarienvergleich zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion dagegen geringer als im Falle mit technologischer Disaggregation (-18,7 im Vergleich zu -21,7 Mio. t CO<sub>2</sub>).

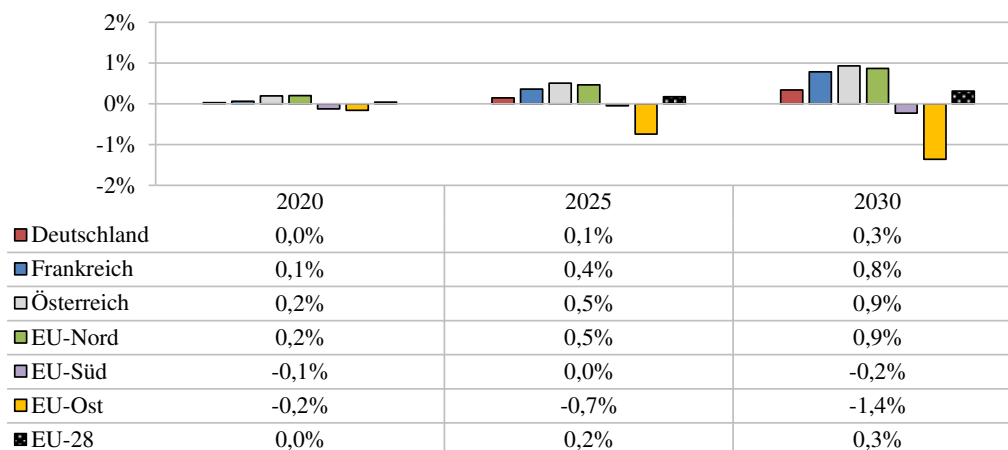
**Abbildung 4-23:** Sektorale Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Jahr 2030 (in Mio. t CO<sub>2</sub>; Exkurs)



Die am BIP gemessenen gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen verhalten sich im Falle einer Modellierung ohne technologischer Disaggregation im Vergleich zum Falle mit technologischer Disaggregation im Szenarienvergleich proportional zu den oben beschriebenen CO<sub>2</sub>-Emissionsveränderungen. Abbildung 4-24 stellt die relative Veränderung des realen BIP innerhalb der EU im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Zeitraum

2020 bis 2030 dar.<sup>271</sup> In Deutschland beträgt der Unterschied im Jahr 2030 nur noch 0,3 % statt 1,5 % (vgl. Abbildung 4-18). In der restlichen EU sind die Unterschiede ebenfalls kleiner bzw. ändern sich nur wenig. Insgesamt beträgt der BIP-Vorteil im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Jahr 2030 0,3 % (vorher 0,5 %, Abbildung 4-18).

**Abbildung 4-24:** Relative Veränderung des realen BIP innerhalb der EU im Szenario „EU-40a“ im Vergleich zum Szenario „Nat-40a“ im Zeitraum 2020 bis 2030 (in %; Exkurs)



<sup>271</sup> Beim BIP ist zu berücksichtigen, dass sich die Berechnungsweise im Falle ohne technologischer Disaggregation leicht ändert, da die kalkulatorischen Fahrzeug- und Gebäudemieten nun nicht mehr explizit in den Konsum der privaten Haushalte einberechnet werden, sondern nur die Neukäufe, wie es auch in den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen geschieht. Diese veränderte Berechnungsweise kann für einen Teil der Ergebnisse verantwortlich sein, dessen Ausmaß hier aber nicht identifiziert werden konnte.





## 5 Schlussbetrachtung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Energienachfrage privater Haushalte technologisch fundiert in einen gesamtwirtschaftlichen Kontext einzuordnen, die aktuell implementierten und diskutierten klimapolitischen Instrumente im Haushaltsbereich auf ihre volkswirtschaftlichen Auswirkungen in Deutschland und der EU hin zu analysieren und wirtschaftspolitische Handlungsempfehlungen für einen effektiven und kostengünstigen Klimaschutz im Haushaltsbereich abzuleiten. Die methodische Neuerung dieser Arbeit liegt in einem hybriden Allgemeinen Gleichgewichtsansatz (Top-down) mit technologischer Fundierung (Bottom-up) der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland, um die Energienachfrage hinsichtlich ihrer jeweiligen Verwendungszwecke, das heißt zur Befriedigung des Wärme- und Mobilitätsbedarfs privater Haushalte, unterscheiden zu können. Aufgrund des geschlossenen Einkommenskreislaufs des Allgemeinen Gleichgewichtsansatzes können dabei sowohl direkte als auch indirekte Effekte abgebildet, und Nettoeffekte quantifiziert werden. Dies ermöglicht eine modell- und szenariogestützte Kostenwirksamkeitsanalyse zahlreicher implementierter und diskutierter klimapolitischer Instrumente in Deutschland und der EU, von denen private Haushalte in Deutschland direkt oder indirekt betroffen sind. Die modellendogene Erfassung globaler Handelsströme ermöglicht es darüber hinaus, die Energienachfrage privater Haushalte Deutschlands in einen gesamtwirtschaftlichen Kontext einzuordnen und so ihre Bedeutung für den Klimaschutz herauszuarbeiten.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des klimapolitischen Instrumentenvergleichs im Haushaltsbereich sowie der gesamtwirtschaftlichen Analyse der Energienachfrage privater Haushalte im Rahmen eines EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandelssystems zusammengefasst. Anschließend werden die Grenzen der methodischen Herangehensweise aufgezeigt und wirtschaftspolitische Handlungsoptionen diskutiert. Schließlich werden weiterführende Forschungsarbeiten vorgeschlagen.

### 5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

#### *Vergleich klimapolitischer Instrumente im Haushaltsbereich*

Bei der Betrachtung einzelner klimapolitischer Instrumente (Abschnitt 4.1) zeigen sich unterschiedliche Effektivitäts- und Effizienzeigenschaften. Verwendet man den Indikator CO<sub>2</sub>-Produktivität, um die klimapolitischen Instrumente im Hinblick auf ihre kosteneffiziente Nutzung des Produktionsfaktors CO<sub>2</sub> zu vergleichen, führen die Ergebnisse der Modellrechnungen zu folgender Rangfolge:

1. Einbeziehung der deutschen Haushalte in das aktuelle EU-ETS
2. CO<sub>2</sub>-Steuer im deutschen Haushaltsbereich
3. Aktuelle Förderinstrumente für neue Fahrzeuge und Gebäude in Deutschland
4. Standards: EnEV in Deutschland und europäische CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für neue PKW

Zwar erweisen sich die betrachteten Standards im Modell als sehr effektiv hinsichtlich der beabsichtigten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion. Auch das Mengenrisiko ist in der hier betrachteten Ausgestaltung als sehr klein einzustufen. Allerdings werden die erreichten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen im Haushaltsbereich mit hohen volkswirtschaftlichen Kosten erkaufte. Die Technologiewahl der privaten Haushalte wird letztlich so stark eingeschränkt, dass weniger die induzierten Substitutionseffekte zwischen einzelnen Technologien für die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion verantwortlich sind, als vielmehr ein einkommensbedingter Rückgang der allgemeinen Nachfrage nach Energiedienstleistungen.

Förderinstrumente setzen, genau wie Standards, direkt an der Kaufentscheidung bestimmter Technologien an. In ihrer hier betrachteten Ausgestaltung erweisen sie sich im Gebäudebereich als durchaus effektiv. Im Fahrzeugbereich entfalten sie dagegen nur wenig Wirkungskraft. Darüber hinaus ist das Mengenrisiko von Förderinstrumenten größer als bei Standards, da nicht gesichert ist, dass die Kaufanreize ausreichen, um ihre gewünschte Wirkung zu entfalten. Unter der Annahme eines geschlossenen Einkommenskreislaufs besteht zudem die Gefahr, dass die für die Prämien verwendeten Mittel hohe volkswirtschaftliche Opportunitätskosten aufweisen, die sich in gesamtwirtschaftlichen Nutzeneinbußen niederschlagen.

Im Gegensatz zu Förderinstrumenten und Standards setzen marktbasierende Instrumente, wie CO<sub>2</sub>-Steuern oder der Emissionshandel, weniger beim Kauf als vielmehr bei der Technologienutzung an. Dadurch entfalten sie ihre Wirkung direkt beim Energieeinsatz und damit näher an der eigentlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsquelle. Aus diesem Grund weisen sie eine höhere Kostenwirksamkeit auf als Standards oder Förderinstrumente. Bei der CO<sub>2</sub>-Steuer existiert jedoch ein erhebliches Mengenrisiko, da vorab nicht klar ist, ob der festgelegte CO<sub>2</sub>-Preis ausreicht, um die gewünschte CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion zu erreichen. In der hier ausgestalteten Version einer CO<sub>2</sub>-Mengensteuer auf die Energienachfrage privater Haushalte im Mittel von 30 €/t CO<sub>2</sub> kommt es dabei zur geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion aller vier Instrumente.<sup>272</sup>

Eine Ausweitung des gegenwärtigen EU-ETS auf die Nachfrage privater Haushalte in Deutschland weist die größte Kostenwirksamkeit des hier angestellten klimapolitischen Instrumentenvergleichs auf. Ähnlich wie CO<sub>2</sub>-Steuern, setzt der Emissionshandel, über den sich im Markt bildenden Zertifikatspreis, bei der eigentlichen Energienutzung an (Nutzungsanreiz). Darüber hinaus sorgt der Emissionshandel zu einem Ausgleich der Grenzvermeidungskosten aller Marktteilnehmer. Die Vorteile des Emissionshandels sind umso größer je unterschiedlicher die Grenzvermeidungskosten der Marktteilnehmer sind. Je höher wiederum die Anzahl der Marktteilnehmer, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass viele Marktteilnehmer mit unterschiedlichen Grenzvermeidungskosten am Handel teilnehmen. Über eine EU-weit bindende Emissionsobergrenze wird außerdem das Mengenrisiko kontrolliert. Die erreichte CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion innerhalb Deutschlands liegt im hier betrachteten Ver-

---

<sup>272</sup> Insgesamt kommt es zu einer CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion in Höhe von 41,5 % in 2030 ggü. 1990 im Vergleich zu 42,4 % bei Förderinstrumenten und Emissionshandel und 43,1 % bei Standards (vgl. Tabelle 4-8).

gleich zusammen mit den Förderinstrumenten zwischen den jeweils erzielten Niveaus der Standards und der CO<sub>2</sub>-Steuer.

### ***Modellierung eines EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandelssystems***

Der Vergleich eines EU-weiten sektorübergreifenden Emissionshandelssystems mit einer Situation nationaler Zielvorgaben (Abschnitt 4.2) zeigt, dass die Nicht-ETS-Sektoren, inklusive der Energienachfrage privater Haushalte, höhere CO<sub>2</sub>-Grenzvermeidungskosten aufweisen als die im aktuellen EU-ETS teilnehmenden Sektoren der Stromerzeugung und der energieintensiven Industrie. Im Falle eines sektorübergreifenden Emissionshandels kommt es daher, verglichen mit der Situation einer nationalen Regulierung der Nicht-ETS-Sektoren bei gleicher Emissionsreduktion der gesamten EU, zu einer zusätzlichen Emissionsreduktion der ETS-Sektoren und einem gestiegenem Emissionsniveau der Nicht-ETS-Sektoren.

Innerhalb der Energienachfrage privater Haushalte wurde ein signifikanter Unterschied zwischen dem Fahrzeug- und Gebäudebereich ersichtlich. Während die CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Gebäudebereich kaum auf die klimapolitischen Preissignale reagieren, kommt es im motorisierten Individualverkehr zu einer beträchtlichen Ausweitung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Im Transportsektor scheint es im sektoralen Vergleich insgesamt schwieriger zu sein, fossile Brennstoffe durch kostengünstige Alternativen zu ersetzen.

Dagegen ist die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion im Stromsektor relativ kostengünstig. Dies eröffnet den Energieverbrauchern die Möglichkeit, die Verbrennung fossiler Brennstoffe durch die Verwendung von CO<sub>2</sub>-arm hergestelltem Strom in elektrischen Energieanwendungen zu substituieren.

Die Einführung eines sektorübergreifenden Emissionshandels führt insgesamt zu positiven volkswirtschaftlichen Nettoeffekten sowohl in der EU als auch weltweit. Für Süd- und Osteuropa ergeben sich allerdings BIP-Nachteile, da sie sich einer relativen Verteuerung ihrer Grenzvermeidungskosten im Vergleich zur nationalen Regulierung der Nicht-ETS-Sektoren gemäß „EU Effort Sharing Decision“ gegenübersehen.

Durch die Szenariodefinition wurde sichergestellt, dass das CO<sub>2</sub>-Emissionsniveau in der EU in beiden Szenarien identisch ist. Dennoch kommt es außerhalb der EU zu steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dies ist zum einen auf Carbon Leakage-Effekte zurückzuführen, wonach Teile der europäischen energieintensiven Industrie ins außereuropäische Ausland verlagert werden (z. B. nach Russland oder China). Zum anderen ist dies jedoch Ausdruck einer effizienteren Nutzung der weltweit verfügbaren Produktionsfaktoren, die einen relativen Einkommenszuwachs und dadurch bedingten allgemeinen Nachfrageanstieg ermöglicht, der zu mehr Produktion, mehr Einkommen und dadurch auch zu mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen führt.

Der Vergleich beider Modellversionen mit und ohne technologische Disaggregation der Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland hat gezeigt, dass die Einbettung technologischer Details zu größeren Rigiditäten und damit zu durchschnittlich höheren CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionskosten kommt als ohne deren Berücksichtigung.

## 5.2 Grenzen der Analyse

Die Aussagekraft der in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse ist vor dem Hintergrund der explizit sowie durch die Wahl der Methodik auch implizit getroffenen Annahmen zu beurteilen. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle basieren auf den neoklassischen Annahmen des Modells der vollständigen Konkurrenz, die in der Realität oft nicht zutreffen.<sup>273</sup> Zwar ist ein bestimmtes Maß an Realitätsferne eine immanente Eigenschaft eines jeden Modells.<sup>274</sup> Dennoch soll an dieser Stelle auf einige kritische Annahmen eingegangen werden, die für die Beurteilung der betrachteten Fragestellung relevant sind.

So impliziert die Annahme der unendlichen Reaktionsgeschwindigkeit, dass die Marktteilnehmer auf sämtliche Preissignale sofort und vollumfänglich reagieren. Dadurch werden mögliche Friktionen und Rigiditäten in Angebots- und Nachfrageanpassungen außer Acht gelassen. Zwar wird durch die in dieser Arbeit vorgenommene technologisch disaggregierte Modellierung der Energienachfrage privater Haushalte eine realitätsnähere Rigidität in einem Teil der Nachfrageseite abgebildet. Allerdings gilt dies nicht für die Angebotsseite. So könnte es bei Elektroautos beispielsweise sowohl Kapazitätsprobleme der Produktionsstandorte als auch zögerliches Verhalten auf Seiten der Käufer geben, die eine rasche Marktdurchdringung erschweren. Auch Ladeinfrastruktur und Reichweitenproblematik von Elektroautos werden im Modell nicht explizit erfasst.

Die Annahme der unendlichen Reaktionsgeschwindigkeit impliziert darüber hinaus das Fehlen sämtlicher Transaktionskosten. Diese können aber ein wesentliches Hindernis in Märkten darstellen. So wurde aus Gründen des administrativen Aufwands der Emissionshandel bislang nicht auf Kleinemittenten inklusive der privaten Haushalte ausgeweitet.<sup>275</sup>

Die Annahme der unbegrenzten Teilbarkeit von Gütern führt insbesondere im Stromsektor zu Problemen. Kraftwerke können im Modell in jeder beliebigen Größe immer und sofort gebaut werden. Es gibt keine festen Blockgrößen oder lange Planungs- und Genehmigungsverfahren. Auch der Stromtransport wird als linearer Kostenfaktor angesehen. Die Problematik von Netzengpässen (z. B. bei Kuppelkapazitäten) und die besondere Eigenschaft eines natürlichen Monopols wird außer Acht gelassen. Dies könnte zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Produktionskosten führen. Außerdem wurden die Kostenauswirkungen einer zunehmend dezentralen Stromerzeugung in Windkraft- und Photovoltaikanlagen nicht berücksichtigt.<sup>276</sup>

---

<sup>273</sup> Vgl. hierzu die Einwendungen gegen das Modell der vollständigen Konkurrenz in Fritsch et al., 2005, S. 63 ff.

<sup>274</sup> Modelle sind per definitionem stets Vereinfachungen der Realität.

<sup>275</sup> Ein Kompromiss könnte hier in der angesprochenen Upstream-Lösung liegen (vgl. Abschnitt 2.2.3.1), wonach nicht die Kleinemittenten direkt, sondern die Erdgas- und Mineralölimporteure bzw. -händler pro t CO<sub>2</sub> ein entsprechendes Zertifikat erwerben müssen, welches wiederum handelbar ist.

<sup>276</sup> Dies gilt insbesondere auch für die gesteigerten technischen Anforderungen an das Stromnetz durch sogenannte „Prosumer“. Ein „Prosumer“ ist in diesem Fall ein Konsument, der gleichzeitig einen Teil des konsumierten Stroms selber produziert (vgl. IEA-RETD, 2014). Dieses Verhalten ist insbesondere für die Stabi-

Die Annahme vollständiger Information trifft möglicherweise im Gebäudebereich nur selten zu. In der Realität dürfte die Anzahl der Hausbesitzer begrenzt sein, die stets vollumfänglich über die tatsächlichen Kapital- und Energiekosten ihrer Immobilie informiert sind, und darauf basierend rationale Investitionsentscheidungen treffen.<sup>277</sup> Die Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Energieträgerpreisentwicklung beeinträchtigt ebenfalls die Beurteilung, ob eine Investition vorteilhaft ist oder nicht bzw. wann sie sich amortisiert.

Die Annahme der Abwesenheit sachlicher oder räumlicher Präferenzen führt dazu, dass Fahrzeuge im Modell rein kostengetrieben gekauft werden. Das heißt, es gibt keine Präferenzen bezüglich einer bestimmten Marke und keine Käufe aus Statusgründen. Aber gerade der in der Realität zu beobachtende Kauf von Elektroautos, oder auch bestimmter Luxus-SUV, lässt sich rein kostenseitig nicht erklären, da vergleichbare Fahrzeuge derselben Klasse zum Teil deutlich günstiger sind. Dadurch könnte der Nutzen dieser Fahrzeuge unterschätzt bzw. die Kosten davon überschätzt werden.

Externe Effekte wurden in dem Modell nur teilweise internalisiert. So wurden lediglich energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen untersucht. Emissionen anderer Treibhausgase, wie Methan (CH<sub>4</sub>) oder Stickoxide (z. B. N<sub>2</sub>O), wurden genauso außer Acht gelassen wie Prozessemissionen, beispielsweise der energieintensiven Industrie. Auch die Feinstaubproblematik im Straßenverkehr wurde nicht berücksichtigt. Sie könnte ein weiteres Kaufargument für Elektroautos darstellen.

Die Annahme der konstanten Produktpalette (keine Produktinnovationen) und konstanten Produktionstechnik (keine Prozessinnovationen) vernachlässigt die Dynamik des technischen Fortschritts. Auch Lernkurveneffekte wurden mithilfe des exogen vorgegebenen AEEI-Index nur teilweise berücksichtigt. Tatsächlich können Innovationen aber zu sprunghaften Kostensenkungen führen und die Wirtschaftsstruktur grundsätzlich ändern.<sup>278</sup>

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind realwirtschaftliche Fundamentalmodelle. Geld- und Kreditmärkte werden vollständig ignoriert. Das Fehlen von monetären Größen, wie Zinsen, Inflation, Schulden, Aktien etc., schränken die Aussagekraft des betrachteten Wirtschaftskreislaufs ein, da diese relevante Entscheidungsparameter in Investitionsentscheidungen darstellen.

Auch die empirische Fundierung Allgemeiner Gleichgewichtsmodelle ist kritisch zu beurteilen. Die zugrundeliegenden Input-Output-Tabellen des Basisjahres (hier: 2007), das aufgrund

---

lität des Stromnetzes von Bedeutung. Über die technische Besonderheiten des „Prosumer“-Verhaltens und die Integration in den Strommarkt ist allerdings noch wenig bekannt (vgl. Flaute et al., 2015).

<sup>277</sup> Dieser Punkt ist relevant für die Diskussion politischer Handlungsoptionen in Abschnitt 5.3 unten, insbesondere zur Begründung von Standards.

<sup>278</sup> Vgl. hierzu die Auswirkungen und Möglichkeiten eines modellendogen behandelten technologischen Fortschritts in Zürn, 2010.

der zeitlichen Verzögerung der amtlichen Statistik zudem relativ weit zurückliegt, ist ein statischer Schnappschuss eines volkswirtschaftlichen Zustandes, sagt aber kaum etwas über die dynamischen Veränderungsprozesse aus.<sup>279</sup>

Ein weiterer kritischer Punkt ist die funktionale Form der unterstellten Produktionsfunktionen (hier: CES-Produktionsfunktionen) inklusive ihrer Parametrisierung. Die verwendeten Substitutionselastizitäten beeinflussen in nicht unerheblichem Maße die Modellergebnisse, in dem sie der Wirtschaft ihre Flexibilität und Substitutionsmöglichkeiten vorgeben. Je höher die Elastizität, desto einfacher ist es für die Wirtschaftssubjekte, auf Preis- und Kostenänderungen zu reagieren und desto geringer sind dadurch bedingte Wohlfahrtseinbußen. Ein Eindruck über die Bedeutung der in dieser Arbeit vorgenommenen Modellierung und Parametrisierung konnte anhand des Exkurses in Abschnitt 4.2.3 gewonnen werden, in dem der zweite Teil der modellgestützten Analyse mithilfe einer Modellversion ohne technologische Disaggregation durchgeführt wurde. Dennoch wären weitere Variationen sinnvoll. So dürften auch die unterstellten Armington-Elastizitäten eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der Entstehung von Carbon Leakage spielen, da sie die internationale Handelbarkeit der im Modell betrachteten Produktionsgüter vorgeben und somit die Intensität möglicher Produktionsverlagerungen mit beeinflussen.

Neben den impliziten Annahmen des verwendeten Allgemeinen Gleichgewichtsansatzes spielt letztlich auch die konkrete Szenariodefinition eine wesentliche Rolle für die Aussagekraft der Ergebnisse. Ziel beim Instrumentenvergleich war es, explorativ vorzugehen, und die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der bestehenden bzw. diskutierten Instrumente zu analysieren. Dies sagt aber wenig über die grundsätzlichen Eigenschaften der unterschiedlichen Instrumente aus, sondern nur über die Auswirkungen der konkret modellierten Ausgestaltung. Hier wurde also nur eine Ein-Punkt-Analyse durchgeführt. Eine Parametervariation, wie beispielsweise die Ausdehnung der CO<sub>2</sub>-Steuer auf die gesamte EU oder andere parametrisierte Fördersätze, könnte andere Ergebnisse hervorbringen. Das betrifft auch verschiedene Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Instrumente, wie beispielsweise die Kombination aus Standards und Förderinstrumenten, die bereits zum Teil Realität sind. Um zu einem vollumfänglichen Verständnis über die Funktionsweise der klimapolitischen Instrumente zu kommen, müssten auch hier weitere Analysen durchgeführt werden.

Der methodische Ansatz der hybriden Modellierung, das heißt die Einbettung technologischer Details in ein ökonomisches Top-down-Modell, bildet die tatsächlichen Mechanismen möglicherweise nur unvollständig ab. Es ist unklar, in welchen Situationen eine Modellkoppelung eines reinen Top-down-Modells mit einem reinem Bottom-up-Modell (z. B. einem Gebäude- oder Transport- bzw. einem Energiesystemmodell) nicht einem hybriden Modellansatz überlegen ist.

---

<sup>279</sup> Ökonometrische Modelle können diese Veränderungsprozesse häufig besser einfangen. Allerdings weisen sie wiederum andere Nachteile auf (vgl. Abschnitt 2.4.3 oben).

Ein wichtiger Aspekt sind des Weiteren auch die Annahmen der internationalen bzw. außereuropäischen Klimapolitik, die wesentliche Auswirkungen auf die (globale) Kostenwirksamkeit europäischer Klimapolitik ausübt.

Schließlich stellen die hier durchgeführten Modellrechnungen keine Prognosen dar, sondern lediglich Projektionen eines bestimmten volkswirtschaftlichen Zustands unter einer angenommen zeitlichen Entwicklung. Konjunkturelle Schwankungen können dadurch nicht berücksichtigt werden.

### **5.3 Diskussion wirtschaftspolitischer Handlungsoptionen**

Vor dem Hintergrund der gewonnenen Ergebnisse und ihrer Schwächen hinsichtlich der praktischen Relevanz schließt sich die Frage nach den politischen Handlungsoptionen an. Welche wirtschaftspolitischen Empfehlungen lassen sich für die klimapolitische Regulierung der privaten Haushalte ableiten?

Die Modellrechnungen haben gezeigt, dass die Etablierung eines funktionsfähigen Preismechanismus für CO<sub>2</sub> elementar ist, um die externen Effekte von CO<sub>2</sub>-Emissionen effizient zu internalisieren und dem Verursacherprinzip gerecht zu werden. Die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sollte schließlich dort stattfinden, wo sie am kostengünstigsten möglich ist. Da niemand die individuellen Grenzvermeidungskosten aller Wirtschaftssubjekte kennt, ist ein dezentraler Marktmechanismus, in dem jedes Wirtschaftssubjekt selbst über sein eigenes Maß an Emissionsvermeidung entscheidet, essentiell.

Marktbasierte Instrumente stehen somit aus ökonomischer Sicht an erster Stelle wirtschaftspolitischer Handlungsempfehlungen. Ob per Steuer oder Emissionshandel ist letztlich eine Abwägung zwischen Mengenrisiko (CO<sub>2</sub>-Steuer), Preisrisiko (Emissionshandel) und Transaktionskosten. Letztere entstehen bei der CO<sub>2</sub>-Steuer durch hohe Suchkosten, da der „richtige“ Steuersatz im Vorfeld nicht bekannt ist. Der Emissionshandel bringt dagegen hohe Transaktionskosten mit sich, da jeder Marktteilnehmer mit Zertifikaten ausgestattet werden und diese aktiv handeln muss. Dies könnte ein zentrales Argument gegen die Ausweitung des Emissionshandels auf private Haushalte sein.

Ein Upstream-Handel hätte bei privaten Haushalte den gleichen Effekt wie eine CO<sub>2</sub>-Steuer, da diese nicht im Besitz der Zertifikate wären und diese auch nicht verkaufen könnten, sondern nur das Preissignal sähen. Im Gegensatz zu einer CO<sub>2</sub>-Steuer gäbe es allerdings eine CO<sub>2</sub>-Emissionsobergrenze, die das Mengenrisiko beseitigt.

Standards sollten hingegen nur in Ausnahmefällen etabliert werden. Zum einen schränken sie die Wahlfreiheit massiv ein. Zum anderen erfordern sie sowohl einen hohen Informationsaufwand, um die „optimalen“ Standards zu setzen, als auch einen Kontrollaufwand, um die Einhaltung der Standards zu überprüfen. Im Falle eines hohen Ausmaßes unvollständiger Information können sie aber helfen, die Kaufentscheidungen der Marktteilnehmer in die gewünschte Richtung zu lenken. Gerade im Gebäudebereich dürfte die Informationsunvoll-

kommenheit hoch sein, da u. a. lange Amortisationszeiten die Investitionsaktivitäten hemmen. Im Fahrzeugbereich könnte eine Verteuerung fossiler Kraftstoffe für einkommensschwache Haushalte eine hohe Belastung sein, da sie wenig Ausweichmöglichkeiten haben. Falls diese Verteilungsproblematik gesellschaftlich unerwünscht ist, könnten CO<sub>2</sub>-Grenzwerte helfen, den Spritverbrauch automatisch durch den Kauf zu senken.

Förderinstrumente müssen vor dem Hintergrund einer kosteneffizienten CO<sub>2</sub>-Emissionsvermeidung ebenfalls zweitrangig beurteilt werden, da sie nicht an der eigentlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsquelle, sondern beim Kauf ansetzen. Zwar könnten sie unter Umständen gerechtfertigt sein, wenn unvollständige Informationen vorliegen. Gerade bei Neubauten und Sanierungen bestehen erhebliche Unsicherheiten bzgl. der zukünftigen Entwicklung kalkulatorischer Einnahmen und Ausgaben. Auch könnten sie als Alternative zu marktbasierten Instrumenten gerechtfertigt sein, wenn letztere durch die induzierten Preissteigerungen zu signifikanten Einkommenseinbußen bestimmter Haushaltsgruppen führten („Energiearmut“). Bei Förderinstrumenten besteht allerdings eine erhebliche Gefahr von Mitnahmeeffekten, wenn diejenigen Käufer die Prämie bekommen, die den Kauf auch ohne Prämie getätigt hätten. In diesem Falle wären die volkswirtschaftlichen Mittel (z. B. Steuergelder) nicht effizient eingesetzt. Generell spielt die Frage nach den volkswirtschaftlichen Opportunitäten von Fördermitteln eine wichtige Rolle. Dagegen ist nicht klar, ob die direkte, belohnende Wirkung von Förderinstrumenten für die zielorientierte Lenkung von Vermeidungsentscheidungen der Wirtschaftssubjekte größer ist als der bestrafende und dadurch indirekt wirkende Charakter von Steuern. Sollte im politischen Prozess ein derart bestrafender Charakter einer Verteuerung fossiler Energieträger als gesellschaftlich inakzeptabel eingestuft werden, wären Standards und Förderinstrumente marktbasierten Instrumenten vorzuziehen.

Im Zusammenhang mit der angesprochenen Rechtfertigung von Standards und Förderinstrumenten aus Gründen möglicher Informationsasymmetrien stellt sich die Frage, ob sich ein Teil der unvollständigen Informationen nicht ggf. anders, kostengünstiger beseitigen ließen, beispielsweise durch Informationskampagnen bzw. Bildungsangebote im Allgemeinen. Andere Unsicherheiten, wie die zukünftige Energiepreisträgerentwicklung sind dagegen schwieriger zu beseitigen, da sie schwer zu prognostizieren sind.

Darüber hinaus sollte international koordinierte Klimapolitik oberste Priorität haben. Darunter ist wiederum ein gesamteuropäischer Ansatz einem nationalen Ansatz vorzuziehen, insbesondere bei marktbasierten Instrumenten, da so über die gestiegene Anzahl der Marktteilnehmer und dadurch die Aufteilung der Vermeidungsaktivitäten bzw. der Ausgleich der Grenzvermeidungskosten effizienter erfolgt. Dieser Effizienzgewinn kann wiederum verwendet werden, um einen Ausgleich zwischen möglichen Gewinnern und Verlierern eines internationalen Emissionshandelsregimes bzw. einer international koordinierten Klimapolitik herzustellen (vgl. beispielsweise Deutschland vs. EU-Ost in Abbildung 4-20 bzw. Abschnitt 4.2.2).



Was Carbon Leakage angeht, ist zu entscheiden, welche Vorteile mit der industriellen Basis in Deutschland verbunden sind, die über rein kostenseitige Überlegungen oder auch reine Arbeitsplatzeffekte hinausgehen.<sup>280</sup>

#### 5.4 Weiterer Forschungsbedarf

Aus den oben dargestellten Ausführungen ist weiterer Forschungsbedarf abzuleiten. An erster Stelle stehen Sensitivitätsanalysen der sowohl im Modell als auch anhand der Szenariodefinition getroffenen Parametrisierung. Sie sind wichtig, um einen vollumfänglichen Eindruck, über unterschiedliche Ausgestaltungen der betrachteten klimapolitischen Instrumente zu gewinnen. Für Sensitivitätsanalysen der grundlegenden Modellannahmen bietet sich zunächst eine Variation der exogen definierten Substitutionselastizitäten an, um unterschiedliche Flexibilitätsgrade zu untersuchen und die Robustheit der gewonnenen Ergebnisse zu überprüfen.<sup>281</sup> Des Weiteren spielen die exogenen, dynamischen Wachstumsannahmen hinsichtlich der regionsspezifischen Entwicklung des Erwerbspersonenpotentials und der Faktorproduktivitäten (einschließlich der Energieeffizienzentwicklung) eine wichtige Rolle. In Bezug auf die Ausgestaltung der Szenariodefinition sollten verschiedene Förder- und CO<sub>2</sub>-Steuersätze sowie eine unterschiedliche Verschärfung der Standards im Laufe der Zeit untersucht werden. Auch eine Kombination der untersuchten Instrumente dürfte weitere Erkenntnisse liefern, um die Bedeutung des in der Realität vorzufindenden Instrumentenmixes zu bestimmen.

Außerdem ist es gerade für eine globale Herausforderung, wie dem Klimawandel, elementar, alle Emittenten weltweit in die Pflicht zu nehmen. Das heißt, die volkswirtschaftlichen Auswirkungen unterschiedlicher klimapolitischer Regimes in Deutschland und der EU sind hochgradig davon abhängig, welche Anstrengungen der Rest der Welt in Sachen Klimaschutz unternimmt. Würde dies weltweit gleichmäßig geschehen, würden die Gefahren für Carbon Leakage bedingte Produktionsverlagerungen minimiert und letztlich auch die volkswirtschaftlichen Kosten innerhalb Deutschlands und der EU reduziert. Insbesondere aus ökonomischer Sicht wäre es interessant zu analysieren, wie eine weltwirtschaftlich optimale Verteilung der Emissionsvermeidungsaktivitäten aussieht, wenn ein weltweit einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis etabliert würde.

Aus methodischer Sicht ist zu klären, in welchen Situationen eine Modellkopplung zwischen Top-down- und Bottom-up-Modellen (z. B. einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell mit einem Energiesystemmodell) dem hier verfolgten hybriden Modellansatz vorzuziehen ist. Dazu sollten verschiedene Ansätze im Rahmen eines Modellvergleichs gegenüber gestellt

---

<sup>280</sup> Es gibt Hinweise darauf, dass ein zu hoher Schutz der energieintensiven Industrien vor klimapolitischen Kosten, aufgrund volkswirtschaftlicher Opportunitäten, zu mehr Arbeitsplatzverlusten führen könnte, als dadurch in der energieintensiven Industrien aufrecht erhalten werden (vgl. Beestermöller & Fahl, 2013). Das bedeutet, dass Ausnahmeregelungen in der energieintensiven Industrie anders begründet werden müssten, als durch die nicht gesicherte Arbeitsplatzhypothese. Dies könnten z. B. nicht marktbasierende Vorteile von Wertschöpfungsklustern sein (vgl. u.a. Berrer et al., 2011).

<sup>281</sup> Die Parametrisierung der Substitutionselastizitäten findet sich in Anhang A.1.

werden, um daraus Rückschlüsse über die Vor- und Nachteile des einen oder anderen Ansatzes für bestimmte Problem- und Fragestellungen ziehen zu können.

Ein weiterer untersuchungswürdiger Aspekt ist eine mögliche Asymmetrie von Steuern und Förderinstrumenten. Ist Belohnung in Form von Förderinstrumenten aus psychologischer Sicht effektiver als Bestrafung in Form von Energie- oder CO<sub>2</sub>-Steuern? Dies würde helfen zu verstehen, ob Förderinstrumente möglicherweise besser geeignet sind, die ökonomischen Entscheidungen der Wirtschaftssubjekte zu lenken als Steuern.

Schließlich sind auch die energietechnischen Herausforderungen der Energiewende in zukünftige volkswirtschaftliche Analysen miteinzubeziehen. Dazu zählt beispielsweise die adäquate Erfassung des „Prosumer“-Verhaltens, welches insbesondere für die Netzstabilität eine wichtige Herausforderung darstellt. Letztlich geht es dabei um die Frage nach einer möglichen Abschätzung bzw. Berücksichtigung zukünftiger (energietechnischer) Innovationen im Allgemeinen.

Nicht zuletzt bietet es sich an, die Verteilungswirkungen zwischen einzelnen Wirtschaftssubjekten, wie beispielsweise Mietern und Eigentümern, oder Arbeitsplatzgewinne und -verluste verschiedener Wirtschaftssektoren verstärkt zu untersuchen, um auch die Vorgänge jenseits aggregierter makroökonomischer Indikatoren zu verstehen. Das beinhaltet auch die Frage nach einem Ausgleich zwischen möglichen Gewinnern und Verlierern eines sektorübergreifenden EU-weiten oder globalen Emissionshandelsregimes bzw. einer international koordinierten Klimapolitik, sowohl auf Landes- als auch auf Sektorebene.

**Literaturverzeichnis**

- Abrell (2009)** Abrell, J.: „Transport under Emission Trading - A Computable General Equilibrium Assessment“, Fakultät Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Dresden, Dissertation, (November 2009).
- Abrell (2010)** Abrell, J.: „Regulating CO<sub>2</sub> emissions of transportation in Europe: A CGE-analysis using market-based instruments“, In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15 (2010), Nr. 4, S. 235–239.
- ADAC (2014)** Allgemeiner Deutsche Automobil-Club e. V. (ADAC): „ADAC Autokosten 2014 - Kostenübersicht über 1.800 aktuelle Neuwagen-Modelle“, Stand: 04/2014, ADAC Fahrzeugtechnik, (2014).
- ADAC (2016)** Allgemeiner Deutsche Automobil-Club e. V. (ADAC): „Autodatenbank - Autodaten & Autokosten“ (2016), URL: <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/default.aspx>, Überprüfungsdatum 22.03.2016.
- Armington (1969)** Armington, P. S.: „A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production“, In: *IMF Staff Papers* 16 (1969), Nr. 1, S. 159–178.
- Arrow et al. (1961)** Arrow, K. J.; Chenery, H. B.; Minhas, B. S.; Solow, R. M.: „Capital-labor substitution and economic efficiency“, In: *The Review of Economics and Statistics* 43 (1961), Nr. 3, S. 225–250., Überprüfungsdatum 01.03.2016.
- Arrow & Debreu (1954)** Arrow, K. J.; Debreu, G.: „Existence of an equilibrium for a competitive economy“, In: *Econometrica* 22 (1954), Nr. 3, S. 265–290.
- Autobild (2015)** Autobild: „Autokatalog - Marken und Modelle“ (2015), URL: <http://www.autobild.de/marken-modelle>, Überprüfungsdatum 19.03.2016.
- Automotive News Europe (2015)** Automotive News Europe: „European automakers call for CO<sub>2</sub> emissions delay“ (Juni 2015), URL: <http://europe.autonews.com/article/20150626/ANE/150629984/european-automakers-call-for-co2-emissions-delay>. – Aktualisierungsdatum: 2015-06-26, Überprüfungsdatum 29.03.2016.
- Avi-Yonah & Uhlmann (2009)** Avi-Yonah, R. S.; Uhlmann, D. M.: „Combating global climate change: Why a carbon tax is a better response to global warming than cap and trade“, In: *Stanford Environmental Law Journal* 28 (2009), Nr. 3
- BDEW (2015)** Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): „Strompreisanalyse März 2015“, Berlin (März 2015).
- Beestermöller et al. (2013)** Beestermöller, R.; Blesl, M.; Kuder, R.; Fahl, U.: „Energie- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Nutzung von Erdgas in Deutschland“, eine Studie für das Zentrum für Energieforschung Stuttgart (ZfES) Projekt 24 (IER), (August 2013).
- Beestermöller et al. (2014)** Beestermöller, R.; Blesl, M.; Fahl, U.: „Linking TIMES-PanEU and NEWAGE: Energy and macroeconomic impacts of decentralization trends in the European electricity sector“, Presentation to the TIMES-CGE Workshop at the 66th Semi-annual ETSAP meeting in Copenhagen, (19. November 2014).
- Beestermöller & Abrell (2012)** Beestermöller, R.; Abrell, J.: „Macroeconomic Assessment of Vehicle Carbon Policies Using a Transport-CGE-Model for Germany“, Conference

paper at 12th IAEE European Energy Conference, Ca' Foscari University, Venice (10-12 September 2012).

- Beestermöller & Fahl (2013)** Beestermöller, R.; Fahl, U.: „Impacts of German energy policies on the competitiveness of national energy intensive industries“, Fullpaper at the EcoMod2013 International Conference on Economic Modeling, Czech University of Life Sciences, Prague (1-3 July 2013).
- Beestermöller & Fahl (2015)** Beestermöller, R.; Fahl, U.: „Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökonomie in Baden-Württemberg“, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, Endbericht für das Projekt „Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg“ (KLIMOPASS), gefördert vom Land Baden-Württemberg, (Oktober 2015).
- Berg (2007)** Berg, C.: „Household Transport Demand in a CGE-framework“, In: *Environmental and Resource Economics* 37 (2007), Nr. 3, S. 573–597.
- Berlemann (2005)** Berlemann, M.: „Makroökonomik - Modellierung, Paradigmen und Politik“, Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (Springer-Lehrbuch).
- Berrer et al. (2011)** Berrer, H.; Borrmann, J.; Grohall, G.; Helmenstein, C.; Kleissner, A.: „Volkswirtschaftliche Bedeutung der Cluster Niederösterreich“, Economica Institut für Wirtschaftsforschung, Studie im Auftrag von ecoplus, Wien (November 2011).
- Bibas et al. (2015)** Bibas, R.; Méjean, A.; Hamdi-Cherif, M.: „Energy efficiency policies and the timing of action: An assessment of climate mitigation costs“, In: *Technological Forecasting and Social Change* 90 (2015), S. 137–152.
- Blanchflower & Oswald (1995)** Blanchflower, D. G.; Oswald, A. J.: „An introduction to the wage curve“, In: *The journal of economic perspectives* 9 (1995), Nr. 3, S. 153–167.
- BMUB (2009)** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): „Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO<sub>2</sub> - Emissionen von Personenkraftwagen“ (2009), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), URL: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu\\_verordnung\\_co2\\_emissionen\\_pkw.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf), Überprüfungsdatum 01.03.2016.
- BMUB (2014)** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 Eckpunkte des BMUB“, Berlin (28. April 2014).
- BMUB (2016a)** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): „Die Klimakonferenz in Paris“, Hintergrundpapier, (21. April 2016).
- BMUB (2016b)** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): „Hendricks: Der weltweite Klimaschutz bekommt ein Grundgesetz“, Pressemitteilung Nr. 267/16, 3. November 2016, Berlin.
- BMWi (2011)** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Eine Zielarchitektur für die Energiewende: Von politischen Zielen bis zu Einzelmaßnahmen“, Berlin (2011), URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiewende/zielarchitektur.html>
- BMWi (2014a)** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Energie der Zukunft - Zweiter Monitoring-Bericht“, Berlin (März 2014).

- BMWi (2014b)** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Mehr aus Energie machen - Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz“, Berlin (Dezember 2014).
- BMWi (2015a)** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Baustein für die Energiewende: 7 Eckpunkte für das „Verordnungspaket Intelligente Netze““, Berlin (9. Februar 2015).
- BMWi (2015b)** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Energie der Zukunft - Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende“, Berlin (November 2015).
- BMWi (2016)** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Bundesminister Gabriel: Kaufprämie ist ein wichtiges Aufbruchsignal für Elektromobilität“ (27.04.2016), URL: <https://www.bmwi.de/DE/Themen/industrie,did=764824.html>. – Aktualisierungsdatum: 2016-04-27, Überprüfungsdatum 07.06.2016.
- Böhringer (1996)** Böhringer, C.: „Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der energie- und umweltpolitischen Analyse - Theoretische Grundlagen und empirische Anwendung“, Frankfurt am Main [u.a.] : Lang, 1996.
- Böhringer (1998)** Böhringer, C.: „The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling“, In: *Energy Economics* 20 (1998), Nr. 3, S. 233–248.
- Böhringer (1999)** Böhringer, C.: „Die Kosten von Klimaschutz - Eine Interpretationshilfe für die mit quantitativen Wirtschaftsmodellen ermittelten Kostenschätzungen“, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung Mannheim (ZEW), ZEW Discussion Paper 99-20, (1999).
- Böhringer & Rutherford (2005)** Böhringer, C.; Rutherford, T. F.: „Integrating Bottom-Up into Top-Down: A Mixed Complementarity Approach“, ZEW - Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung / Center for European Economic Research, ZEW Discussion Papers 05-28, (2005).
- Böhringer & Rutherford (2008)** Böhringer, C.; Rutherford, T. F.: „Combining bottom-up and top-down“, In: *Energy Economics* 30 (2008), Nr. 2, S. 574–596.
- Böhringer & Rutherford (2009)** Böhringer, C.; Rutherford, T. F.: „Integrated assessment of energy policies: Decomposing top-down and bottom-up“, In: *Journal of Economic Dynamics and Control* 33 (2009), Nr. 9, S. 1648–1661.
- Böhringer & Schwager (2003)** Böhringer, C.; Schwager, R.: „Die Ökologische Steuerreform in Deutschland - ein umweltpolitisches Feigenblatt“, In: *Perspektiven der Wirtschaftspolitik* 4 (2003), Nr. 2, S. 211–222.
- Böhringer & Wiegard (2003)** Böhringer, C.; Wiegard, W.: „Methoden der angewandten Wirtschaftsforschung: Eine Einführung in die numerische Gleichgewichtsanalyse“, ZEW Discussion Paper 03-02, Mannheim (2003).
- Bosello et al. (2010)** Bosello, F.; Carraro, C.; Cian, E. de: „Climate policy and the optimal balance between mitigation, adaptation and unavoided damage“, In: *Climate Change Economics* 01 (2010), Nr. 02, S. 71–92.
- BReg (2006)** Deutsche Bundesregierung (BReg): *Gesetz zur Neuregelung der Besteuerung von Energieerzeugnissen und zur Änderung des Stromsteuergesetzes - vom 15. Juli 2006* (in Kraft getr. am 19. Juli 2006), In: *Bundesgesetzblatt* (19. Juli 2006), Teil I Nr. 33, S. 1534–1561.
- BReg (2007a)** Deutsche Bundesregierung (BReg): *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) vom 24. Juli 2007*(idF v. Art. 3 V v. 24.10.2015),

- In: *Bundesgesetzblatt* 2007 (26. Juli 2007), Teil I Nr. 34, URL: [http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/media/4127463B69BA1D13EB99AE17864E6A10/bgbl107s1519\\_68802.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/media/4127463B69BA1D13EB99AE17864E6A10/bgbl107s1519_68802.pdf), Überprüfungsdatum 20.11.2015.
- BReg (2007b)** Deutsche Bundesregierung (BReg): „Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm (IEKP)“, Kabinettsklausur in Meseberg, (23./24. August 2007).
- BReg (2008)** Deutsche Bundesregierung (BReg): *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG) vom 7. August 2008*(idF v. Art. 9 G vom 20. Oktober 2015), In: *Bundesgesetzblatt* 2008 (18. August 2008), Teil I Nr. 36, S. 1658–1665, URL: [http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/media/4127463B69BA1D13EB99AE17864E6A10/bgbl108s1658\\_54919.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/media/4127463B69BA1D13EB99AE17864E6A10/bgbl108s1658_54919.pdf), Überprüfungsdatum 20.11.2015.
- BReg (2010)** Deutsche Bundesregierung (BReg): „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“, Berlin (28.09.2010).
- BReg (2011)** Deutsche Bundesregierung (BReg): „Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher, bezahlbar und umweltfreundlich“, Berlin (2011), URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiekonzept-2010-beschluesse-juni-2011,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, Überprüfungsdatum 10.11.2015.
- BReg (2015a)** Deutsche Bundesregierung (BReg): „Regierungserklärung von Bundeskanzlerin Merkel zum Europäischen Rat am 19. und 20. März 2015“, Deutscher Bundestag, Berlin (19. März 2015), URL: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Regierungserklaerung/2015/2015-03-19-regierungserklearung.html>. – Aktualisierungsdatum: 2015-03-19, Überprüfungsdatum 10.11.2015.
- BReg (2015b)** Deutsche Bundesregierung (BReg): *Gesetz zur Dämpfung des Mietanstiegs auf angespannten Wohnungsmärkten und zur Stärkung des Bestellerprinzips bei der Wohnungsvermittlung (Mietrechtsnovellierungsgesetz - MietNovG) - vom 21. April 2015* (in Kraft getr. am 27. April 2015), In: *Bundesgesetzblatt* 2015 (27. April 2015), Teil I Nr. 16, S. 610–612, URL: [http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/media/6D38E001000E05370324FBB58B11DDDE/bgbl115s0610\\_107589.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/media/6D38E001000E05370324FBB58B11DDDE/bgbl115s0610_107589.pdf), Überprüfungsdatum 23.11.2015.
- BReg (2015c)** Deutsche Bundesregierung (BReg): „Eckpunkte für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende - Politische Vereinbarungen der Parteivorsitzenden von CDU, CSU und SPD vom 1. Juli 2015“, Berlin (1. Juli 2015).
- BReg (2015d)** Deutsche Bundesregierung (BReg): „Energieeffizienzstrategie Gebäude - Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand“, Berlin (November 2015).
- Breyer (2005)** Breyer, F.: „Mikroökonomik - Eine Einführung“, 2., verb. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch).
- Briem & Fahl (2004)** BRIEM, Sebastian (Hrsg.); FAHL, Ulrich (Hrsg.): „Ansätze zur Modellierung von Beschäftigungseffekten in Energiesystemen“, Workshop des Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland am 19.1.2004 im Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Bonn, Proceedings, Berlin : Mensch und Buch Verl., 2004.

- Bruchof (2012)** Bruchof, D.: „Energiewirtschaftliche Verkehrsstrategie - Möglichkeiten und Grenzen alternativer Kraftstoffe und Antriebe in Deutschland und der EU-27“, Universität Stuttgart, IER Forschungsbericht Band 109, Stuttgart (2012).
- BTag (2011)** Deutscher Bundestag (BTag): *Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes - vom 31.07.2011*, In: *Bundesgesetzblatt* ausgegeben zu Bonn (5. August 2011), Teil I Nr. 43, S. 1704–1705.
- Büchs & Schnepf (2013)** Büchs, M.; Schnepf, S. V.: „Who emits most? Associations between socio-economic factors and UK households' home energy, transport, indirect and total CO2 emissions“, In: *Ecological Economics* 90 (2013), S. 114–123.
- Bundeskartellamt (2012)** Bundeskartellamt: „Sektoruntersuchung Fernwärme - Abschlussbericht gemäß § 32e GWB“, Bonn (August 2012).
- BVEK (2015)** BVEK: „Erweiterung des EU-ETS um die Kraftstoffe des Straßenverkehrs - Die Lösung der Probleme der deutschen als auch der EU-Klimaschutzpolitik“, Bundesverband Emissionshandel und Klimaschutz (BVEK), (10.06.2015).
- Bye et al. (2015)** Bye, B.; Fæhn, T.; Rosnes, O.: „Residential energy efficiency and European carbon policies - A CGE-analysis with bottom-up information on energy efficiency technologies“, Statistics Norway, Research Department, Discussion papers No. 817, (August 2015).
- Callonnec et al. (2013)** Callonnec, Gael; Landa, Gisela; Malliet, Paul; Reynès, Frédéric; Yeddar-Tamsamani, Yasser: „A full description of the Three-ME model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy“ (1. März 2013), French Economic Observatory (OFCE) / French Environment and Energy Management Agency (ADEME) / Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), URL: <http://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/documents/threeme/doc1.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2013-03-01, Überprüfungsdatum 07.12.2015.
- Capros et al. (2013)** Capros, P.; van Regemorter, D.; Paroussos, L.; Karkatsoulis, P.: „GEM-E3 Model Documentation“, Joint Research Centre (JRC), Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), JRC Technical Reports, (2013).
- Capros (2014)** Capros, P.: „PRIMES-TREMOVE Transport Model - 2013-2014“, E3MLab/ICCS at National Technical University of Athens, Detailed model description, Athen (2014).
- Cassen et al. (2010)** Cassen, C.; Guivarch, C.; Rozenberg, J.; Hourcade, J.-C.: „D5.1: The IMACLIM-R model, a modelling framework to simulate sustainable development pathways“, AUGUR WP5 : Energy, primary resources and environmental challenges, (April 2010).
- Chambwera et al. (2014)** Chambwera, M.; Heal, G.; Dubeux, C.; Hallegatte, S.; Leclerc, L.; Markandya, A.; McCarl, B. A.; Mechler, R.; Neumann, J. E.: „Economics of adaptation“. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK, New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2014, S. 945–977.
- Conrad (2000)** Conrad, K.: „Energy Tax and Competition in Energy Efficiency: The Case of Consumer Durables“, In: *Environmental and Resource Economics* 15 (2000), Nr. 2, S. 159–177.

- Conrad & Schröder (1991)** Conrad, K.; Schröder, M.: „Demand for Durable and Nondurable Goods, Environmental Policy and Consumer Welfare“, In: *Journal of Applied Econometrics* 6 (1991), Nr. 3, S. 271–86.
- Coussy et al. (2015)** Coussy, P.; Portenart, P.; Afriat, M.: „Greenhouse gas emissions in the road transport sector: moving towards inclusion in the European system of CO2 allowances?“, IFP Energies nouvelles (IFPEN); CDC Climat, Panorama 2015 - Technical report, (2015).
- DAT (2008)** Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): „DAT-Report 2008“, kfz-betrieb Dossier, Ostfildern (April 2008).
- DEHSt (2008)** Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (DEHSt): „Carbon Leakage - Die Verlagerung von Produktion und Emissionen als Herausforderung für den Emissionshandel?“, Berlin (Oktober 2008).
- DEHSt (2014a)** Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (DEHSt): „Europäischer Emissionshandel 2013-2020“, Factsheet, Berlin (April 2014).
- DEHSt (2014b)** Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (DEHSt): „Stärkung des Emissionshandels - Diskussionsbeitrag zur Ausgestaltung der Marktstabilitätsreserve (MSR)“, Berlin (Oktober 2014).
- De-IPCC (2014)** Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (De-IPCC): „Kernbotschaften des Syntheseberichts des Fünften IPCC-Sachstandsberichts“, herausgegeben vom Bundesumweltministerium (BMUB), vom Bundesforschungsministerium (BMBF), dem Umweltbundesamt (UBA) und der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle (De-IPCC), (2.11.2014).
- depi (2016)** Deutsches Pelletinstitut GmbH (depi): „Brennstoffkostenentwicklung von Gas, Öl und Pellets“ (2016), URL: [http://www.depi.de/media/filebase/files/infothek/images/DEPI\\_Brennstoffkostenentwicklung-Gas\\_Oel\\_Pellets.jpg](http://www.depi.de/media/filebase/files/infothek/images/DEPI_Brennstoffkostenentwicklung-Gas_Oel_Pellets.jpg), Überprüfungsdatum 22.03.2016.
- DEPI (2016)** Deutscher Energieholz - und Pellet-Verband e.V. (DEPI): „Brennstoffkosten in Deutschland“ (Februar 2016), Deutscher Energieholz - und Pellet-Verband e.V. (DEPI), URL: <http://www.depi.de/media/filebase/files/infothek/images/Brennstoffkosten-Deutschland.jpg>. – Aktualisierungsdatum: Februar 2016, Überprüfungsdatum 29.02.2016.
- Destatis (2008a)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Mikrozensus - Zusatzerhebung 2006 - Bestand und Struktur der Wohneinheiten; Wohnsituation der Haushalte. *Bauen und Wohnen*“. – Bauen und Wohnen, Fachserie 5 / Heft 1, Wiesbaden (9. April 2008).
- Destatis (2008b)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Bautätigkeit 2007. *Bautätigkeit und Wohnungen*“. – Bautätigkeit und Wohnungen, Fachserie 5 / Reihe 1 , Artikelnummer 205010007700, Wiesbaden (11. August 2008).
- Destatis (2008c)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Energieverbrauch der privaten Haushalte - Wohnen, Mobilität, Konsum und Umwelt“, Begleitmaterial zur Pressekonferenz, Berlin (5. November 2008).
- Destatis (2010)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2010 - Teil 2: Energie, Rohstoffe. *Umweltnutzung und Wirtschaft*“. – Umweltnutzung und Wirtschaft, Artikelnummer: 5850007107006, Wiesbaden (17. November 2010).



- Destatis (2011)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Weiterentwicklung der Berechnungen zum Energieverbrauch und zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs im Rahmen des NAMEA-Rechenansatzes - Methodenbericht. *Umweltökonomische Gesamtrechnungen*“. – Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Artikelnummer: 5850009119004, Wiesbaden (Februar 2011).
- Destatis (2014a)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Anlagevermögen nach Sektoren 2013 - Arbeitsunterlage. *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen*“. – Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Artikelnummer: 5816101147004, Wiesbaden (September 2014).
- Destatis (2014b)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2014. *Umweltnutzung und Wirtschaft*“. – Umweltnutzung und Wirtschaft, Artikelnummer: 5850001-14700-4 [PDF], Wiesbaden (11. Dezember 2014).
- Destatis (2014c)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2014 - Teil 2: Energie. *Umweltnutzung und Wirtschaft*“. – Umweltnutzung und Wirtschaft, Artikelnummer: 5850007147006, Wiesbaden (11. Dezember 2014).
- Destatis (2014d)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2014 - Teil 3: Anthropogene Luftemissionen. *Umweltnutzung und Wirtschaft*“. – Umweltnutzung und Wirtschaft, Artikelnummer: 5850007147006, Wiesbaden (11. Dezember 2014).
- Destatis (2015a)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Inlandsproduktsberechnung - Lange Reihen ab 1970“, Fachserie 18 Reihe 1.5, Artikelnummer: 2180150157005, Wiesbaden (Februar 2015).
- Destatis (2015b)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Haushalte und Familien. *Ergebnisse des Mikrozensus*“. – Ergebnisse des Mikrozensus, Fachserie 1 Reihe 3, Artikelnummer: 2010300147004, Wiesbaden (29. Juli 2015).
- Destatis (2015c)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Input-Output-Rechnung - 2011 (Revision 2014). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen*“. – Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Fachserie 18 Reihe 2, Wiesbaden (10. August 2015).
- Destatis (2015d)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie - Lange Reihen ab 1980. *Bauen und Wohnen*“. – Bauen und Wohnen, Artikelnummer: 5311001147005, (14.08.2015).
- Destatis (2015e)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen (VGR) - Qualitätsbericht“, Wiesbaden (September 2015).
- Destatis (2016)** Statistisches Bundesamt (Destatis): „Preise - Daten zur Energiepreisentwicklung. *Lange Reihen von Januar 2000 bis Januar 2016*“. – Lange Reihen von Januar 2000 bis Januar 2016, Artikelnummer 5619001161014, Wiesbaden (29. Februar 2016).
- DIE WELT (26.02.16)** DIE WELT: „Ab Juli soll es 5000-Euro-Bonus für E-Autos geben“ (26.02.16), URL: <http://www.welt.de/wirtschaft/article152696530/Ab-Juli-soll-es-5000-Euro-Bonus-fuer-E-Autos-geben.html>. – Aktualisierungsdatum: 2016-02-26, Überprüfungsdatum 01.03.2016.
- Diefenbach et al. (2013)** Diefenbach, N.; Stein, B.; Loga, T.; Rodenfels, M.; Gabriel, J.; Fette, M.: „Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und

- „Energieeffizient Bauen“ 2011“, Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU); Bremer Energie Institut, Auftraggeber: KfW-Bankengruppe, (10. Oktober 2013).
- Dimaranan (2006)** Dimaranan, B.: „GTAP 6 Data Base Documentation - Chapter 18.A: Macroeconomic Data“, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, GTAP Resource #1881, (2006).
- Discher et al. (2010)** Discher, H.; Hinz, E.; Enseling, A.: „dena-Sanierungsstudie - Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Bericht 2010, Berlin (8. Dezember 2010).
- Drosdowski & Lutz (2014)** Drosdowski, T.; Lutz, C.: „Weiterentwicklung des aktualisierten Panta Rhei Modells um sozioökonomische Aspekte“, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH (gws), Endbericht zur Durchführung des IT-Projekts Nr. 29992 im Auftrag des Umweltbundesamtes, gws Research Report 2014/1, Osnabrück (Oktober 2014).
- Drouet et al. (2005)** Drouet, L.; Haurie, A.; Labriet, M.; Thalmann, P.; Vielle, M.; Viguiier, L.: „A Coupled Bottom-Up / Top-Down Model for GHG Abatement Scenarios in the Swiss Housing Sector“, 2005 Conference Paper Presented at the 8th Annual Conference on Global Economic Analysis, Lübeck, Germany, GTAP Resource #1706, (28.04.2005).
- EEA (2014)** European Environment Agency (EEA): „Monitoring CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars and vans in 2013“, Luxembourg: Publications Office of the European Union, EEA Technical report No 19/2014, (30.10.2014).
- EEA (2015a)** European Environment Agency (EEA): „EU Emissions Trading System (ETS) data viewer“ (2015), European Environment Agency (EEA), URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/emissions-trading-viewer>. – Aktualisierungsdatum: 2015-09-01, Überprüfungsdatum 09.11.2015.
- EEA (2015b)** European Environment Agency (EEA): „Trends and projections in the EU ETS in 2015“, EEA Technical report No 14/2015, Luxembourg: Publications Office of the European Union (20. Oktober 2015).
- Endres (2012)** Endres, A.: „Umweltökonomie - Lehrbuch“, 4. Aufl., Stuttgart : Kohlhammer, 2012.
- EU-KOM (2008)** Europäische Kommission (EU-KOM): „EU-Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels - Das Emissionshandelssystem der EU“, Ausgabe 2008, Luxembourg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften (2008).
- EU-KOM (2011)** Europäische Kommission (EU-KOM): „Energy Roadmap 2050“, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions COM(2011) 885 final, Brussels (15.12.2011).
- EU-KOM (2014a)** Europäische Kommission (EU-KOM): „EU energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050 : reference scenario 2013“, Europäische Kommission (EU-KOM), Directorate-General for Energy, Directorate-General for Climate Action, Directorate-General for Mobility and Transport, Luxembourg : Office for official publications of the european communities, 2014.
- EU-KOM (2014b)** Europäische Kommission (EU-KOM): „A policy framework for climate and energy in the period from 2020 up to 2030. *Impact Assessment*“. – Impact

Assessment, Accompanying the document: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions SWD(2014) 15 final, Brussels (22.01.2014).

**EU-KOM (2014c)** Europäische Kommission (EU-KOM): „Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030“, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen COM(2014) 15 final, Brüssel (22.01.2014).

**EU-KOM (2014d)** Europäische Kommission (EU-KOM): „Vorschlag für einen Beschluss des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einrichtung und Anwendung einer Marktstabilitätsreserve für das EU-System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten und zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG“, 2014/0011 (COD), COM(2014) 20 final, Brüssel (22.01.2014).

**EU-KOM (2015a)** Europäische Kommission (EU-KOM): „Fahrplan für die Energieunion - Rahmenstrategie für eine krisenfeste Energieunion mit einer zukunftsorientierten Klimaschutzstrategie“, Annex I, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen und die europäische Investitionsbank COM(2015) 80 final, Brüssel (25.02.2015).

**EU-KOM (2015b)** Europäische Kommission (EU-KOM): „Paket zur Energieunion - Rahmenstrategie für eine krisenfeste Energieunion mit einer zukunftsorientierten Klimaschutzstrategie“, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen und die europäische Investitionsbank COM(2015) 80 final, Brüssel (25.02.2015).

**EU-KOM (2015c)** Europäische Kommission (EU-KOM): „Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung der Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und zur Förderung von Investitionen in CO<sub>2</sub>-effiziente Technologien“, 2015/148 (COD), COM(2015) 337 final, Brüssel (15.07.2015).

**EU-Parl. (2008)** Europäisches Parlament (EU-Parl.): „Das EU-Klimapaket“, Background REF: 20081208BKG44004, Brüssel (2008).

**EU-Parl. & EU-Rat (2003)** Europäisches Parlament (EU-Parl.); Europäischer Rat (EU-Rat): *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* (in Kraft getr. am 25. Oktober 2003), In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (25. Oktober 2003), L 275, S. 32–46.

**EU-Parl. & EU-Rat (2006)** Europäisches Parlament (EU-Parl.); Europäischer Rat (EU-Rat): *Richtlinie 2006/32/EG über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen und zur Aufhebung der Richtlinie 93/76/EWG des Rates* (in Kraft getr. am 5. April 2006), In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (5. April 2006), L 114, S. 64–84.

**EU-Parl. & EU-Rat (2009a)** Europäisches Parlament (EU-Parl.); Europäischer Rat (EU-Rat): *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*, In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2009), L 140, S. 1–15.

- EU-Parl. & EU-Rat (2009b)** Europäisches Parlament (EU-Parl.); Europäischer Rat (EU-Rat): *Entscheidung Nr. 406/2009/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* (in Kraft getr. am 5. Juni 2009), In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (5. Juni 2009), L 140, S. 136–148.
- EU-Parl. & EU-Rat (2009c)** Europäisches Parlament (EU-Parl.); Europäischer Rat (EU-Rat): *Richtlinie 2009/29/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* (in Kraft getr. am 5. Juni 2009), In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (5. Juni 2009), L 140, S. 63–87.
- EU-Parl. & EU-Rat (2010)** Europäisches Parlament (EU-Parl.); Europäischer Rat (EU-Rat): *Richtlinie 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)* (in Kraft getr. am 18. Juni 2010), In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (18. Juni 2010), L 153, S. 13–35.
- EU-Rat (2007)** Europäischer Rat (EU-Rat): „Schlussfolgerungen des Vorsitzes - Tagung des Europäischen Rates am 8./9. März 2007“, 7224/07, Brüssel (9. März 2007).
- EU-Rat (2009a)** Europäischer Rat (EU-Rat): „Schlussfolgerungen des Vorsitzes - Tagung des Europäischen Rates vom 11./12. Dezember 2008“, 17271/1/08 REV1 CONCL 1, Brüssel (13.02.2009).
- EU-Rat (2009b)** Europäischer Rat (EU-Rat): „Schlussfolgerungen des Vorsitzes - Tagung des Europäischen Rates am 29./30. Oktober 2009“, 15265/09, Brüssel (30. Oktober 2009).
- EU-Rat (2014)** Europäischer Rat (EU-Rat): „Schlussfolgerungen - Tagung des Europäischen Rates am 23./24. Oktober 2014“, EUCO 169/14, Brüssel (24. Oktober 2014).
- EURELECTRIC (2010)** Union of the Electricity Industry (EURELECTRIC): „Power Statistics 2010“, Full report, 2010 edition, Brussels (2010).
- Eurostat (2015a)** Eurostat: „Europe 2020 indicators - climate change and energy“ (2015), URL: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe\\_2020\\_indicators\\_-\\_climate\\_change\\_and\\_energy](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe_2020_indicators_-_climate_change_and_energy). – Aktualisierungsdatum: Dezember 2014, Überprüfungsdatum 05.11.2015.
- Eurostat (2015b)** Eurostat: „Greenhouse gas emission statistics“ (2015), URL: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics). – Aktualisierungsdatum: July 2015, Überprüfungsdatum 05.11.2015.
- Eurostat (2015c)** Eurostat: „Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch in der EU 2013 auf 15% gestiegen“, Pressemitteilung 43/2015, (10. März 2015).
- Eurostat (2015d)** Eurostat: „Vereinfachte Energiebilanzen - Jährliche Daten“, Code nrg\_100a, (27.04.2015).
- Fernahl et al. (2015)** Fernahl, A.; Heddrich, M.-L.; Lenck, T.: „Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland durch Abschaltung von Kohlekraftwerken“, Energy Brainpool, im Auftrag von Greenpeace e. V., Berlin (29. September 2015).
- Ferris & Munson (2001)** Ferris, Michael C.; Munson, Todd S.: „GAMS/PATH User Guide - Version 4.6“ (November 23, 2001), URL: <http://ftp.cs.wisc.edu/math->

- prog/solvers/path/pathlib/doc/gams\_user.ps. – Aktualisierungsdatum: 2001-11-23, Überprüfungsdatum 23.02.2016.
- Flachsland et al. (2011)** Flachsland, C.; Brunner, S.; Edenhofer, O.; Creutzig, F.: „Climate policies for road transport revisited (II): Closing the policy gap with cap-and-trade“, In: *Energy Policy* 39 (2011), Nr. 4, S. 2100–2110.
- Flaute et al. (2015)** Flaute, M.; Großmann, A.; Lutz, C.; Nieters, A.: „Erweiterung des umweltökonomischen Modells PANTA RHEI um Prosumer-Haushaltstypen“, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS mbH Osnabrück), GWS Discussion Papers 2015/14, Osnabrück (Oktober 2015).
- FOCUS Online (2016)** FOCUS Online: „Baufinanzierungsrechner: Vergleichen Sie die Baugeld-Konditionen“ (2016), FOCUS Online, URL: <http://hypotheken.focus.de/rechner/focus/>, Überprüfungsdatum 31.03.2016.
- Førsund (2007)** Førsund, F. R.: „Hydropower economics“, New York : Springer, 2007 (112).
- Fouré et al. (2012)** Fouré, J.; Bénassy-Quéré, A.; Fontagné, L.: „The Great Shift: Macroeconomic projections for the world economy at the 2050 horizon“, CEPII working paper 2012-03, (March 2012).
- Fritsch et al. (2005)** Fritsch, M.; Wein, T.; Ewers, H.-J.: „Marktversagen und Wirtschaftspolitik - Mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns“, 6., überarb. und erw. Aufl., München : Vahlen, 2005 (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Gabler (2015a)** Springer Gabler Verlag (Gabler): „Stichwort: Kosten. *Gabler Wirtschaftslexikon*“ (2015), URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54284/kosten-v7.html>, Überprüfungsdatum 01.12.2015.
- Gabler (2015b)** Springer Gabler Verlag (Gabler): „Stichwort: öffentlicher Haushalt. *Gabler Wirtschaftslexikon*“ (2015), URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8056/oeffentlicher-haushalt-v11.html>, Überprüfungsdatum 16.11.2015.
- Gabler (2015c)** Springer Gabler Verlag (Gabler): „Stichwort: Pareto-Opimum. *Gabler Wirtschaftslexikon*“ (2015), URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/4636/pareto-optimum-v7.html>, Überprüfungsdatum 24.11.2015.
- Gabler (2015d)** Springer Gabler Verlag (Gabler): „Stichwort: Privathaushalt. *Gabler Wirtschaftslexikon*“ (2015), URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/6611/privathaushalt-v9.html>, Überprüfungsdatum 16.11.2015.
- Gabler (2015e)** Springer Gabler Verlag (Gabler): „Stichwort: Umweltproblem. *Gabler Wirtschaftslexikon*“ (2015), URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/17524/umweltproblem-v7.html>, Überprüfungsdatum 27.11.2015.
- Gabler (2015f)** Springer Gabler Verlag (Gabler): „Stichwort: Wirtschaftlichkeitsprinzip. *Gabler Wirtschaftslexikon*“ (2015), URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8349/wirtschaftlichkeitsprinzip-v5.html>, Überprüfungsdatum 24.11.2015.

- Gawel (2010)** Gawel, E.: „CO<sub>2</sub>-basierte Kfz-Steuer – eine Klimaschutzsteuer?“, In: *Zeitschrift für Umweltrecht* 2010 (2010), Nr. 1, S. 3–8.
- Geres et al. (2016)** Geres, R.; Kohn, A.; Nickel, F.; Scholz, D.; Mühlpointner, T.; Sternhardt, M.; Beestermöller, R.; Fahl, U.; Blesl, M.; Haasz, T.; Brunke, J.-C.: „Ausgestaltung des EU-Emissionshandels nach 2020 und seine Auswirkungen – insbesondere auf die industrielle Wettbewerbsfähigkeit und die Energiewirtschaft – unter Berücksichtigung von Optionen zur Vermeidung von Carbon Leakage“, FutureCamp Holding GmbH; FutureCamp Climate GmbH; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) , Schlussbericht zum Vorhaben 06/15, (2016).
- Gherzi (2015)** Gherzi, F.: „Hybrid Bottom-up/Top-down Energy and Economy Outlooks: A Review of IMACLIM-S Experiments“, In: *Frontiers in Environmental Science* 3 (2015), Article 74, S. 1–18.
- Giraudet et al. (2012)** Giraudet, L.-G.; Guivarch, C.; Quirion, P.: „Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling“, In: *Energy Economics* 34 (2012), Nr. 2, S. 426–445.
- Goulder & Parry (2008)** Goulder, L. H.; Parry, I. W.H.: „Instrument Choice in Environmental Policy“, In: *Review of Environmental Economics and Policy* 2 (2008), Nr. 2, S. 152–174.
- Greenpeace (2015)** Greenpeace: „Klimareserve aus Braunkohlekraftwerken - Eine juristische und energiewirtschaftliche Analyse. Teil A: Juristisches Kurzgutachten von Rechtsanwältin Dr. Michéle John, Rechtsanwälte Günther. Teil B: Energiewirtschaftliche Kurzanalyse von Energy Brainpool“. – Teil A: Juristisches Kurzgutachten von Rechtsanwältin Dr. Michéle John, Rechtsanwälte Günther. Teil B: Energiewirtschaftliche Kurzanalyse von Energy Brainpool, im Auftrag von Greenpeace e.V., Hamburg (18. September 2015).
- Groscurth & Bode (2012)** Groscurth, H.-M.; Bode, S.: „Energiepolitik - Zielkonflikte in der Stromerzeugung im Kontext der Energiewende“, In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen : et ; Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt* 62 (2012), Nr. 12, S. 19–23.
- Grubb et al. (1993)** Grubb, M.; Edmonds, J.; Brink, P. ten; Morrison, M.: „The Costs of Limiting Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions: A Survey and Analysis“, In: *Annual Review of Energy and the Environment* 18 (1993), Nr. 1, S. 397–478.
- Hartwig (2003)** Hartwig, K.-H.: „Umweltökonomie“, Bd. 2. In: *Vahlens Kompendium der Wirtschaftstheorie und Wirtschaftspolitik*. 8., überarb. Aufl., München : Vahlen, 2003 (2), S. 127–169.
- Held & Waltersbacher (2015)** Held, T.; Waltersbacher, M.: „Wohnungsmarktprognose 2030“, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2015, Bonn (April 2015).
- Hendricks (2015)** Hendricks, B.: „Neun Punkte für bessere Luft in Städten und Ballungszentren. Gastbeitrag von Bundesumweltministerin Dr. Barbara Hendricks“, In: *Süddeutsche Zeitung* (14. Oktober 2015)

- Holub & Schnabl (1994)** Holub, H.-W.; Schnabl, H.: „Input-Output-Rechnung - Eine Einführung“, München u.a. : Oldenbourg, 1994 (Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Homburg (2003)** Homburg, S.: „Allgemeine Steuerlehre“, 3., überarb. Aufl., München : Vahlen, 2003 (WiSo-Kurzlehrbücher : Reihe Volkswirtschaft).
- Hourcade et al. (2006)** Hourcade, J.-C.; Jaccard, M.; Bataille, C.; Gheri, F.: „Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges Introduction to the Special Issue of "The Energy Journal"“, In: *The Energy Journal* 27 (2006), S. 1–11., Überprüfungsdatum 30.11.2015.
- Hull et al. (2009)** Hull, D.; Ó Gallachóir, Brian P.; Walker, N.: „Development of a modelling framework in response to new European energy-efficiency regulatory obligations: The Irish experience“, In: *Energy Policy* 37 (2009), Nr. 12, S. 5363–5375.
- IEA (2009)** International Energy Agency (IEA): „Electricity Information 2009“, Paris : OECD Publishing, 2009.
- IEA et al. (2010)** International Energy Agency (IEA); Nuclear Energy Agency (NEA); Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): „Projected Costs of Generating Electricity“, 2010 edition, Paris (2010).
- IEA-RETD (2014)** IEA Renewable Energy Technology Deployment (IEA-RETD): „Residential Prosumers - Drivers and Policy Options“, RE-PROSUMERS Project, (June 2014).
- IKA (2014)** Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen (IKA): „CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020“, Abschlussbericht 123320, Dienstleistungsprojekt 59/12, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Aachen (August 2014).
- ILO (2010)** International Labour Organization (ILO): „International Standard Classification of Occupations - Major, Sub-Major and Minor Groups. *LABORSTA Internet*“ (2010), International Labour Organization (ILO), URL: <http://laborsta.ilo.org/applv8/data/isco88e.html>, Überprüfungsdatum 09.03.2016.
- IPCC (2014a)**: „Climate Change 2014: Synthesis Report“, Cambridge, UK, New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2014.
- IPCC (2014b)** IPCC: „Summary for policy makers“. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report*, Cambridge, UK, New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2014.
- IVD (2008)** Immobilienverband Deutschland (IVD): „IVD-Wohn-Preisspiegel 2007/2008“, Berlin (2008).
- Joas et al. (2014)** Joas, F.; Pahle, M.; Flachsland, C.: „Die Ziele der Energiewende: Eine Kartierung der Prioritäten“, In: *ifo Schnelldienst* 67 (15. Mai 2014), Nr. 9, S. 6–11.
- Johansen (1960)** Johansen, L.: „A multi-sectoral study of economic growth“, Amsterdam : North-Holland Publ, 1960 (Contributions to economic analysis 21).
- Karplus et al. (2013a)** Karplus, V. J.; Paltsev, S.; Babiker, M.; Reilly, J. M.: „Applying engineering and fleet detail to represent passenger vehicle transport in a computable general equilibrium model“, In: *Economic Modelling* 30 (2013), S. 295–305., Überprüfungsdatum 24.03.2016.
- Karplus et al. (2013b)** Karplus, V. J.; Paltsev, S.; Babiker, M.; Reilly, J. M.: „Should a vehicle fuel economy standard be combined with an economy-wide greenhouse gas

- emissions constraint? Implications for energy and climate policy in the United States“, In: *Energy Economics* 36 (2013), S. 322–333.
- KBA (2008a)** Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): „Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2008 gegenüber 1. Januar 2007 nach Segmenten und Modellreihen (Zulassungen ab 1990)“, Flensburg (2008), URL: [http://www.kba.de/DE/Presse/Presseportal/B\\_Segmente\\_FZ12/bestand\\_Segmente\\_2008\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.kba.de/DE/Presse/Presseportal/B_Segmente_FZ12/bestand_Segmente_2008_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4), Überprüfungsdatum 19.03.2016.
- KBA (2008b)** Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): „Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern 1. Januar 2008“, FZ 6, Flensburg (2008).
- KBA (2008c)** Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): „Neuzulassungen, Besitzumschreibungen und Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern - Jahr 2007“, FZ 7, Flensburg (2008).
- KBA (2014)** Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): „Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2014 nach Bundesländern sowie privaten und gewerblichen Haltern absolut“, Flensburg (2014), Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), URL: [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Halter/2014/2014\\_b\\_halter\\_dusl\\_absolut.html?nn=1177268](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Halter/2014/2014_b_halter_dusl_absolut.html?nn=1177268)
- KfW (2014)** KfW Bankengruppe (KfW): „Energieeffizient Bauen (153) - Kredit“, Merkblatt "Bauen, Wohnen, Energie sparen", Frankfurt (06/2014).
- KfW (2015a)** KfW Bankengruppe (KfW): „Energieeffizient Sanieren (430) - Investitionszuschuss“, Merkblatt "Bauen, Wohnen, Energie sparen", Frankfurt (04/2015).
- KfW (2015b)** KfW Bankengruppe (KfW): „Energieeffizient Sanieren (151/152) - Kredit“, Merkblatt "Bauen, Wohnen, Energie sparen", Frankfurt (08/2015).
- Kiula & Rutherford (2013)** Kiula, O.; Rutherford, T. F.: „The cost of reducing CO2 emissions: Integrating abatement technologies into economic modeling“, In: *Ecological Economics* 87 (2013), S. 62–71.
- Klier & Linn (2012)** Klier, T.; Linn, J.: „Using Vehicle Taxes to Reduce Carbon Dioxide Emissions Rates of New Passenger Vehicles: Evidence from France, Germany, and Sweden“, FRB of Chicago Working Paper No. 2012-09, (July 30, 2012).
- Klose et al. (2004)** Klose, M.; Opitz, A.; Schwarz, N.: „Sozialrechnungsmatrix für Deutschland - Konzepte und erste Ergebnisse für das Jahr 2000“, In: *Statistisches Bundesamt (Destatis): Wirtschaft und Statistik* (2004), Nr. 6, S. 605–620.
- Kohler (2012)** Kohler, S.: „Jahrhundertaufgabe Energiewende: Wo stehen wir? - Einsatz von Wärmedämmung im Sanierungs- und Neubaubereich“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin (11. September 2012).
- Köppl & Wüger (2007)** Köppl, A.; Wüger, M.: „Energienachfrage der privaten Haushalte für Wohnen und Verkehr“, In: *WIFO-Monatsberichte* 80 (2007), Nr. 11, S. 875–891.
- Kosow & Gaßner (2008)** Kosow, H.; Gaßner, R.: „Methods of Future and Scenario Analysis - Overview, Assessment, and Selection Criteria“, Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE), DIE Research Project "Development Policy: Questions for the Future", Studies / Deutsches Institut für Entwicklungspolitik 39, Bonn (2008).
- Kosoy et al. (2015)** Kosoy, A.; Peszko, G.; Oppermann, K.; Prytz, N.; Klein, N.; Blok, K.; Lam, L.; Wong, L.; Borkent, B.: „State and trends of carbon pricing 2015“, Report (No.



- 99533) prepared jointly by the World Bank and Ecofys, Washington, D.C. (20. September 2015).
- Kost et al. (2013)** Kost, C.; Mayer, J. N.; Thomsen, J.; Hartmann, N.; Senkpiel, C.; Philipps, S.; Nold, S.; Lude, S.; Schlegl, T.: „Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Studie, (November 2013).
- Kratena et al. (2009)** Kratena, K.; Meyer, I.; Wüger, M.: „Ökonomische, technologische und soziodemographische Einflussfaktoren der Energienachfrage“, In: *WIFO-Monatsberichte* 82 (2009), Nr. 7, S. 525–538.
- Kuckshinrichs et al. (2010)** Kuckshinrichs, W.; Kronenberg, T.; Hansen, P.: „The social return on investment in the energy efficiency of buildings in Germany“, In: *Energy Policy* 38 (2010), Nr. 8, S. 4317–4329.
- Küster et al. (2007)** Küster, R.; Ellersdorfer, I.; Fahl, U.: „A CGE-Analysis of Energy Policies Considering Labor Market Imperfections and Technology Specifications“, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Nota di Lavoro, 7.2007, CCMP – Climate Change Modelling and Policy, Milano (January 2007).
- Küster (2009)** Küster, R.: „Klimaschutz, Volkswirtschaft und Beschäftigung - Analysen zur deutschen und europäischen Klimaschutzpolitik mit einem berechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodell“, Berlin : Mensch und Buch Verl., 2009 (Climate protection).
- Labriet et al. (2015)** Labriet, M.; Joshi, S. R.; Vielle, M.; Holden, P.; Edwards, N.; Kanudia, A.; Loulou, R.; Babonneau, F.: „Worldwide impacts of climate change on energy for heating and cooling“, In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20 (2015), Nr. 7, S. 1111-1136.
- Laitner & Hanson (2006)** Laitner, J. A.; Hanson, D. A.: „Modeling Detailed Energy-Efficiency Technologies and Technology Policies within a CGE Framework“, In: *Energy Journal* 27 (2006), S. 151–169.
- Lambrecht et al. (2003)** Lambrecht, U.; Höpfner, U.; Bühler, G.; Stronzik, M.; Bergmann, H.; Jacobs, J.-O.; König, P.: „Flexible Instrumente der Klimapolitik im Verkehrsbereich - Weiterentwicklung und Bewertung von konkreten Ansätzen zur Integration des Verkehrssektors in ein CO<sub>2</sub>-Emissionshandelssystem“, IFEU Heidelberg (Projektleitung), Endbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg, Heidelberg, Mannheim, Frankfurt, Berlin (März 2003).
- Lehr et al. (2011)** Lehr, U.; Mönnig, A.; Wolter, M. I.; Lutz, C.; Schade, W.; Krail, M.: „Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente - ein Vergleich“, GWS Discussion Paper 11/4, Osnabrück (2011).
- Löschel et al. (2015)** Löschel, A.; Erdmann, G.; Staiß, F.; Ziesing, H.-J.: „Stellungnahme zum vierten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2014“, Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, Berlin , Münster, Stuttgart (November 2015).
- Loulou et al. (2004)** Loulou, Richard; Goldstein, Gary; Noble, Ken: „Documentation for the MARKAL Family of Models - Part II: MARKAL-MACRO“ (October 2004), Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), URL: [http://www.iea-etsap.org/web/MrklDoc-II\\_MARKALMACRO.pdf](http://www.iea-etsap.org/web/MrklDoc-II_MARKALMACRO.pdf), Überprüfungsdatum 01.03.2016.
- Lucas (1976)** Lucas, R. E.: „Econometric policy evaluation: A critique“, In: *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 1 (1976), S. 19–46.

- Mathiesen (1985)** Mathiesen, L.: „Computational Experience in Solving Equilibrium Models by a Sequence of Linear Complementarity Problems“, In: *Operations Research* 33 (1985), Nr. 6, S. 1225–1250.
- Mayer (2006)** Mayer, H.: „Energieberechnungen in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) - Methoden, Umfang, Anwendungen“, Statistisches Bundesamt (Destatis), UGR-Online-Publikation, Wiesbaden (November 2006).
- McDonald & Solow (1981)** McDonald, I. M.; Solow, R. M.: „Wage Bargaining and Employment“, In: *The American Economic Review* 71 (1981), Nr. 5, S. 896–908.
- McDougall & Lee (2006)** McDougall, R.; Lee, H.-L.: „GTAP 6 Data Base Documentation - Chapter 17: An Energy Data Base for GTAP“, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, GTAP Resource #1951, (2006).
- Mirasgedis et al. (2014)** Mirasgedis, S.; Tourkolas, C.; Pavlakis, E.; Diakoulaki, D.: „A methodological framework for assessing the employment effects associated with energy efficiency interventions in buildings“, In: *Energy and Buildings* 82 (2014), S. 275–286.
- Möst et al. (2013)** Möst, D.; Müller, T.; Kuder, R.; Beestermöller, R.; Fehrenbach, D.; Merkel, E.; Pluta, M.; Wyrwa, A.: „What is the cost-optimal way to reach -80 % GHG in the EU?“ (Workshop presentation of the Energy System Analysis Agency [ESA<sup>2</sup>]), Brussels (24.01.2013), URL: [http://www.esa2.eu/documents/10157/18245/2013\\_01\\_24\\_ESA2\\_02\\_Moest\\_publication.pdf](http://www.esa2.eu/documents/10157/18245/2013_01_24_ESA2_02_Moest_publication.pdf), Überprüfungsdatum 11.11.2015.
- Nader & Reichert (2015)** Nader, N.; Reichert, G.: „Erweitert den Emissionshandel! - Effektive und effiziente Reduktion von Treibhausgasen im Straßenverkehr“, Centrum für Europäische Politik (cep), cepInput 05 | 2015, Freiburg (2015).
- Narayanan et al. (2012a)** Narayanan, Badri; Aguiar, Angel; McDougall, Robert: „Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 8 Data Base“ (2012), Center for Global Trade Analysis, Purdue University, URL: [http://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v8/v8\\_doco.asp](http://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v8/v8_doco.asp). – Aktualisierungsdatum: 2012, Überprüfungsdatum 08.05.2014.
- Narayanan et al. (2012b)** Narayanan, B.; Dimaranan, B.; McDougall, R.: „GTAP 8 Data Base Documentation - Chapter 2: Guide to the GTAP Data Base“, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, GTAP Resource #3777, (2012).
- Olivier et al. (2014)** Olivier, J.; Janssens-Maenhout, G.; Muntean, M.; Peters, J.: „Trends in global CO2 emissions - 2014 report“, JRC report 93171 / PBL report 1490, The Hague (December 2014).
- Östblom & Berg (2006)** Östblom, G.; Berg, C.: „The EMEC model: Version 2.0“, The National Institute of Economic Research, Working paper No. 96, Stockholm (November 2006).
- Pahlke (2000)** Pahlke, A.: „Allokative und intergenerationale Effekte einer ökologischen Steuerreform“, Lohmar, Köln : Eul, 2000 (Reihe: quantitative Ökonomie Bd. 112).
- Paltsev (2004)** Paltsev, S.: „Moving from Static to Dynamic General Equilibrium Economic Models (Notes for a beginner in MPSGE)“, Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Massachusetts Institute of Technology, (April 2004).
- Paltsev et al. (2005)** Paltsev, S.; Reilly, J. M.; Jacoby, H. D.; Eckaus, R. S.; McFarland, J.; Saorfin, M.; Asadoorian, M.; Babiker, M.: „The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4“, Report No. 125, Cambridge, Mass. (August 2005).

- Parry et al. (2005)** Parry, I. W.H.; Sigman, H.; Walls, M.; Williams III, Roberton C.: „The Incidence of Pollution Control Policies“, Resources for the Future (RFF), Discussion paper RFF DP 05-24, (June 2005).
- Parry et al. (2014)** Parry, I. W.H.; Evans, D.; Oates, W. E.: „Are energy efficiency standards justified?“, In: *Journal of Environmental Economics and Management* 67 (2014), Nr. 2, S. 104–125.
- Parry & Pizer (2007)** Parry, I. W.H.; Pizer, W. A.: „Emissions Trading versus CO<sub>2</sub> Taxes“, Resources for the Future (RFF), Backgrounder, Washington, D.C. (May 2007).
- Rausch et al. (2011)** Rausch, S.; Metcalf, G. E.; Reilly, J. M.: „Distributional impacts of carbon pricing: A general equilibrium approach with micro-data for households“, In: *Energy Economics* 33 (2011), S. S20.
- Remme (2006)** Remme, U.: „Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland - Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell“ : Stuttgart : IER, 2006.
- Remme & Blesl (2006)** Remme, Uwe; Blesl, Markus: „Documentation of the TIMES-MACRO model“ (February 1, 2006), Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), URL: [http://www.iea-etsap.org/web/Docs/MACRO\\_Draft\\_010206.pdf](http://www.iea-etsap.org/web/Docs/MACRO_Draft_010206.pdf), Überprüfungsdatum 01.03.2016.
- Rennings (2013)** Rennings, Klaus: „Modelling. Economic modelling. *LIAISE Toolbox*“ (2013), URL: <http://www.liaise-kit.eu/ia-method/modelling>, Überprüfungsdatum 30.11.2015.
- Rutherford (1999)** Rutherford, T. F.: „Applied General Equilibrium Modeling with MPSGE as a GAMS Subsystem: An Overview of the Modeling Framework and Syntax“, In: *Computational Economics* 14 (1999), 1-2, S. 1–46.
- Rutherford (2010)** Rutherford, T. F.: „GTAP7inGAMS“, Center for Energy Policy and Economics, Department of Management, Technology and Economics ETH Zurich, Working paper, (April 2010).
- Rutherford & Paltsev (2000)** Rutherford, T. F.; Paltsev, S.: „GTAPinGAMS and GTAP-EG: Global Datasets for Economic Research and Illustrative Models“, Department of Economics, University of Colorado, Working paper, (September 2000).
- Santarius (2012)** Santarius, T.: „Der Rebound-Effekt - Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz“, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Impulse zur WachstumsWende, (März 2012).
- Scarf & Hansen (1973)** Scarf, H. E.; Hansen, T.: „The computation of economic equilibria“, Yale University, New Haven : Yale University Press, 1973 (Cowles Foundation for Research in Economics 24).
- Sceia et al. (2008)** Sceia, A.; Altamirano-Cabrera, J.-C.; Schulz, T. F.; Vielle, M.: „Sustainability, neutrality and beyond in the framework of Swiss post-2012 climate policy“, NCCR Working paper 2008/07, (2008).
- Sceia et al. (2012)** Sceia, A.; Altamirano-Cabrera, J.-C.; Drouet, L.; Schulz, T.; Vielle, M.: „Integrated Assessment of Swiss GHG Mitigation Policies After 2012“, In: *Environmental Modeling & Assessment* 17 (2012), Nr. 3, S. 193–207.
- Schäfer & Jacoby (2006a)** Schäfer, A.; Jacoby, H. D.: „Experiments with a Hybrid CGE-MARKAL Model“, In: *The Energy Journal* (2006), Nr. 27, S. 171–177.

- Schäfer & Jacoby (2006b)** Schäfer, A.; Jacoby, H. D.: „Vehicle technology under CO<sub>2</sub> constraint: a general equilibrium analysis“, In: *Energy Policy* 34 (2006), Nr. 9, S. 975–985.
- Schellnhuber (2015)** Schellnhuber, H. Joachim: „Malediven - Wir tauchen bald auf. *Die Malediver verlieren ihre Heimat – und machen sich auf den Weg zu den Schuldigen.*“, In: *DIE ZEIT* (29. Oktober 2015), 44/2015
- Schimschar et al. (2011)** Schimschar, S.; Blok, K.; Boermans, T.; Hermelink, A.: „Germany’s path towards nearly zero-energy buildings - Enabling the greenhouse gas mitigation potential in the building stock“, In: *Energy Policy* 39 (2011), Nr. 6, S. 3346–3360.
- Schnur & Zika (2002)** Schnur, P.; Zika, G.: „Längerfristige Arbeitskräftebedarfsprojektion und Politiksimulation im IAB“. In: KLEINHEINZ, Gerhard (Hrsg.): *IAB-Kompendium Arbeitsmarkt- und Berufsforschung*, Nürnberg : Zentralamt der Bundesanst. für Arbeit, 2002 (Beiträge zur Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, BeitrAB 250), S. 203–219.
- Schumann et al. (1999)** Schumann, J.; Meyer, U.; Ströbele, W.: „Grundzüge der mikroökonomischen Theorie“, 7., neubearb. u. erw. Aufl., Berlin, Heidelberg [u.a.] : Springer, 1999 (Springer-Lehrbuch).
- Siebke (2003)** Siebke, J.: „Preistheorie“. In: *Vahlens Kompendium der Wirtschaftstheorie und Wirtschaftspolitik*. 8., überarb. Aufl., München : Vahlen, 2003 (2), S. 63–126.
- Solow (1979)** Solow, R. M.: „Another possible source of wage stickiness“, In: *Journal of Macroeconomics* 1 (1979), Nr. 1, S. 79–82.
- Springer (1998)** Springer, K.: „Climate policy and trade: Modeling dynamics in a multi-regional framework“, Paper presented at the conference "Using Dynamic Computable General Equilibrium Models for Policy Analysis", Assens, Denmark (June 1998).
- Spritmonitor.de** Spritmonitor.de: „Spritverbrauch und Autokosten berechnen und vergleichen“, Thyrnau, Fisch und Fischl GmbH, URL: <http://www.spritmonitor.de>, Überprüfungsdatum 22.03.2016.
- Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2014)** Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.: „Heizwerte für die Umrechnung von spezifischen Mengeneinheiten in Wärmeeinheiten zur Energiebilanz“ (2014), URL: [http://www.kohlenstatistik.de/files/heizwerte\\_kj2013.xlsx](http://www.kohlenstatistik.de/files/heizwerte_kj2013.xlsx). – Aktualisierungsdatum: 2014, Überprüfungsdatum 29.02.2016.
- Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2016)** Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.: „Entwicklung ausgewählter Energiepreise“ (24.02.2016), URL: <http://www.kohlenstatistik.de/files/enpr.xlsx>. – Aktualisierungsdatum: 2016-02-24, Überprüfungsdatum 22.03.2016.
- T&E (2014)** Transport & Environment (T&E): „Including transport in the Emissions Trading Scheme: Counterproductive and legally questionable“, Briefing, (October 2014).
- Tietenberg & Lewis (2012)** Tietenberg, T. H.; Lewis, L.: „Environmental & natural resource economics“, 9th ed., Upper Saddle River, N.J. : Pearson Education, 2012 (Pearson series in economics).
- Tsvetanov & Segerson (2013)** Tsvetanov, T.; Segerson, K.: „Re-evaluating the role of energy efficiency standards: A behavioral economics approach“, In: *Journal of Environmental Economics and Management* 66 (2013), Nr. 2, S. 347–363.

- Tuschinski (2015)** Tuschinski, M.: „EnEV 2014 verschärft den Neubau-Standard ab 2016 - Betroffene Bauvorhaben, Ausnahmen und geänderte, energetische Anforderungen“, In: *Der Bausachverständige* (2015), Nr. 5, S. 48–53.
- UBA (2014)** Umweltbundesamt (UBA): „Ausweitung des Emissionshandels auf Kleinemittenten im Gebäude- und Verkehrssektor - Gestaltung und Konzepte für einen Policy mix“, Climate Change 03/2014, Dessau-Roßlau (März 2014).
- UBA (2015)** Umweltbundesamt (UBA): „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2013 und erste Schätzungen 2014 im Vergleich zum Stromverbrauch“ (2015), Umweltbundesamt (UBA), URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/entwicklung\\_der\\_spezifischen\\_kohlendioxid-emissionen\\_des\\_deutschen\\_strommix\\_1990-2013\\_und\\_erste\\_schaetzungen\\_2014\\_im\\_vergleich\\_zum\\_stromverbrauch.png](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/entwicklung_der_spezifischen_kohlendioxid-emissionen_des_deutschen_strommix_1990-2013_und_erste_schaetzungen_2014_im_vergleich_zum_stromverbrauch.png). – Aktualisierungsdatum: 04/2015, Überprüfungsdatum 29.02.2016.
- UCTE (2008)** Union for the co-ordination of transmission of electricity (UCTE): „Statistical Yearbook 2007“, Brussels (2008).
- UN (1992)** United Nations (UN): „United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) - Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen“, Rio de Janeiro (1992), United Nations (UN), URL: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf>, Überprüfungsdatum 23.10.2015.
- UN (1997)** United Nations (UN): „Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen“, Kyoto (1997), URL: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>, Überprüfungsdatum 23.10.2015.
- UN (2001)** United Nations (UN): „Klimakonferenz von Marrakesch: Kyoto-Protokoll kann in Kraft treten - Wichtige Entscheidungen nach 10 Jahren Klimaverhandlungen - ein Bericht von COP7“ (2001), URL: <http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/cop7.pdf>, Überprüfungsdatum 02.11.2015.
- UN (2011)** United Nations (UN): „Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010“, UN Framework Convention on Climate Change FCCC/CP/2010/7/Add.1, (15 March 2011).
- UN (2013)** United Nations (UN): „Report of the Conference of the Parties on its eighteenth session, held in Doha from 26 November to 8 December 2012“, UN Framework Convention on Climate Change FCCC/CP/2012/8, (28 February 2013).
- UN (2015)** United Nations (UN): „Adoption of the Paris Agreement“, UN Framework Convention on Climate Change FCCC/CP/2015/L.9, (12 December 2015).
- UNFCCC (2014)** United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): „Data for Total CO2 Equivalent Emissions without Land Use, Land-Use Change and Forestry - Time series - Annex I“ (2014), United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), URL: [http://unfccc.int/ghg\\_data/ghg\\_data\\_unfccc/time\\_series\\_annex\\_i/items/3814.php](http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/time_series_annex_i/items/3814.php), Überprüfungsdatum 04.11.2015.
- Vahlenkamp et al. (2015)** Vahlenkamp, T.; Peters, M.; Ritzenhofen, I.: „Energiewende-Index Deutschland 2020 - Versorger müssen sich neu erfinden“, In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* : et 65 (2015), Nr. 9, S. 24–27.
- Varian (1999)** Varian, H. R.: „Grundzüge der Mikroökonomik“, 4., überarb. und erw. Aufl., München, Wien : Oldenbourg, 1999 (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

- Verdonk & Hof (2013)** Verdonk, M.; Hof, A.: „Non-ETS emission targets for 2030 - Indication of emission targets for the Netherlands and other EU Member States under the European Effort Sharing Decision“, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), PBL Note 1192, The Hague (October 2013).
- Vivid Economics with Ecofys (2014)** Vivid Economics with Ecofys: „Carbon leakage prospects under Phase III of the EU ETS and beyond“, Report prepared for DECC, (June 2014).
- Vogel (2000)** Vogel, C.: „Deutschland im internationalen Technologiewettbewerb - Bedeutung der Forschungs- und Technologiepolitik für die technologische Wettbewerbsfähigkeit“, Berlin : Duncker und Humblot, 2000 (Volkswirtschaftliche Schriften Heft 510).
- Voß et al. (2008)** Voß, A.; Küster, R.; Ellersdorfer, I.: „CO<sub>2</sub>-Emissionshandel für Primärenergiemärkte - Eine Alternative zur Instrumentenvielfalt im Klimaschutz am Beispiel des Verkehrssektors“, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Arbeitsbericht Nr. 6, Stuttgart (Dezember 2008).
- Voß (2013)** Voß, A.: „Energiewirtschaft und Energieversorgung (Energiesysteme I)“, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Skript zur Vorlesung im WS 2013/2014, (2013).
- Wahlberg et al. (2011)** Wahlberg, D.; Holz, A.; Gniechwitz, T.; Schulze, T.: „Wohnungsbau in Deutschland - 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz“, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE), Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“, Kiel (März 2011).
- Wald (1936)** Wald, A.: „Über einige Gleichungssysteme der mathematischen Ökonomie“, In: *Zeitschrift für Nationalökonomie* 7 (1936), Nr. 5, S. 637–670.
- Walras (1874)** Walras, L.: „Éléments d'économie politique pure ou théorie de la richesse sociale“, Lausanne [u.a.] : Corbaz [u.a.], 1874.
- Wing (2006)** Wing, I. Sue: „The Synthesis of Bottom-Up and Top-Down Approaches to Climate Policy Modeling: Electric Power Technologies and the Cost of Limiting U.S. CO<sub>2</sub> Emissions“, In: *Energy Policy* (2006), Nr. 34, S. 3847–3869.
- WRI (2015)** Word Resources Institute (WRI): „CAIT Climate Data Explorer“, Washington, D.C. (2015), Word Resources Institute (WRI), URL: <http://cait.wri.org>, Überprüfungsdatum 04.11.2015.
- Ziesing et al. (2012)** Ziesing, H.-J.; Görden, R.; Maaßen, U.; Nickel, M.: „Energie in Zahlen - Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen“, AG Energiebilanzen e. V. (AGEB), Berlin, 2012.
- Zürn (2010)** Zürn, M.: „Auswirkungen des technologischen Fortschritts und des Klimaschutzes auf die Stromerzeugung - Analysen mit einem allgemeinen Gleichgewichtsmodell“, 1. Aufl, Lohmar, Köln : Eul, 2010 (Reihe: Industrieökonomik 7).

## Anhang

### A.1 Substitutionselastizitäten und Wachstumstreiber

**Tabelle A-1:** Substitutionselastizitäten des Grundmodells

Kürzel	Substitutionselastizität zwischen...	Wert
$\sigma^{\text{KLEM}}$	Materialinputs und Kapital-Arbeit-Energie-Aggregat ( <i>Leontief</i> )	0
$\sigma^{\text{RES}}$	Primärenergieträger und KLEM-Aggregat in der erschöpfbaren Energieproduktion	Tabelle A-3
$\sigma^{\text{KLE}}$	Energieaggregat und Kapital-Arbeit-Aggregat	0,5
$\sigma^{\text{KL}}$	Kapital, qualifizierter und gering-qualifizierter Arbeit ( <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{\text{E}}$	Strom und dem Aggregat fossiler Brennstoffe	0,1
$\sigma^{\text{FE}}$	Kohle und Aggregat aus Gas und Öl	0,5
$\sigma^{\text{LIQ}}$	Gas und Öl	2
$\sigma^{\text{GAS}}$	Gas und CO <sub>2</sub> -Zertifikat ( <i>Leontief</i> )	0
$\sigma^{\text{OIL}}$	Öl und CO <sub>2</sub> -Zertifikat ( <i>Leontief</i> )	0
$\sigma^{\text{COL}}$	Kohle und CO <sub>2</sub> -Zertifikat ( <i>Leontief</i> )	0
$\sigma^{\text{ELE}}$	Grund-/Mittellast-Aggregat und Spitzenlast-Aggregat	0,8
$\sigma^{\text{BM}}$	Grundlast-Aggregat und Mittellast-Aggregat	4
$\sigma^{\text{B}}$	Stromerzeugungstechnologien in der Grundlast	8
$\sigma^{\text{M}}$	Stromerzeugungstechnologien in der Mittellast	8
$\sigma^{\text{P}}$	Pumpspeicherkraft und Aggregat aus Öl- und Gasturbinen in der Spitzenlast	5
$\sigma^{\text{GO}}$	Öl- und Gasturbinen in der Spitzenlast	2,5
$\sigma^{\text{TR}}$	Importgut und assoziierter Transportdienstleistung ( <i>Leontief</i> )	0
$\sigma^{\text{IM}}$	Importgütern unterschiedlicher Herkunftsländer	8
$\sigma^{\text{A}}$	inländischen und importierten Produktionsgütern (Armington-Elastizität)	4
$\sigma^{\text{S}}$	Energie-Aggregat und Nicht-Energiegüter-Aggregat im Konsum	0,5
$\sigma^{\text{C}}$	Nicht-Energiegütern im Konsum ( <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{\text{CE}}$	Energieträgern im Konsum ( <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{\text{TRAN}}$	Materialinputs im internationalen Transportsektor ( <i>Cobb-Douglas</i> )	1

Quelle: Rutherford & Paltsev (2000), Küster (2009) und Zürn (2010)

**Tabelle A-2:** Substitutionselastizitäten in der technologisch disaggregierten Energienachfrage privater Haushalte in Deutschland

Kürzel	Substitutionselastizität zwischen...	Wert
$\sigma^S$	Energie- und Nicht-Energiegüter-Aggregat im Konsum	0,5
$\sigma^C$	Nicht-Energiegütern im Konsum ( <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{ED}$	Energiedienstleistungen im Konsum	0,3
$\sigma^{MOB}$	privater und öffentlicher Mobilität	2
$\sigma^{EG}$	Gebäude und Energieträger für alle Gebäudetechnologien ( <i>Leontief</i> )	0
$\sigma^{EF}$	Fahrzeug und Energieträger für alle Fahrzeugtechnologien ( <i>Leontief</i> )	0
$\sigma^{SG}$	Bestandsgebäude und Neubau/Sanierung für alle Gebäudetechnologien	4
$\sigma^{SF}$	Bestandsfahrzeug und Neuwagen für alle Fahrzeugtechnologien	4
$\sigma^{NG}$	Neubau- bzw. Sanierungstypen in der Bauwirtschaft (Transformationselastizität, <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{NF}$	Neuwagentypen in der Automobilindustrie (Transformationselastizität, <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{MOIL}$	Mineralölprodukten (Benzin, Diesel, Heizöl) in der Mineralölindustrie (Transformationselastizität)	4
$\sigma^{FK}$	Fahrzeugklassen	0,3
$\sigma^{FA}$	Antriebsarten pro Fahrzeugklasse	2
$\sigma^{GK}$	Altbau und Aggregat aus Neubauten und sanierten Gebäuden ( <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{GKNS}$	Neubauten und sanierten Gebäuden	4
$\sigma^{GHA}$	Heizungstypen im Altbau ( <i>Cobb-Douglas</i> )	1
$\sigma^{GHNS}$	Heizungstypen in Neubauten und sanierten Gebäuden	2

Quelle: Eigene Annahmen (vgl. Abschnitt 3.4.1)



**Tabelle A-3:** Substitutionselastizitäten zwischen Primärenergieträgern und dem KLEM-Aggregat in der Produktion erschöpfbarer Energieressourcen ( $\sigma^{\text{RES}}$ )

<b>Modellregion</b>	<b>Kohle</b>	<b>Erdöl</b>	<b>Erdgas</b>
Deutschland	0,32	-	-
Frankreich	-	-	-
Österreich	-	-	-
EU-Nord	0,25	0,37	0,14
EU-Süd	0,32	0,22	0,01
EU-Ost	0,30	0,30	0,02
Schweiz	-	-	-
USA	0,29	0,35	0,05
Restliche OECD	0,32	0,35	0,31
Brasilien	-	0,28	0,17
Russland	0,26	0,34	0,13
Indien	0,36	0,35	0,07
China	0,29	0,32	0,04
Südafrika	0,28	-	0,28
Arabische Welt	-	0,36	0,27
Restliche OPEC	0,38	0,38	0,29
Rest der Welt	0,30	0,33	0,15

Quelle: GTAP8-Datenbank (Parameter *esub\_es*, vgl. Narayanan et al., 2012a)

**Tabelle A-4:** Wachstum des Erwerbspersonenpotenzials von qualifizierter Beschäftigung (Index)

	2007	2010	2015	2020	2025	2030	% p.a.
Deutschland	1	1,03	1,03	1,06	1,10	1,15	0,60%
Österreich	1	1,01	1,16	1,32	1,46	1,63	2,14%
Frankreich	1	1,07	1,23	1,43	1,63	1,86	2,75%
EU-Nord	1	1,09	1,25	1,42	1,60	1,80	2,59%
EU-Süd	1	1,06	1,14	1,25	1,36	1,48	1,73%
EU-Ost	1	1,07	1,20	1,32	1,46	1,64	2,19%
Schweiz	1	1,04	1,04	1,07	1,11	1,15	0,61%
USA	1	1,04	1,12	1,17	1,24	1,32	1,22%
Restliche OECD	1	1,07	1,19	1,32	1,45	1,56	1,96%
Brasilien	1	1,05	1,27	1,58	1,94	2,31	3,71%
Russland	1	1,05	1,06	1,03	1,01	1,00	0,00%
Indien	1	1,15	1,48	1,86	2,32	2,86	4,68%
China	1	1,19	1,42	1,64	1,85	2,05	3,16%
Südafrika	1	1,05	1,14	1,26	1,41	1,59	2,03%
Arabische Welt	1	1,23	1,59	1,95	2,35	2,82	4,61%
Restliche OPEC	1	1,14	1,35	1,62	1,95	2,37	3,82%
Rest der Welt	1	1,12	1,35	1,61	1,91	2,27	3,62%

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Fouré et al. (2012).

**Tabelle A-5:** Wachstum des Erwerbspersonenpotenzials von gering-qualifizierter Beschäftigung (Index)

	2007	2010	2015	2020	2025	2030	% p.a.
Deutschland	1	1,01	0,94	0,89	0,83	0,77	-1,15%
Österreich	1	1,02	0,97	0,92	0,85	0,78	-1,08%
Frankreich	1	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	-1,23%
EU-Nord	1	1,00	0,94	0,89	0,84	0,78	-1,09%
EU-Süd	1	1,01	0,96	0,91	0,86	0,79	-1,00%
EU-Ost	1	0,98	0,97	0,92	0,86	0,79	-1,03%
Schweiz	1	1,02	0,99	0,97	0,93	0,88	-0,57%
USA	1	1,00	0,99	0,98	0,96	0,92	-0,36%
Restliche OECD	1	1,00	0,97	0,94	0,91	0,87	-0,59%
Brasilien	1	1,05	1,09	1,13	1,14	1,14	0,57%
Russland	1	0,94	0,89	0,83	0,78	0,73	-1,35%
Indien	1	1,05	1,16	1,25	1,33	1,39	1,44%
China	1	1,01	1,04	1,02	0,99	0,95	-0,24%
Südafrika	1	1,06	1,10	1,15	1,20	1,24	0,93%
Arabische Welt	1	1,08	1,16	1,21	1,24	1,25	0,98%
Restliche OPEC	1	1,07	1,16	1,27	1,37	1,47	1,68%
Rest der Welt	1	1,07	1,17	1,27	1,38	1,48	1,72%

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Fouré et al. (2012).

**Tabelle A-6:** Wachstum der totalen Faktorproduktivität (TFP, Index)

	2007	2010	2015	2020	2025	2030	% p.a.
Deutschland	1	1,00	1,08	1,14	1,20	1,27	1,04%
Österreich	1	0,99	1,07	1,14	1,22	1,30	1,13%
Frankreich	1	0,98	1,04	1,11	1,18	1,26	1,01%
EU-Nord	1	0,93	1,01	1,10	1,18	1,28	1,07%
EU-Ost	1	1,01	1,15	1,33	1,53	1,76	2,48%
EU-Süd	1	0,96	1,00	1,08	1,17	1,28	1,09%
Schweiz	1	1,01	1,07	1,12	1,18	1,24	0,94%
USA	1	0,99	1,03	1,08	1,14	1,19	0,77%
Restliche OECD	1	0,96	1,05	1,14	1,24	1,34	1,28%
Brasilien	1	1,06	1,16	1,25	1,36	1,47	1,70%
Russland	1	1,00	1,24	1,51	1,81	2,15	3,39%
Indien	1	1,12	1,36	1,60	1,88	2,20	3,49%
China	1	1,20	1,56	1,94	2,38	2,89	4,72%
Südafrika	1	0,97	1,06	1,17	1,28	1,39	1,46%
Arabische Welt	1	0,98	1,05	1,10	1,15	1,22	0,87%
Restliche OPEC	1	1,00	1,13	1,22	1,31	1,41	1,50%
Rest der Welt	1	1,01	1,13	1,26	1,40	1,56	1,96%

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Fouré et al. (2012).

**Tabelle A-7:** Wachstum der Energieproduktivität (Index)

	2007	2010	2015	2020	2025	2030	% p.a.
Deutschland	1	1,01	1,00	0,97	0,94	0,90	-0,44%
Österreich	1	0,99	0,99	0,97	0,95	0,92	-0,38%
Frankreich	1	1,02	1,00	0,98	0,95	0,91	-0,41%
EU-Nord	1	1,01	0,97	0,93	0,89	0,85	-0,71%
EU-Ost	1	0,95	0,87	0,79	0,72	0,66	-1,82%
EU-Süd	1	0,98	0,97	0,95	0,92	0,88	-0,54%
Schweiz	1	1,04	1,04	1,03	1,00	0,97	-0,13%
USA	1	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	-0,95%
Restliche OECD	1	1,06	1,02	0,98	0,94	0,90	-0,48%
Brasilien	1	1,06	1,00	0,96	0,93	0,91	-0,40%
Russland	1	0,97	0,82	0,72	0,66	0,62	-2,09%
Indien	1	1,00	0,87	0,78	0,71	0,65	-1,86%
China	1	1,01	0,83	0,68	0,56	0,47	-3,19%
Südafrika	1	1,01	0,89	0,80	0,75	0,70	-1,52%
Arabische Welt	1	1,07	0,97	0,92	0,88	0,86	-0,68%
Restliche OPEC	1	1,00	0,91	0,86	0,84	0,82	-0,86%
Rest der Welt	1	1,01	0,96	0,91	0,88	0,86	-0,67%

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Fouré et al. (2012).

## A.2 Technologiefundierte Darstellung der Stromerzeugung

**Tabelle A-8:** Stromerzeugung pro Erzeugungstechnologie und Modellregion im Basisjahr 2007 (in TWh)

		DEU	FRA	AUT	EUN	EUS	EUE	SWZ	USA	OEC	BRZ	RUS	IND	CHI	RSA	ARB	OPE	ROW
Grundlast	Braunkohle	166	-	-	-	11	48	156	126	89	6	61	19	-	-	-	63	107
	Biomasse	22	2	3	0	34	8	6	30	50	17	0	2	2	0	0	-	14
	Erdgas	50	-	6	-	93	163	2	89	214	-	243	3	0	-	380	12	478
	Geothermie	-	-	-	-	-	6	-	17	17	-	0	-	-	-	-	7	14
	Steinkohle	24	-	0	-	184	108	25	518	1.503	-	59	384	1.845	171	3	-	279
	Laufwasser	21	58	36	35	90	81	28	654	250	355	177	123	388	0	39	109	494
	Kernenergie	141	440	-	28	216	61	79	511	837	12	160	17	62	11	-	-	146
	Öl	5	-	1	-	7	53	0	37	19	-	2	2	-	-	202	12	11
Mittellast	Erdgas	5	5	4	1	169	118	16	413	518	14	195	53	2	-	136	38	171
	Steinkohle	106	24	6	-	22	15	76	120	501	0	40	128	791	73	10	-	120
	Öl	-	-	-	-	-	14	2	172	44	12	7	7	2	-	72	41	160
	Photovoltaik	3	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	1	0	0	1	-	1
	Wind	40	4	2	-	21	37	1	11	35	2	0	11	8	0	1	-	1
Spitzenlast	Erdgas	18	16	0	0	29	15	18	89	183	2	49	10	39	-	27	9	34
	Pumpspeich.	8	6	3	2	7	10	1	13	26	19	2	1	97	4	0	1	26
	Öl	6	6	1	0	6	12	3	37	16	1	9	27	32	1	14	6	57
<b>TOTAL</b>		614	562	61	66	889	748	413	2.837	4.302	441	1.003	786	3.269	261	885	297	2.114

Quelle: IEA (2009). Aufteilung in die Lastsegmente durch zusätzliche Informationen aus EURELECTRIC (2010), Førsund (2007) und UCTE (2008).

**Tabelle A-9:** Stromgestehungskosten pro Erzeugungstechnologie und Modellregion im Basisjahr 2007 (EUR/MWh)

		DEU	FRA	AUT	EUN	EUS	EUE	SWZ	USA	OEC	BRZ	RUS	IND	CHI	RSA	ARB	OPE	ROW
Grundlast	Braunkohle	35	37	37	37	37	41	41	37	41	43	37	37	41	38	43	43	41
	Biomasse	81	77	77	77	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
	Erdgas	58	77	77	78	77	80	-	79	85	84	75	75	85	88	85	85	76
	Geothermie	49	37	37	33	37	-	37	37	37	37	-	-	37	37	15	-	37
	Steinkohle	44	45	45	45	45	44	-	42	44	45	38	38	44	52	45	45	40
	Laufwasser	36	43	43	43	43	41	42	42	42	42	41	41	42	42	42	42	42
	Kernenergie	37	39	39	38	39	28	36	37	36	37	37	37	36	43	15	-	36
	Öl	-	-	-	12	-	119	-	-	119	-	-	-	119	24	119	119	107
Mittellast	Erdgas	62	61	61	61	61	61	61	58	59	58	61	61	59	75	63	66	59
	Steinkohle	57	58	58	58	58	57	56	54	57	58	46	46	57	70	58	58	57
	Öl	-	126	126	126	126	126	126	-	126	-	-	-	126	126	126	126	126
	Photovoltaik	120	120	120	120	120	120	120	289	289	289	289	289	289	289	116	116	289
	Wind	65	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
Spitzenlast	Erdgas	119	122	122	120	122	106	107	117	116	116	116	116	116	108	121	125	115
	Pumpspeicher	215	254	254	253	254	245	249	249	253	253	253	253	253	251	253	253	252
	Öl	203	228	228	228	228	227	227	227	228	228	227	227	228	227	228	228	228

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von IEA et al. (2010), Küster (2009) sowie Kost et al. (2013).

### A.3 Technologiefundierte Darstellung der Energienachfrage privater Haushalte

**Tabelle A-10:** Übersicht über die Daten der Fahrzeug- und Gebäudetechnologien (Deutschland, Basisjahr 2007)

Fahrzeug- bzw. Gebäudetechnologie	Wohnfläche	Bestand	Neu	Fahrleistung	CO <sub>2</sub> -Emissionen	Hubraum	Kraftstoff-Verbr.	Energieverbrauch			Energiepreis		Energiekosten		Kapitalkosten (Kauf)		Kapitalkosten (Nutzung)		
	Mio. m <sup>2</sup>	Tsd.	Tsd.	Tsd. km p.a.	gCO <sub>2</sub> /km	ccm	l/100km	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/100km	TWh	€/MWh (netto)	€/MWh (brutto)	€/m <sup>2</sup> a	€/100km	€/Fahrzeug	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>	€/100km	
Klein	Benzin	-	11.679	405	10,4	137	1.188	5,8	-	58	70,1	49,3	146,2	-	8,41	11.766	-	-	36,15
	Diesel	-	247	18	10,4	124	1.248	4,6	-	50	1,28	47,4	113,6	-	5,65	15.111	-	-	41,19
	Erdgas	-	92	8	10,4	99	1.199	-	-	48	0,46	46,0	61,3	-	2,93	16.208	-	-	35,55
	Strom	-	8	0,03	10,4	-	-	-	-	20	0,016	130,0	185,1	-	3,65	21.700	-	-	54,30
Mittel	Benzin	-	15.798	518	15,0	175	1.661	7,3	-	74	174,7	49,3	146,2	-	10,81	21.410	-	-	42,65
	Diesel	-	5.316	358	15,0	134	1.907	5,4	-	60	48,1	47,4	113,6	-	6,86	24.543	-	-	47,00
	Erdgas	-	118	7	15,0	131	1.795	-	-	59	1,04	46,0	61,3	-	3,61	24.882	-	-	44,16
	PHEV	-	46	11	15,0	49	1.798	2,1	-	36	0,25	65,5	154,0	-	5,51	36.200	-	-	47,46
Groß	Benzin	-	3.291	145	17,6	223	2.954	9,3	-	98	56,7	49,3	146,2	-	14,34	38.422	-	-	64,78
	Diesel	-	2.469	159	17,6	183	2.595	6,9	-	80	34,7	47,4	113,6	-	9,09	40.159	-	-	57,49
	PHEV	-	28	7	17,6	62	2.497	2,7	-	63	0,31	65,5	154,0	-	9,75	61.039	-	-	67,25
Altbau	Heizöl	975,3	-	-	-	-	-	-	160	-	156,0	42,1	59,2	9,46	-	-	1.111	57,50	-
	Erdgas	1.570,9	-	-	-	-	-	-	160	-	251,2	46,0	61,3	9,80	-	-	1.111	57,50	-
	Kohle	33,1	-	-	-	-	-	-	160	-	5,30	8,4	9,9	1,59	-	-	1.111	57,50	-
	Holz	96,3	-	-	-	-	-	-	160	-	15,4	33,6	40,0	6,40	-	-	1.111	57,50	-
	Strom	559,0	-	-	-	-	-	-	160	-	89,4	130,0	185,1	29,60	-	-	1.111	57,50	-
Sanierter Altbau	Heizöl	2,1	-	-	-	-	-	-	65	-	0,14	42,1	59,2	3,85	-	-	1.410	72,10	-
	Erdgas	19,6	-	-	-	-	-	-	65	-	1,27	46,0	61,3	3,98	-	-	1.410	72,10	-
	Holz	2,0	-	-	-	-	-	-	65	-	0,130	33,6	40,0	2,60	-	-	1.410	72,10	-
	Strom	5,7	-	-	-	-	-	-	65	-	0,37	130,0	185,1	12,03	-	-	1.410	72,10	-
Neubau (EnEV-Standard)	Heizöl	1,4	-	-	-	-	-	-	65	-	0,090	42,1	59,2	3,85	-	-	1.560	80,73	-
	Erdgas	13,0	-	-	-	-	-	-	65	-	0,84	46,0	61,3	3,98	-	-	1.560	80,73	-
	Holz	1,3	-	-	-	-	-	-	65	-	0,086	33,6	40,0	2,60	-	-	1.560	80,73	-
	Strom	3,8	-	-	-	-	-	-	65	-	0,25	130,0	185,1	12,03	-	-	1.560	80,73	-
Neubau (Passivhaus)	Erdgas	1,4	-	-	-	-	-	-	15	-	0,022	46,0	61,3	0,92	-	-	1.872	96,88	-
	Holz	0,2	-	-	-	-	-	-	15	-	0,003	33,6	40,0	0,60	-	-	1.872	96,88	-
	Strom	0,5	-	-	-	-	-	-	15	-	0,007	130,0	185,1	2,78	-	-	1.872	96,88	-
Sonstiges	Strom	-	-	-	-	-	-	-	-	83,5	130,0	185,1	-	-	-	-	-	-	-
Summe		3.286	39.092	1.638	14,0	162	1.721	6,7	158	69	992	-	-	12,82	3	21.642	1.149	57,79	44,16

**Quellen:** ADAC (2014), ADAC (2016), Autobild (2015), Bundeskartellamt (2012), DAT (2008), depi (2016), Destatis (2008a), Destatis (2008b), Destatis (2010), Destatis (2015d), KBA (2008a), Destatis (2016), IVD (2008), KBA (2008b), KBA (2008c), Spritmonitor.de, Statistik der Kohlenwirtschaft e. V. (2016) und Wahlberg et al. (2011)

Tabelle A-11: ADAC-Autokosten 2014

	Klein				Mittel				Groß		
	1 Benzin	2 Diesel	3 Elektro	4 Gas	5 Benzin	6 Diesel	7 Gas	8 PHEV	9 Benzin	10 Diesel	11 PHEV
Fixkosten (F) pro Monat	80	95	181	76	98	124	107	109	136	150	152
Werkstattkosten (W) pro Monat	40	51	34	50	59	59	61	48	84	78	103
Energie-/Betriebskosten (E) pro Monat	114	88	68	75	140	104	87	101	178	120	146
Wertverlust (V) pro Monat	194	212	257	184	375	403	383	435	728	614	730
Energiekosten in cent/km (p.a., ADAC: 15.000 km)	9,10	5,37	3,77	4,29	9,51	6,62	5,29	6,41	12,59	7,96	9,97
Kapitalkosten (F+V+W) in cent/km (p.a., ADAC: 15.000 km)	25,14	30,33	39,43	26,41	44,19	48,53	45,71	42,99	77,52	69,01	80,43
Angenommene Laufleistung im Modell	10,4	10,4	10,4	10,4	15,0	15,0	15,0	15,0	17,6	17,6	17,6
<b>Neue Kapitalkosten cent/km (angepasste Laufleistung)</b>	<b>36,15</b>	<b>41,19</b>	<b>54,30</b>	<b>35,55</b>	<b>42,65</b>	<b>47,00</b>	<b>44,16</b>	<b>47,46</b>	<b>64,78</b>	<b>57,49</b>	<b>67,25</b>
Verhältnis Kapitalkosten vs. Energiekosten	4,0	7,7	14,4	8,3	4,5	7,1	8,3	7,4	5,1	7,2	6,7
Referenzfahrzeuge	Renault Twingo, VW Polo 1.2 TSI BMT Comfortline	Opel Corsa 1.3 CDTI ecoFlex Start&Stop Energy,	Renault Zoe Z.E. Life	Opel ADAM 1.4 LPG ecoFlex Jam (Autogasbetrieb), VW up! 1.0 Eco-Fuel BMT take up! (Erdgasbetrieb)	VW Golf 1.4 TSI BMT Comfortline, BMW 320i, Renault Scénic 1.6 16V 110 Authentique, VW T5 Caravelle 2.0 TSI Trendline kurz	VW Golf 2.0 TDI BMT Comfortline, BMW 320d, VW T5 Caravelle 2.0 TDI Comfortline kurz, Renault Scénic dCi 150 Bose Automatik	Mercedes B 200 Natural Gas Drive, Ford Focus 1.6 Ti-VCT LPG Trend	Toyota Prius+ 1.8 Hybrid	Mercedes E 250 T-Modell 7G-TRONIC PLUS, BMW 740i Steptronic, Toyota RAV4 2.0 4x4, Mercedes SLK 350 7G-TRONIC PLUS, Vito Mixto 126 kompakt Automatik	Mercedes E 250 CDI T-Modell, BMW 740d Steptronic, Toyota RAV4 2.2 D-4D Life 4x4, Mercedes C 250 CDI Coupé, Ford S-MAX 2.2 TDCi Titanium X	Mitsubishi Outlander PHEV Intense 4WD CVT-Automatik, Porsche Cayenne S Hybrid Tiptronic S

Quelle: Eigene Berechnungen nach ADAC (2014).

## A.4 Modellergebnisse

Tabelle A-12: Anzahl Neuwagen pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (absolut in Tsd)

	Klein					Mittel					Groß				GESAMT
	Benzin	Diesel	Erdgas	Strom	Gesamt (Klein)	Benzin	Diesel	Erdgas	PHEV	Gesamt (Mittel)	Benzin	Diesel	PHEV	Gesamt (Groß)	
<b>2010</b>															
Standards	465	29	34	7	535	366	488	11	41	906	105	156	16	278	1.719
Förderung	401	19	8	0	429	504	368	8	16	896	143	162	9	314	1.638
ETS+	425	20	9	0	453	533	387	8	12	940	150	169	8	327	1.720
CO <sub>2</sub> -Steuer	410	19	9	0	438	512	379	8	12	911	146	165	8	319	1.667
<b>2020</b>															
Standards	275	14	11	474	774	306	320	7	25	659	78	98	9	185	1.618
Förderung	545	19	8	0	573	644	356	8	10	1.018	137	136	5	278	1.869
ETS+	578	20	9	0	607	687	376	9	8	1.080	147	144	4	295	1.981
CO <sub>2</sub> -Steuer	565	20	9	0	594	669	370	8	8	1.056	143	141	4	288	1.938
<b>2030</b>															
Standards	136	7	5	522	670	163	177	4	40	383	45	53	11	109	1.162
Förderung	499	16	7	0	522	610	311	7	8	937	133	125	4	262	1.721
ETS+	532	17	8	0	557	648	334	8	7	996	141	133	4	278	1.831
CO <sub>2</sub> -Steuer	542	18	8	0	567	661	339	8	7	1.015	144	135	4	283	1.865

Tabelle A-13: Anzahl Neuwagen pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (relativ zum Standards-Szenario in %)

	Klein					Mittel					Groß				GESAMT
	Benzin	Diesel	Erdgas	Strom	Gesamt (Klein)	Benzin	Diesel	Erdgas	PHEV	Gesamt (Mittel)	Benzin	Diesel	PHEV	Gesamt (Groß)	
<b>2010</b>															
Standards	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,0%
Förderung	-14%	-36%	-75%	-99%	-20%	38%	-25%	-30%	-60%	-1%	36%	3%	-43%	13%	-4,7%
ETS+	-9%	-32%	-74%	-100%	-15%	46%	-21%	-27%	-71%	4%	43%	8%	-52%	18%	0,1%
CO <sub>2</sub> -Steuer	-12%	-34%	-75%	-100%	-18%	40%	-22%	-27%	-71%	1%	39%	6%	-51%	15%	-3,0%
<b>2020</b>															
Standards	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,0%
Förderung	98%	32%	-25%	-100%	-26%	111%	11%	13%	-62%	55%	76%	40%	-47%	51%	15,5%
ETS+	110%	39%	-21%	-100%	-22%	125%	17%	19%	-69%	64%	87%	48%	-51%	60%	22,5%
CO <sub>2</sub> -Steuer	106%	37%	-21%	-100%	-23%	119%	15%	19%	-69%	60%	83%	44%	-51%	56%	19,8%
<b>2030</b>															
Standards	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,0%
Förderung	266%	125%	38%	-100%	-22%	275%	76%	94%	-80%	144%	195%	136%	-61%	141%	48,1%
ETS+	290%	142%	50%	-100%	-17%	298%	89%	111%	-83%	160%	214%	151%	-63%	156%	57,6%
CO <sub>2</sub> -Steuer	298%	145%	53%	-100%	-15%	306%	91%	116%	-82%	165%	220%	155%	-62%	161%	60,5%



**Tabelle A-14:** Anzahl Fahrzeuge im Bestand pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (absolut in Tsd)

	Klein					Mittel					Groß				GESAMT
	Benzin	Diesel	Erdgas	Strom	Gesamt (Klein)	Benzin	Diesel	Erdgas	PHEV	Gesamt (Mittel)	Benzin	Diesel	PHEV	Gesamt (Groß)	
<b>2010</b>															
Standards	11.738	259	118	15	12.130	15.646	5.446	122	77	21.290	3.250	2.466	37	5.753	39.173
Förderung	11.675	248	93	8	12.024	15.783	5.326	118	52	21.280	3.288	2.471	30	5.789	39.092
ETS+	11.698	249	93	8	12.048	15.813	5.344	119	47	21.323	3.295	2.479	28	5.803	39.174
CO <sub>2</sub> -Steuer	11.683	249	93	8	12.033	15.792	5.336	119	47	21.295	3.291	2.475	28	5.794	39.121
<b>2020</b>															
Standards	10.716	369	292	2.476	13.854	12.911	7.445	167	424	20.948	2.921	2.800	157	5.878	40.679
Förderung	11.849	349	144	6	12.348	15.209	6.956	153	161	22.479	3.373	2.994	86	6.452	41.279
ETS+	11.946	355	147	5	12.453	15.301	7.062	155	128	22.646	3.395	3.026	77	6.498	41.597
CO <sub>2</sub> -Steuer	11.899	354	148	5	12.405	15.239	7.038	156	129	22.562	3.386	3.014	77	6.476	41.443
<b>2030</b>															
Standards	8.900	361	283	8.256	17.800	10.529	7.737	171	710	19.146	2.511	2.646	225	5.382	42.328
Förderung	12.638	401	171	5	13.216	15.854	7.867	175	197	24.093	3.519	3.269	103	6.891	44.200
ETS+	12.830	409	175	4	13.418	16.079	8.021	179	158	24.436	3.576	3.323	93	6.991	44.845
CO <sub>2</sub> -Steuer	12.785	408	177	4	13.373	16.015	8.001	181	159	24.356	3.564	3.309	93	6.967	44.696

**Tabelle A-15:** Anzahl Fahrzeuge im Bestand pro Szenario und Fahrzeugtechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (relativ zum Standards-Szenario in %)

	Klein					Mittel					Groß				GESAMT
	Benzin	Diesel	Erdgas	Strom	Gesamt (Klein)	Benzin	Diesel	Erdgas	PHEV	Gesamt (Mittel)	Benzin	Diesel	PHEV	Gesamt (Groß)	
<b>2010</b>															
Standards	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,0%
Förderung	-1%	-4%	-22%	-47%	-1%	1%	-2%	-3%	-32%	0%	1%	0%	-19%	1%	-0,2%
ETS+	0%	-4%	-21%	-47%	-1%	1%	-2%	-2%	-38%	0%	1%	1%	-23%	1%	0,0%
CO <sub>2</sub> -Steuer	0%	-4%	-21%	-47%	-1%	1%	-2%	-2%	-38%	0%	1%	0%	-23%	1%	-0,1%
<b>2020</b>															
Standards	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,0%
Förderung	11%	-6%	-51%	-100%	-11%	18%	-7%	-9%	-62%	7%	15%	7%	-45%	10%	1,5%
ETS+	11%	-4%	-50%	-100%	-10%	19%	-5%	-7%	-70%	8%	16%	8%	-51%	11%	2,3%
CO <sub>2</sub> -Steuer	11%	-4%	-50%	-100%	-10%	18%	-5%	-7%	-70%	8%	16%	8%	-51%	10%	1,9%
<b>2030</b>															
Standards	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,0%
Förderung	42%	11%	-40%	-100%	-26%	51%	2%	3%	-72%	26%	40%	24%	-54%	28%	4,4%
ETS+	44%	13%	-38%	-100%	-25%	53%	4%	5%	-78%	28%	42%	26%	-59%	30%	5,9%
CO <sub>2</sub> -Steuer	44%	13%	-38%	-100%	-25%	52%	3%	6%	-78%	27%	42%	25%	-59%	29%	5,6%

**Tabelle A-16:** Wohnfläche im Gebäudebestand pro Szenario und Gebäudetechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (absolut in Mio. m<sup>2</sup>)

	Altbau					Sanierter Altbau				Neubau (Standard)				Neubau (Passivhaus)			GESAMT
	Holz	Kohle	Strom	Erdgas	Heizöl	Holz	Strom	Erdgas	Heizöl	Holz	Strom	Erdgas	Heizöl	Holz	Strom	Erdgas	
<b>2010</b>																	
Standards	92,8	31,9	538,5	1.513,1	939,4	7,7	21,9	75,3	8,0	5,1	14,5	49,9	5,3	0,9	1,9	5,6	3.311,6
Förderung	92,8	31,9	538,5	1.513,1	939,4	9,0	25,3	88,5	9,4	4,6	13,0	44,7	4,8	1,1	2,3	6,8	3.325,0
ETS+	92,8	31,9	538,5	1.513,1	939,4	7,7	21,9	75,4	8,0	5,1	14,5	49,9	5,3	0,9	1,9	5,6	3.311,9
CO2-Steuer	92,8	31,9	538,5	1.513,1	939,4	7,7	21,9	75,2	8,0	5,1	14,5	49,8	5,3	0,9	1,9	5,6	3.311,6
<b>2020</b>																	
Standards	84,0	28,9	487,7	1.370,5	850,9	24,6	68,7	230,6	24,2	16,3	45,5	153,1	16,1	2,8	6,2	17,9	3.428,2
Förderung	81,3	27,9	471,6	1.325,2	822,8	39,7	106,4	386,5	40,1	10,3	28,9	100,7	10,6	4,9	10,8	31,6	3.499,3
ETS+	83,8	28,8	486,5	1.367,0	848,7	24,7	68,9	239,7	25,1	16,3	45,8	159,0	16,7	2,8	6,2	18,0	3.437,9
CO2-Steuer	83,9	28,8	486,8	1.367,9	849,2	24,7	69,0	237,8	24,8	16,4	45,8	158,0	16,5	2,8	6,2	18,1	3.436,7
<b>2030</b>																	
Standards	76,3	26,2	442,8	1.244,3	772,5	52,5	144,9	346,0	36,2	33,9	94,0	233,0	24,4	6,5	14,4	38,2	3.586,2
Förderung	69,6	23,9	404,0	1.135,1	704,7	78,6	211,9	762,4	78,6	17,4	49,0	169,7	17,7	9,8	21,6	63,3	3.817,4
ETS+	74,5	25,6	432,4	1.215,0	754,4	45,8	128,5	439,9	45,7	30,4	85,4	292,5	30,5	5,2	11,6	33,6	3.651,0
CO2-Steuer	74,6	25,6	432,9	1.216,3	755,2	45,8	128,6	437,4	45,1	30,4	85,5	291,3	30,1	5,3	11,7	33,8	3.649,5

**Tabelle A-17:** Wohnfläche im Gebäudebestand pro Szenario und Gebäudetechnologie in Deutschland 2010 bis 2030 (relativ zum Standards-Szenario in %)

	Altbau					Sanierter Altbau				Neubau (Standard)				Neubau (Passivhaus)			GESAMT
	Holz	Kohle	Strom	Erdgas	Heizöl	Holz	Strom	Erdgas	Heizöl	Holz	Strom	Erdgas	Heizöl	Holz	Strom	Erdgas	
<b>2010</b>																	
Standards	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Förderung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	17,5%	15,5%	17,5%	17,0%	-10,4%	-10,3%	-10,3%	-10,2%	21,7%	21,3%	21,7%	0,4%
ETS+	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%
CO2-Steuer	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,2%	-0,1%	-0,2%	0,2%	0,2%	-0,1%	-0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%
<b>2020</b>																	
Standards	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Förderung	-3,3%	-3,3%	-3,3%	-3,3%	-3,3%	61,3%	54,8%	67,6%	65,9%	-36,6%	-36,6%	-34,3%	-34,2%	74,7%	73,2%	76,3%	2,1%
ETS+	-0,3%	-0,3%	-0,3%	-0,3%	-0,3%	0,2%	0,3%	3,9%	3,8%	0,5%	0,6%	3,8%	3,7%	-0,4%	-0,4%	0,5%	0,3%
CO2-Steuer	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	0,2%	0,3%	3,1%	2,4%	0,6%	0,7%	3,2%	2,5%	0,2%	0,2%	0,9%	0,2%
<b>2030</b>																	
Standards	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Förderung	-8,8%	-8,8%	-8,8%	-8,8%	-8,8%	49,7%	46,2%	120,3%	117,2%	-48,5%	-47,9%	-27,2%	-27,3%	50,9%	49,9%	65,7%	6,4%
ETS+	-2,4%	-2,4%	-2,4%	-2,4%	-2,4%	-12,8%	-11,3%	27,1%	26,3%	-10,3%	-9,1%	25,5%	24,8%	-19,7%	-19,5%	-11,9%	1,8%
CO2-Steuer	-2,2%	-2,2%	-2,2%	-2,2%	-2,2%	-12,9%	-11,3%	26,4%	24,6%	-10,3%	-9,0%	25,0%	23,4%	-19,2%	-19,1%	-11,5%	1,8%

**Tabelle A-18:** Energieträgerpreisentwicklung für Haushalte in Deutschland im Zeitraum 2007 bis 2030 in €<sub>2007</sub>/MWh und als relative Veränderung gegenüber dem Szenario „Standards“ (in %)

Szenario	Einheit	Energieträger	2007	2010	2015	2020	2025	2030	Ø p.a.
Standards	€ <sub>2007</sub> /MWh	Benzin	146	190	217	241	248	255	2,5 %
		Diesel	114	148	169	187	193	198	2,5 %
		Erdgas	61	68	73	77	80	81	1,2 %
		Heizöl	59	77	88	98	100	103	2,5 %
		Holz	40	40	40	41	40	40	0,0 %
		Kohle	10	10	11	11	10	10	0,0 %
		Strom	185	191	203	190	191	198	0,3 %
Förderung	€ <sub>2007</sub> /MWh	Benzin	146	190	217	241	248	256	2,5 %
		Diesel	114	148	169	188	193	199	2,5 %
		Erdgas	61	68	73	78	80	81	1,2 %
		Heizöl	59	77	88	98	100	103	2,5 %
		Holz	40	40	40	41	40	40	0,0 %
		Kohle	10	10	11	11	10	10	0,0 %
		Strom	185	191	203	188	188	193	0,2 %
	% ggü. Standards	Benzin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
		Erdgas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	
		Heizöl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
		Holz	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,1	
		Kohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
		Strom	0,0	0,0	0,0	-0,8	-1,7	-2,7	
ETS+	€ <sub>2007</sub> /MWh	Benzin	146	191	218	242	250	259	2,5 %
		Diesel	114	148	169	188	194	201	2,5 %
		Erdgas	61	68	73	78	80	81	1,2 %
		Heizöl	59	77	88	98	101	105	2,5 %
		Holz	40	40	40	40	40	40	0,0 %
		Kohle	10	10	11	11	10	10	0,0 %
		Strom	185	191	205	191	192	197	0,3 %
	% ggü. Standards	Benzin	0,0	0,1	0,1	0,2	0,6	1,3	
		Diesel	0,0	0,1	0,1	0,2	0,6	1,3	
		Erdgas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	
		Heizöl	0,0	0,1	0,1	0,2	0,6	1,3	
		Holz	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	
		Kohle	0,0	-0,3	-0,4	-0,4	-1,0	-1,3	
		Strom	0,0	0,3	0,8	0,4	0,2	-0,5	
CO <sub>2</sub> -Steuer	€ <sub>2007</sub> /MWh	Benzin	146	190	218	241	248	256	2,5 %
		Diesel	114	148	169	188	193	199	2,5 %
		Erdgas	61	68	73	78	80	81	1,2 %
		Heizöl	59	77	88	98	100	104	2,5 %
		Holz	40	40	40	40	40	40	0,0 %
		Kohle	10	10	11	11	10	10	0,0 %
		Strom	185	191	204	190	191	197	0,3 %
	% ggü. Standards	Benzin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
		Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
		Erdgas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
		Heizöl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
		Holz	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	
		Kohle	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	
		Strom	0,0	0,0	0,5	0,1	-0,2	-0,7	

**Tabelle A-19:** CO<sub>2-äq</sub>-Emissionsentwicklung in den Szenarien „Nat-40“ und „EU-40“ in den EU-Mitgliedsstaaten im Zeitraum 1990 bis 2030 absolut und relativ im Vergleich zum Jahr 1990

		<i>Historie</i>		<b>Szenario „EU-40“</b>				
		1990	2007	2010	2015	2020	2025	2030
Mio. t	Deutschland	1.248	977	888,7	861,8	850,9	775,9	653,9
% ggü. 1990	Deutschland	-	-22 %	-29 %	-31 %	-32 %	-38 %	-48 %
Mio. t	Frankreich	560	543	479,3	474,4	458,8	424,8	379,7
% ggü. 1990	Frankreich	-	-3 %	-14 %	-15 %	-18 %	-24 %	-32 %
Mio. t	Österreich	78	87	77,99	77,85	74,18	65,89	56,83
% ggü. 1990	Österreich	-	11 %	0 %	0 %	-5 %	-16 %	-27 %
Mio. t	EU-Nord	1.419	1.305	1220	1174	1112	970,6	836,2
% ggü. 1990	EU-Nord	-	-8 %	-14 %	-17 %	-22 %	-32 %	-41 %
Mio. t	EU-Süd	1.009	1.248	1090	1082	1063	942,9	834,3
% ggü. 1990	EU-Süd	-	24 %	8 %	7 %	5 %	-7 %	-17 %
Mio. t	EU-Ost	1.325	978	918,9	838,5	719,7	578,7	450,2
% ggü. 1990	EU-Ost	-	-26 %	-31 %	-37 %	-46 %	-56 %	-66 %
Mio. t	EU-28	5.626	5.119	4.654	4.498	4.287	3.777	3.234
% ggü. 1990	EU-28	-	-9 %	-17 %	-20 %	-24 %	-33 %	-43 %

		<i>Historie</i>		<b>Szenario „Nat-40“</b>				
		1990	2007	2010	2015	2020	2025	2030
Mio. t	Deutschland	1.248	977	888,4	864,7	848,6	760,5	637,5
% ggü. 1990	Deutschland	-	-22 %	-29 %	-31 %	-32 %	-39 %	-49 %
Mio. t	Frankreich	560	543	480,1	479,5	451,6	403,8	348,8
% ggü. 1990	Frankreich	-	-3 %	-14 %	-14 %	-19 %	-28 %	-38 %
Mio. t	Österreich	78	87	78,06	76,42	70,2	59,12	48,27
% ggü. 1990	Österreich	-	11 %	0 %	-2 %	-10 %	-24 %	-38 %
Mio. t	EU-Nord	1.419	1.305	1220	1153	1070	910,9	767,3
% ggü. 1990	EU-Nord	-	-8 %	-14 %	-19 %	-25 %	-36 %	-46 %
Mio. t	EU-Süd	1.009	1.248	1090	1092	1086	953,8	846,2
% ggü. 1990	EU-Süd	-	24 %	8 %	8 %	8 %	-5 %	-16 %
Mio. t	EU-Ost	1.325	978	918,1	846	761,2	697	593,9
% ggü. 1990	EU-Ost	-	-26 %	-31 %	-36 %	-43 %	-47 %	-55 %
Mio. t	EU-28	5.626	5.119	4.654	4.498	4.287	3.777	3.234
% ggü. 1990	EU-28	-	-9 %	-17 %	-20 %	-24 %	-33 %	-43 %

Quelle: UNFCCC, 2014 und Modellergebnisse; Annahme: CO<sub>2</sub> repräsentativ für alle THG

**Tabelle A-20:** Relativer Welthandelsanteil (RWA) in allen Produktionssektoren und allen Modellregionen im Basisjahr 2007

	Kohle	Erdöl	Erdgas	Mineralöl	Strom	Eisen & Stahl	NE-Metalle	Chemie	Baustoffe	Papier	Lebensmittel & Tabak	Maschinenbau	Fahrzeuge	Restl. Verarbeit. Gew.	Bauwirtschaft	Landwirtschaft	Transport	Dienstleistungen
Deutschland	0,0	0,0	0,0	0,3	1,8	1,0	0,8	1,4	1,2	1,4	1,0	1,2	2,2	0,8	1,5	0,4	0,5	0,7
Frankreich	0,0	0,0	0,0	0,6	3,2	1,3	0,6	1,5	1,2	1,2	1,9	1,0	1,3	0,7	1,4	1,2	1,3	0,9
Österreich	0,0	0,0	0,1	0,1	2,6	1,6	0,9	0,9	1,8	2,2	1,2	0,9	1,6	1,2	1,2	0,3	1,5	1,2
EU-Nord	0,0	0,1	0,1	0,9	0,6	1,2	0,7	1,6	0,7	1,6	1,4	0,8	0,7	0,7	1,0	0,7	1,1	1,8
EU-Süd	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	1,1	0,6	0,9	2,2	1,1	1,2	0,8	1,1	1,3	1,5	1,0	2,1	1,4
EU-Ost	0,7	0,0	0,0	0,6	4,2	1,1	0,8	0,7	1,8	1,2	1,0	1,2	2,0	1,3	1,2	0,9	0,9	0,7
EU-28	0,1	0,0	0,0	0,6	1,6	1,2	0,7	1,3	1,3	1,4	1,3	1,0	1,4	0,9	1,3	0,7	1,2	1,2
USA	0,9	0,0	0,3	1,2	0,3	0,5	0,8	1,2	0,7	1,2	0,8	1,2	0,9	0,5	0,7	1,8	1,0	1,6
Restliche OECD	1,5	0,8	2,0	0,8	0,7	1,0	1,5	0,9	0,7	1,0	0,7	1,3	1,9	0,6	1,4	0,7	0,6	0,6
Schweiz	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,3	2,7	2,2	0,5	0,9	0,5	1,1	0,1	0,7	0,0	0,1	0,8	1,6
Brasilien	0,0	0,5	0,0	1,0	0,3	1,8	1,1	0,6	1,3	1,6	3,7	0,5	1,0	1,6	0,0	4,6	0,6	0,7
Russland	5,6	4,6	5,3	4,0	0,7	2,5	2,0	0,7	0,4	0,6	0,6	0,1	0,2	0,4	1,6	1,4	0,9	0,4
Indien	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	1,3	1,1	0,8	1,0	0,2	1,2	0,3	0,2	2,4	0,6	1,4	1,1	2,0
China	0,6	0,0	0,0	0,5	0,2	1,1	0,5	0,6	1,7	0,5	0,5	1,6	0,2	2,5	0,7	0,4	0,6	0,7
Südafrika	13	0,0	0,0	0,9	1,3	3,3	6,4	0,6	0,6	1,1	1,1	0,4	0,8	1,4	0,1	1,7	1,1	0,6
Nordafri. + Mittl. Ost.	0,0	8,6	5,1	2,8	0,1	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,3	0,7	0,3	1,0	0,6
Restliche OPEC	13	5,4	5,0	1,9	0,1	0,5	1,1	0,6	0,5	1,3	1,5	0,3	0,1	1,1	0,3	1,1	0,4	0,2
Rest der Welt	1,1	1,1	1,0	1,0	1,3	1,0	1,4	0,7	0,7	0,4	1,3	1,1	0,3	1,3	0,7	1,8	1,4	0,8

Quelle: GTAP8-Datenbank (vgl. Narayanan et al., 2012a)

## **Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung**

Bezugsadresse:                   Universität Stuttgart  
  Institut für Energiewirtschaft  
  und Rationelle Energieanwendung  
  - Bibliothek -  
  D-70550 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 87861  
Fax: 0711 / 685 87873  
E-Mail: bib@ier.uni-stuttgart.de

Bestellungen sind auch über Internet möglich:

<http://www.ier.uni-stuttgart.de>

- Band 128      R. Beestermöller  
**Die Energienachfrage privater Haushalte und ihre Bedeutung für den Klimaschutz – Volkswirtschaftliche Analysen zur deutschen und europäischen Klimapolitik mit einem technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell**  
Januar 2017, 211 Seiten, 15 €
- Band 127      M. Ohl  
**Analyse der Einsatzpotenziale von Wärmeerzeugungstechniken in industriellen Anwendungen**  
August 2016, 202 Seiten, 35 €
- Band 126      W. Genius  
**Grüne Bilanzierung - Internalisierung von Umwelt- und Gesundheitsschäden im Rahmen der Input-Output-Rechnung**  
2016, 283 Seiten, 15 €
- Band 125      E. Heyden  
**Kostenoptimale Abwärmerückgewinnung durch integriert-iteratives Systemdesign (KOARiiS) - Ein Verfahren zur energetisch-ökonomischen Bewertung industrieller Abwärmepotenziale**  
2016, 121 Seiten, 15 €
- Band 124      K.Ohlau  
**Strategien zur wirksamen Minderung von Fluglärm in Deutschland - Minderungsmaßnahmen und langfristige Perspektiven**  
2015, 192 Seiten, 15 €
- Band 123      T. Telsnig  
**Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrikas**  
September 2015, 285 Seiten, 15 €

- Band 122 M. Henßler  
**Ganzheitliche Analyse thermochemischer Verfahren bei der Nutzung fester Biomasse zur Kraftstoffproduktion in Deutschland**  
April 2015, 243 Seiten, 15 €
- Band 121 B. Fais  
**Modelling policy instruments in energy system models - the example of renewable electricity generation in Germany**  
Januar 2015, 194 Seiten, 15 €
- Band 120 M. Blesl  
**Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas – eine Energiesystem- und Technikanalyse**  
August 2014, 204 Seiten, 15 €
- Band 119 S. Kempe  
**Räumlich detaillierte Potenzialanalyse der Fernwärmeversorgung in Deutschland mit einem hoch aufgelösten Energiesystemmodell**  
Juli 2014, 204 Seiten, 15 €
- Band 118 B. Thiruchittampalam  
**Entwicklung und Anwendung von Methoden und Modellen zur Berechnung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Emissionen in Europa**  
April 2014, 238 Seiten, 15 €
- Band 117 T. Kober  
**Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue fossil befeuerte Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung im liberalisierten europäischen Elektrizitätsmarkt**  
März 2014, 158 Seiten, 15 €
- Band 116 S. Wissel  
**Ganzheitlich-integrierte Betrachtung der Kernenergie im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung**  
Februar 2014, 230 Seiten, 15 €
- Band 115 R. Kuder  
**Energieeffizienz in der Industrie – Modellgestützte Analyse des effizienten Energieeinsatzes in der EU-27 mit Fokus auf den Industriesektor**  
Februar 2014, 286 Seiten, 15 €
- Band 114 J. Tomaschek  
**Long-term optimization of the transport sector to address greenhouse gas reduction targets under rapid growth – Application of an energy system model for Gauteng province, South Africa**  
Dezember 2013, 263 Seiten, 15 €
- Band 113 B. Rühle  
**Kosten regionaler Energie- und Klimapolitik - Szenarioanalysen mit einem Energiesystemmodell auf Bundesländerebene**  
November 2013, 196 Seiten, 15 €

- Band 112 N. Sun  
**Modellgestützte Untersuchung des Elektrizitätsmarktes - Kraftwerkeinsatzplanung und -investitionen**  
August 2013, 173 Seiten, 15 €
- Band 111 J. Lambauer  
**Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland - Am Beispiel der Nano und Biotechnologie**  
März 2013, 303 Seiten, 15 €
- Band 110 R. Barth  
**Ökonomische und technisch-betriebliche Auswirkungen verteilter Elektrizitätserzeugung in Verteilungsnetzen - eine modellgestützte Analyse am Beispiel eines Mittelspannungsnetzes**  
März 2013, 234 Seiten, 15 €
- Band 109 D. Bruchof  
**Energiewirtschaftliche Verkehrsstrategie - Möglichkeiten und Grenzen alternativer Kraftstoffe und Antriebe in Deutschland und der EU-27**  
März 2012, 226 Seiten, 15 €
- Band 108 E. D. Özdemir  
**The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector - A model based scenario analysis with respect to technical, economic and environmental aspects with a focus on road transport**  
Januar 2012, 194 Seiten, 15 €
- Band 107 U. Kugler  
**Straßenverkehrsemissionen in Europa - Emissionsberechnung und Bewertung von Minderungsmaßnahmen**  
Januar 2012, 236 Seiten, 15 €
- Band 106 M. Blesl, D. Bruchof, U. Fahl, T. Kober, R. Kuder, B. Götz, A. Voß  
**Integrierte Szenarioanalysen zu Energie- und Klimaschutzstrategien in Deutschland in einem Post-Kyoto-Regime**  
Februar 2011, 200 Seiten, 15 €
- Band 105 O. Mayer-Spohn  
**Parametrised Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Hard-Coal-Fuelled Power Plants with Carbon Capture and Storage**  
Dezember 2009, 210 Seiten, 15 €
- Band 104 A. König  
**Ganzheitliche Analyse und Bewertung konkurrierender energetischer Nutzungspfade für Biomasse im Energiesystem Deutschland bis zum Jahr 2030**  
Juli 2009, 194 Seiten, 15 €



- Band 103 C. Kruck  
**Integration einer Stromerzeugung aus Windenergie und Speichersystemen unter besonderer Berücksichtigung von Druckluft-Speicherkraftwerken**  
Mai 2008, 162 Seiten, 13 €
- Band 102 U. Fahl, B. Rühle, M. Blesl, I. Ellersdorfer, L. Eltrop, D.-C. Harlinghausen, R. Küster, T. Rehrl, U. Remme, A. Voß  
**Energieprognose Bayern 2030**  
Oktober 2007, 296 Seiten, 18 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 101 U. Remme, M. Blesl, U. Fahl  
**Global resources and energy trade: An overview for coal, natural gas, oil and uranium**  
Juli 2007, 108 Seiten, 10 €
- Band 100 S. Eckardt  
**Energie- und Umweltmanagement in Hotels und Gaststätten: Entwicklung eines Softwaretools zur systematischen Prozessanalyse und Managementunterstützung**  
Mai 2007, 152 Seiten, 13 €
- Band 99 U. Remme  
**Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell**  
August 2006, 336 Seiten, 20 €
- Band 98 L. Eltrop, J. Moerschner, M. Härdtlein, A. König  
**Bilanz und Perspektiven der Holzenergienutzung in Baden-Württemberg**  
Mai 2006, 102 Seiten, 10 €
- Band 97 B. Frey  
**Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern**  
Mai 2006, 148 Seiten, 13 €
- Band 96 K. Sander  
**Potenziale und Perspektiven stationärer Brennstoffzellen**  
Juni 2004, 256 Seiten, 18 €
- Band 95 M. A. dos Santos Bernardes  
**Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken**  
März 2004, 228 Seiten, 15 €
- Band 94 J. Bagemihl  
**Optimierung eines Portfolios mit hydro-thermischem Kraftwerkspark im börslichen Strom- und Gasterminmarkt**  
Februar 2003, 138 Seiten, 10 €

- Band 93      A. Stuible  
**Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen**  
November 2002, 156 Seiten, 13 €
- Band 92      M. Blesl  
**Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs**  
August 2002, 282 Seiten, 18 €
- Band 91      S. Briem, M. Blesl, M. A. dos Santos Bernardes, U. Fahl, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß  
**Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg**  
August 2002, 138 Seiten, 10 €
- Band 90      B. Frey, M. Neubauer  
**Energy Supply for Three Cities in Southern Africa**  
Juli 2002, 96 Seiten, 8 €
- Band 89      A. Heinz, R. Hartmann, G. Hitzler, G. Baumbach  
**Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin**  
Juli 2002, 212 Seiten, 15 €
- Band 88      M. Sawillion  
**Aufbereitung der Energiebedarfsdaten und Einsatzanalysen zur Auslegung von Blockheizkraftwerken**  
Juli 2002, 136 Seiten, 10 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 87      T. Marheineke  
**Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken**  
Juli 2002, 222 Seiten, 15 €
- Band 86      B. Leven, C. Hoeck, C. Schaefer, C. Weber, A. Voß  
**Innovationen und Energiebedarf - Analyse ausgewählter Technologien und Branchen mit dem Schwerpunkt Stromnachfrage**  
Juni 2002, 224 Seiten, 15 €
- Band 85      E. Laege  
**Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie - Eine modellgestützte Systemanalyse**  
Januar 2002, 254 Seiten, 15 €
- Band 84      S. Molt  
**Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystemanalytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung**  
Oktober 2001, 166 Seiten, 13 €

- Band 83 D. Hartmann  
**Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien**  
September 2001, 228 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 82 G. Kühner  
**Ein kosteneffizientes Verfahren für die entscheidungsunterstützende Umweltanalyse von Betrieben**  
September 2001, 210 Seiten, 15 €
- Band 81 I. Ellersdorfer, H. Specht, U. Fahl, A. Voß  
**Wettbewerb und Energieversorgungsstrukturen der Zukunft**  
August 2001, 172 Seiten, 13 €
- Band 80 B. Leven, J. Neubarth, C. Weber  
**Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen**  
Mai 2001, 166 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 79 R. Krüger, U. Fahl, J. Bagemihl, D. Herrmann  
**Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg**  
April 2001, 142 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 78 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)  
**Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe**  
Februar 2001, 248 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 77 W. Rüffler  
**Integrierte Ressourcenplanung für Baden-Württemberg**  
Januar 2001, 284 Seiten, 18 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 76 S. Rivas  
**Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern**  
Januar 2001, 200 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 75 M. Härdtlein  
**Ansatz zur Operationalisierung ökologischer Aspekte von "Nachhaltigkeit" am Beispiel der Produktion und Nutzung von Triticale (*×Triticosecale* Wittmack)-Ganzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der luftgetragenen N-Freisetzungen**  
September 2000, 168 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 74 T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß  
**Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken**  
August 2000, 118 Seiten, 10 € (z. Zt. vergriffen)

- Band 73 J. Sontow  
**Energiewirtschaftliche Analyse einer großtechnischen Windstromerzeugung**  
Juli 2000, 242 Seiten, 15 €
- Band 72 H. Hermes  
**Analysen zur Umsetzung rationeller Energieanwendung in kleinen und mittleren Unternehmen des Kleinverbrauchersektors**  
Juli 2000, 188 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 71 C. Schaefer, C. Weber, H. Voss-Uhlenbrock, A. Schuler, F. Oosterhuis, E. Nieuwlaar, R. Angioletti, E. Kjellsson, S. Leth-Petersen, M. Togeby, J. Munksgaard  
**Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating - an International Empirical Analysis (EPISODE)**  
Juni 2000, 146 Seiten, 13 €
- Band 70 U. Fahl, J. Baur, I. Ellersdorfer, D. Herrmann, C. Hoeck, U. Remme, H. Specht, T. Steidle, A. Stuible, A. Voß  
**Energieverbrauchsprognose für Bayern**  
Mai 2000, 240 Seiten, 15 €  
Kurzfassung, 46 Seiten, 5 €
- Band 69 J. Baur  
**Verfahren zur Bestimmung optimaler Versorgungsstrukturen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete in Entwicklungsländern**  
Mai 2000, 154 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 68 G. Weinrebe  
**Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken**  
April 2000, 212 Seiten, 15 €
- Band 67 C.-O. Wene, A. Voß, T. Fried (eds.)  
**Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies**  
April 2000, 282 Seiten, 18 €
- Band 66 A. Schuler  
**Entwicklung eines Modells zur Analyse des Endenergieeinsatzes in Baden-Württemberg**  
März 2000, 236 Seiten, 15 €
- Band 65 A. Schäfer  
**Reduction of CO<sub>2</sub>-Emissions in the Global Transportation Sector**  
März 2000, 290 Seiten, 18 €
- Band 64 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)  
**Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture - Processes, Inventories, Mitigation -**  
März 2000, 148 Seiten, 13 €

- Band 63 A. Heinz, R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer, D. Jezierska  
**Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten**  
Dezember 1999, 308 Seiten, 20 €
- Band 62 U. Fahl, M. Blesl, D. Herrmann, C. Kemfert, U. Remme, H. Specht, A. Voß  
**Bedeutung der Kernenergie für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg - Auswirkungen eines Kernenergieausstiegs**  
November 1999, 146 Seiten, 13 €
- Band 61 A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich  
**Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme**  
September 1999, 138 Seiten, 10 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 60 R. Lux  
**Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Stromerzeugung konventioneller Kraftwerkssysteme**  
September 1999, 162 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 59 M. Kayser  
**Energetische Nutzung hydrothormaler Erdwärmevorkommen in Deutschland - Eine energiewirtschaftliche Analyse -**  
Juli 1999, 184 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 58 C. John  
**Emissionen von Luftverunreinigungen aus dem Straßenverkehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung - Untersuchung von Emissions-szenarien am Beispiel Baden-Württembergs**  
Juni 1999, 214 Seiten, 15 €
- Band 57 T. Stelzer  
**Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweg-analysen von Umweltwirkungen**  
Mai 1999, 212 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 56 R. Lux, J. Sontow, A. Voß  
**Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark**  
Mai 1999, 322 Seiten, 20 € (z. Zt. vergriffen)  
Kurzfassung, 48 Seiten, 5 €
- Band 55 B. Biffar  
**Messung und Synthese von Wärmelastgängen in der Energieanalyse**  
Mai 1999, 236 Seiten, 15 €

- Band 54 E. Fleißner  
**Statistische Methoden der Energiebedarfsanalyse im Kleinverbrauchersektor**  
Januar 1999, 306 Seiten, 20 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 53 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (Hrsg.)  
**Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture**  
Januar 1999, 252 Seiten, 18 €
- Band 52 J. Haug, B. Gebhardt, C. Weber, M. van Wees, U. Fahl, J. Adnot, L. Cauret, A. Pierru, F. Lantz, J.-W. Bode, J. Vis, A. van Wijk, D. Staniaszek, Z. Zavody  
**Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Programmes for the Promotion of Condensing Boilers**  
Oktober 1998, 156 Seiten, 13 €
- Band 51 M. Blesl, A. Schweiker, C. Schlenzig  
**Erweiterung der Analysemöglichkeiten von NetWork - Der Netzwerkeditor**  
September 1998, 112 Seiten, 10 €
- Band 50 S. Becher  
**Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen**  
Juli 1998, 200 Seiten, 15 €
- Band 49 P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner, E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuible, A. Voß  
**Einbindung des ECOLOG-Modells 'E<sup>3</sup>Net' und Integration neuer methodischer Ansätze in das IKARUS-Instrumentarium (ECOLOG II)**  
Juli 1998, 110 Seiten, 10 €
- Band 48 G. Poltermann, S. Berret  
**ISO 14000ff und Öko-Audit - Methodik und Umsetzung**  
März 1998, 184 Seiten, 15 €
- Band 47 C. Schlenzig  
**PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung**  
Januar 1998, 230 Seiten, 15 €
- Band 46 R. Friedrich, P. Bickel, W. Krewitt (Hrsg.)  
**External Costs of Transport**  
April 1998, 144 Seiten, 13 €
- Band 45 H.-D. Hermes, E. Thöne, A. Voß, H. Despretz, G. Weimann, G. Kamelander, C. Ureta  
**Tools for the Dissemination and Realization of Rational Use of Energy in Small and Medium Enterprises**  
Januar 1998, 352 Seiten, 20 €

- Band 44 C. Weber, A. Schuler, B. Gebhardt, H.-D. Hermes, U. Fahl, A. Voß  
**Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren**  
Dezember 1997, 186 Seiten, 15 €
- Band 43 J. Albiger  
**Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung**  
November 1997, 168 Seiten, 13 €
- Band 42 P. Berner  
**Maßnahmen zur Minderung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus der Lackanwendung - Vergleich zwischen Abluftreinigung und primären Maßnahmen am Beispiel Baden-Württembergs**  
November 1997, 238 Seiten, 15 €
- Band 41 J. Haug, M. Sawillion, U. Fahl, A. Voß, R. Werner, K. Weiß, J. Rösch, W. Wölflé  
**Analysis of Impediments to the Rational Use of Energy in the Public Sector and Implementation of Third Party Financing Strategies to improve Energy Efficiency**  
August 1997, 122 Seiten, 10 €
- Band 40 U. Fahl, R. Krüger, E. Läge, W. Ruffler, P. Schaumann, A. Voß  
**Kostenvergleich verschiedener CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland**  
August 1997, 156 Seiten, 13 € (z. Zt. vergriffen)
- Band 39 M. Sawillion, B. Biffar, K. Hufendiek, R. Lux, E. Thöne  
**MOSAİK - Ein EDV-Instrument zur Energieberatung von Gewerbe und mittelständischer Industrie**  
Juli 1997, 172 Seiten, 13 €
- Band 38 M. Kaltschmitt  
**Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland**  
April 1997, 108 Seiten, 10 €
- Band 37 C. Böhringer, T. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß  
**Volkswirtschaftliche Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer Berücksichtigung von Umweltsteuern**  
März 1997, 82 Seiten, 8 €
- Band 36 P. Schaumann  
**Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom- und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalisierten Energiemodell**  
Januar 1997, 282 Seiten, 18 €

- Band 35 R. Kühner  
**Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme**  
Dezember 1996, 262 Seiten, 18 €
- Band 34 U. Fahl, P. Schaumann  
**Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen**  
November 1996, 124 Seiten, 10 €
- Band 33 W. Krewitt  
**Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme**  
November 1996, 196 Seiten, 15 €
- Band 32 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, T. Schulze, U. Fahl, A. Voß, A. Perrels, W. van Arkel, W. Pellekaan, M. O'Connor, E. Schenk, G. Ryan  
**Consumers' Lifestyles and Pollutant Emissions**  
September 1996, 118 Seiten, 10 €
- Band 31 W. Ruffler, A. Schuler, U. Fahl, H.W. Balandynowicz, A. Voß  
**Szenariorechnungen für das Projekt *Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg***  
Juli 1996, 140 Seiten, 13 €
- Band 30 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, U. Fahl, A. Voß  
**Energy Consumption and Air-Borne Emissions in a Consumer Perspective**  
September 1996, 264 Seiten, 18 €
- Band 29 M. Hanselmann  
**Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen**  
August 1996, 138 Seiten, 13 €
- Band 28 G. Schmid  
**Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen**  
August 1996, 184 Seiten, 15 €
- Band 27 A. Obermeier, J. Seier, C. John, P. Berner, R. Friedrich  
**TRACT: Erstellung einer Emissionsdatenbasis für TRACT**  
August 1996, 172 Seiten, 13 €
- Band 26 T. Hellwig  
**OMNIUM - Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung in Industriebetrieben**  
Mai 1998, 118 Seiten, 10 €



- Band 25 R. Laing  
**CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias**  
Februar 1996, 221 Seiten, 20 €
- Band 24 P. Mayerhofer, W. Krewitt, A. Trukenmüller, A. Greßmann, P. Bickel, R. Friedrich  
**Externe Kosten der Energieversorgung**  
März 1996, Kurzfassung, 40 Seiten, 3 €
- Band 23 M. Blesl, C. Schlenzig, T. Steidle, A. Voß  
**Entwicklung eines Energieinformationssystems**  
März 1996, 76 Seiten, 3 €
- Band 22 M. Kaltschmitt, A. Voß  
**Integration einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung in den konventionellen Kraftwerksverbund**  
Juni 1995, Kurzfassung, 51 Seiten, 3 €
- Band 21 U. Fahl, E. Läge, W. Ruffler, P. Schaumann, C. Böhringer, R. Krüger, A. Voß  
**Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg**  
September 1995, 454 Seiten, 26 €  
Kurzfassung, 48 Seiten, 3 €
- Band 20 M. Fishedick  
**Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund - Technische Effekte, Kosten, Emissionen**  
Dezember 1995, 196 Seiten, 15 €
- Band 19 A. Obermeier  
**Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg**  
Mai 1995, 208 Seiten, 15 €
- Band 18 N. Kalume  
**Strukturmodule - Ein methodischer Ansatz zur Analyse von Energiesystemen in Entwicklungsländern**  
Dezember 1994, 113 Seiten, 10 €
- Band 17 Th. Müller  
**Ermittlung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung**  
November 1994, 142 Seiten, 10 €
- Band 16 A. Wiese  
**Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland**  
Juni 1994, 223 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)

- Band 15 M. Sawillion, T. Hellwig, B. Biffar, R. Schelle, E. Thöne  
**Optimierung der Energieversorgung eines Industrieunternehmens unter Umweltschutz- und Wirtschaftlichkeitsaspekten - Wertanalyse-Projekt**  
Januar 1994, 154 Seiten, 13 €
- Band 14 M. Heymann, A. Trukenmüller, R. Friedrich  
**Development prospects for emission inventories and atmospheric transport and chemistry models**  
November 1993, 105 Seiten, 10 €
- Band 13 R. Friedrich  
**Ansatz zur Ermittlung optimaler Strategien zur Minderung von Luftschadstoffemissionen aus Energieumwandlungsprozessen**  
Juli 1992, 292 Seiten, 18 €
- Band 12 U. Fahl, M. Fishedick, M. Hanselmann, M. Kaltschmitt, A. Voß  
**Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentiale energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten**  
August 1992, 471 Seiten, 26 €
- Band 11 M. Kaltschmitt, A. Wiese  
**Potentiale und Kosten regenerativer Energieträger in Baden-Württemberg**  
April 1992, 320 Seiten, 20 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 10 A. Reuter  
**Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützten Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern**  
November 1991, 170 Seiten, 13 €
- Band 9 T. Kohler  
**Einsatzmöglichkeiten für Heizreaktoren im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland**  
Juli 1991, 162 Seiten, 13 €
- Band 8 M. Mattis  
**Kosten und Auswirkungen von Maßnahmen zur Minderung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg**  
Juni 1991, 188 Seiten, 13 €
- Band 7 M. Kaltschmitt  
**Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs**  
Dezember 1990, 178 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 6 G. Schmid, A. Voß, H.W. Balandynowicz, J. Cofala, Z. Parczewski  
**Air Pollution Control Strategies - A Comparative Analysis for Poland and the Federal Republic of Germany**  
Juli 1990, 92 Seiten, 8 €

- Band 5 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß,  
J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt  
**Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb**  
Juli 1990, 484 Seiten, 28 €
- Band 4 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß,  
J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt  
**Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee**  
Juni 1990, 498 Seiten, 28 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 3 D. Kluck  
**Einsatzoptimierung von Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung**  
Mai 1990, 155 Seiten, 10 €
- Band 2 M. Fleischhauer, R. Friedrich, S. Häring, A. Haugg, J. Müller, A. Reuter,  
A. Voß, H.-G. Wystrcil  
**Grundlagen zur Abschätzung und Bewertung der von Kohlekraftwerken  
ausgehenden Umweltbelastungen in Entwicklungsländern**  
Mai 1990, 316 Seiten, 20 €
- Band 1 U. Fahl  
**KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft und  
Energiepolitik**  
März 1990, 265 Seiten, 18 €