

# Klimaschutzpolitik der EU:

Analyse und Bewertung von  
Politikinstrumenten zur Minderung  
von agrarrelevanten THG-Emissionen



- Modellierung mit dem GTAP-Modell -





## Klimaschutzpolitik der EU





Viktoriya Sturm

**Klimaschutzpolitik der EU: Analyse und Bewertung von  
Politikinstrumenten zur Minderung von agrarrelevanten  
THG-Emissionen**

- Modellierung mit dem GTAP-Modell -

*Für meine Eltern.  
Моїм батькам.*



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

Zugl.: Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen

Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement, 2016

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9389-1

eISBN 978-3-7369-8389-2



## Vorwort

Viktoriya Sturm greift in ihrer Arbeit ein agrar- und umweltpolitisch hoch interessantes Thema auf. Es geht um den Klimaschutz und die Klimaschutzpolitik bezogen auf die Landwirtschaft. Konkret werden die Auswirkungen spezieller CO<sub>2</sub>-Steuern in Deutschland und der EU zur Senkung agrarrelevanter Treibhausgas(THG)-Emissionen untersucht. Die Autorin verwendet dazu das weltweit anerkannte allgemeine Gleichgewichtsmodell GTAP (Global Trade Analysis Project), das sie für ihre Fragestellung um wichtige Elemente erweitert. Agrarpolitisch ist das Thema interessant, weil landwirtschaftliche Erzeuger und Nahrungsmittelverbraucher unmittelbar von solchen Steuern betroffen sind und die Hauptlast dieser sektoralen Klimaschutzpolitik tragen. Und umweltpolitisch stellt sich die Frage, wie effektiv und effizient sektoral ansetzende Klimaschutzpolitiken im Hinblick auf THG-Minderungen sind. Die Arbeit setzt sich zum Ziel, die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer auf die Produktion von N-Düngemitteln in der EU-27, einer CO<sub>2</sub>-Steuer auf die Ausbringung von N-Mineraldünger in der EU und separat in Deutschland, sowie einer CO<sub>2</sub>-Verbrauchssteuer auf rotes Fleisch und Milchprodukte in der EU und separat in Deutschland im Hinblick auf ihre Mengenwirkungen in ausgewählten Sektoren, auf Änderungen von makroökonomischen Indikatoren sowie auf die THG-Vermeidungskosten einzelner Maßnahmen hin zu quantifizieren.

Die Arbeit enthält eine umfassende Bestandaufnahme zur Klimaproblematik, Klimapolitik und zur Rolle der Landwirtschaft. Es geht dabei zunächst um die Fakten der Klimaänderung sowie deren Ursachen und mögliche Folgen. Anschließend beschäftigt sich die Autorin ausführlich mit der Klimapolitik auf internationaler Ebene, in der EU und schließlich in Deutschland. Die Chronologie der internationalen Verhandlungen und ihre Ergebnisse werden kenntnisreich und mit umfangreichem Quellenmaterial erläutert und im Kontext dazu die EU-Klimapolitik und die deutsche Klimapolitik vorgestellt und kommentiert. Nachfolgend wird die Rolle der Landwirtschaft bei der Klimaänderung näher betrachtet. Dabei werden die Emissionen aus der Landwirtschaft dokumentiert, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft dargestellt, sowie der mögliche Beitrag der Landwirtschaft zum Klimaschutz erläutert.

Darüber hinaus enthält die Arbeit eine theoretische Analyse der Klimaschutzproblematik. Es geht um die Erdatmosphäre als globale gesellschaftliche Ressource und deren Beeinträchtigung durch THG-Emissionen. Ausführlich werden die Instrumente der Internalisierung externer Effekte am Standardfall untersucht sowie als Vertiefung beim Vorliegen unvollkommener Märkte, multipler externer Effekte und nichtlinearer Beziehungen zwischen Produktion und Schadenhöhe. Interessant und wichtig ist außerdem die Darstellung des Carbon-Leakage-Effekts als Folge unilateraler Klimapolitiken. Im Anschluss bietet die Arbeit einen Überblick zu den politischen Initiativen zur Minderung der THG-Emissionen, der zwischen Politikmaßnahmen für explizite und implizite Preissetzungen sowie Initiativen zur Minderung agrarrelevanter THG-Minderungen differenziert. Einzelne ergriffene Maßnahmen werden dabei nicht nur beschrieben, sondern auch mit entsprechenden Literaturbelegen bewertet. So erfolgt beispielsweise eine kurze Diskussion zur Biokraftstoffpolitik und zu den



gesundheitlichen Aspekten eines verminderten Verbrauchs von Milch- und Fleischprodukten. Zusätzlich wird auf einen für die Politikgestaltung höchst relevanten Aspekt, nämlich auf die Wechselwirkungen unterschiedlicher Klimaschutzregime, eingegangen.

Ein weiterer zentraler Teil der Arbeit ist die eigene empirische Analyse der Autorin mit dem GTAP-Modell, das sie für ihre Fragestellung erweitert. Nach der Szenarienformulierung und der Umrechnung einer CO<sub>2</sub>-Steuer auf einen äquivalenten Zuschlag auf die Produktions- bzw. Verbrauchssteuern werden die Simulationsergebnisse vorgestellt, einer Sensitivitätsanalyse unterzogen und mit anderen Studien verglichen. Schließlich präsentiert die Autorin eine Reihe interessanter Ergebnisse, die gerade auch für die Politikgestaltung von Relevanz sind: Eine einseitig in der EU oder Deutschland erhobene CO<sub>2</sub>-Steuer auf die Produktion und Ausbringung von Düngemitteln hat nicht nur erhebliche Wohlfahrtsverluste für die Region zur Folge, sondern erhöht in Folge des Carbon-Leakage-Effekts sogar die weltweiten THG-Emissionen, ist also eindeutig kontraproduktiv. Eine CO<sub>2</sub>-Verbrauchssteuer auf rotes Fleisch und Milchprodukte weist zwar keinen Carbon-Leakage Effekt auf, kann also selbst bei einem Alleingang der EU oder Deutschlands weltweit zur Emissionsminderung beitragen, doch ist der Minderungseffekt weltweit recht gering bei gleichzeitig hohen Kosten für die Konsumenten.

Es ist der eindeutige Verdienst der Autorin, mehr quantitativ nachvollziehbares Licht in das Dunkel der Klimadiskussion gebracht zu haben. Zugleich sind die Ergebnisse eine Warnung an die Politik, nicht vorschnell auf zwar populäre Maßnahmen zu setzen, sondern mit Augenmaß und in Abstimmung mit anderen Ländern jene Eingriffe vorzunehmen, bei denen die volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten am geringsten sind. Viktoriya Sturm legt somit ein umfassendes, sehr gelungenes Werk zur Klimaproblematik vor, das theoretisch bestens fundiert, empirisch höchst anspruchsvoll und von großer Politikrelevanz ist.

Gießen, im Oktober 2016

Prof. Dr. Dr. h.c. P. M. Schmitz



## Danksagung der Autorin

Von der Formulierung der Forschungsfrage bis zum Ausdruck der Endfassung dieser Arbeit war es ein langer Weg. Der Hauptteil entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur für Agrar- und Entwicklungspolitik des Instituts für Agrarpolitik und Marktforschung an der Justus-Liebig-Universität Gießen unter der Leitung von Prof. Dr. Dr. h. c. P. Michael Schmitz. Die Fertigstellung erfolgte zuhause während der Elternzeit mit meinem zweiten Kind. Zur erfolgreichen Fertigstellung dieser Arbeit haben viele Personen beigetragen, denen ich im Folgenden ganz herzlich danken möchte.

Mein erster Dank geht an meinen Doktorvater Herrn Prof. Michael Schmitz dafür, dass er mir die Möglichkeit zur Promotion an seiner Professur gegeben hat, die Freiheit ließ, meine eigenen Ideen umzusetzen, mit seinem Rat in schwierigen Situationen geholfen hat und immer wieder mit seiner überzeugenden und pragmatischen Art und Weise mir die Sicherheit zurückgegeben hat, dass ich die Arbeit erfolgreich abschließen werde. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Schmitz für das Anvertrauen vielfältiger Aufgaben sowohl im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin als auch im Rahmen meiner Arbeit als Koordinatorin der Universitätspartnerschaften, deren Partnerschaftsbeauftragter Prof. Schmitz war. Die Abwicklung dieser Aufgaben verzögerte zwar die Fertigstellung meiner Dissertation, war aber eine tolle Lebensschule, die ich sehr zu schätzen weiß. Als feinfühliges Chef und guter Doktorvater hat Herr Prof. Schmitz aber dafür gesorgt, dass ich mit meiner Arbeit in den Endspurt gehe, und hat mir im letzten Jahr meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin viel Freiraum gegeben, sodass ich mich auf das Schreiben meiner Arbeit konzentrieren konnte.

Mein herzlicher Dank geht auch an Herrn Prof. Dr. Martin Banse, Direktor des Thünen-Instituts für Marktanalyse in Braunschweig, für die fachlich gute Beratung und die Ermutigung meine Forschung voranzutreiben, sowie für die Bereitschaft sich als Zweitgutachter zur Verfügung zu stellen. An dieser Stelle möchte ich auch Dr. Janine Pelikan besonderen Dank sagen, da sie mich als wichtige Ansprechperson in Braunschweig fachlich und moralisch unterstützte, und auch für das erste Treffen mit Herrn Prof. Banse gesorgt hat.

Weiterhin danke ich herzlich allen meinen ehemaligen Kollegen für das angenehme Arbeitsklima, für viele interessante Diskussionen und gegenseitige Unterstützung. Ein besonderer Dank geht an meine Zimmerkollegin Dr. Nataliya Möser, an Dr. Nomman Ahmed, mit dem ich den Promotionsweg zusammen eingeschlagen habe, an Hendrik Garvert, Dr. Joachim Hesse, Nadia Keudel, und Margot Lamp sowie an Dr. Matthias Höher, Dr. Tetyana Demydas und Nino Chkoidze. Auch meinen Freunden außerhalb der Universität, sowohl in Deutschland als auch in der Ukraine, danke ich herzlich für deren Unterstützung. Olena Poperechna, Dr. Nataliya Schmitz und Sabine Bornemann möchte ich hier namentlich nennen.



Schließlich danke ich allen meinen Familienangehörigen für ihre stetige Unterstützung und den Glaube an mich. Ich danke meinen Schwiegereltern Esther und Manfred Sturm sowie Christian Sturm sehr für die zuverlässige Unterstützung bei der Betreuung meiner Kinder, sowie für ein offenes Ohr für meine Sorgen um die Fertigstellung der Arbeit. Einen besonderen Dank verdienen mein lieber Ehemann Matthias und meine beiden Kinder Dominik und Evelina. Die Geburten meiner Kinder haben meine Promotion zwar verzögert und nicht unbedingt einfacher gemacht, aber gerade durch die Kinder bekam ich den nötigen Abstand zur Arbeit und, ich habe gelernt, effizienter zu arbeiten. Matthias hat mich beim Vorhaben die Promotion abzuschließen immer unterstützt und in Momenten der Unsicherheit und Unruhe beruhigt und aufgebaut. Stetige Unterstützung auf dem ganzen Weg meiner Promotion bekam ich auch aus meiner Heimat, der Ukraine. Mein Bruder Vadim Svystun mit seiner Familie, meine Tante Galyna Bashtova mit ihrer Familie und sogar meine Oma Maria haben mich ständig unterstützt und ermutigt die Arbeit zu Ende zu bringen. Mein abschließender herzlicher Dank geht an meine Eltern Nadiia und Mykola Svystun dafür, dass sie mir eine gute akademische Ausbildung in der Ukraine ermöglicht haben und mich bei meinem Vorhaben in Deutschland weiter zu studieren und auch zu promovieren mit allen ihren Kräften unterstützt haben. Ohne meine Eltern wäre die Promotion nicht möglich gewesen, daher widme ich ihnen dieses Buch.

Gießen, im Oktober 2016

Viktoriya Sturm

---

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	XII
Tabellenverzeichnis .....	XV
Abbildungsverzeichnis .....	XVII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Zielsetzung .....	1
1.2 Aufbau der Dissertationsschrift.....	3
<b>2 Klimaänderung und Klimapolitik .....</b>	<b>6</b>
2.1 Klimaänderung: Beobachtungen, Ursachen, Folgen.....	7
2.1.1 Beobachtete Klimaänderung.....	7
2.1.2 Ursachen der Klimaerwärmung.....	9
2.1.3 Projizierte Änderungen des Klimas in der Zukunft und deren Folgen .....	12
2.2 Klimapolitik .....	15
2.2.1 Internationale Klimapolitik.....	15
2.2.2 Klimapolitik der EU .....	34
2.2.3 Klimaschutzpolitik der Bundesrepublik Deutschland .....	54
<b>3 Rolle der Landwirtschaft bei der Klimaänderung.....</b>	<b>65</b>
3.1 THG-Emissionen aus der Landwirtschaft .....	65
3.1.1 Abgrenzung des Sektors und Bilanzierungsmethoden .....	65
3.1.2 Agrarrelevante THG-Emissionen weltweit .....	67
3.1.3 Agrarrelevante THG-Emissionen in Deutschland: Zusammensetzung und Trends .....	69
3.2 Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Landwirtschaft .....	76
3.2.1 Methodische Ansätze zur Abschätzung der Folgen der Klimaänderung.....	76
3.2.2 Globale Auswirkungen der Klimaänderung auf die Landwirtschaft .....	77
3.2.3 Folgen der Klimaänderung für die Landwirtschaft in Deutschland .....	82
3.3 Möglicher Beitrag der Landwirtschaft zum Klimaschutz .....	87
3.3.1 Handlungsoptionen / Wege zur Minderung der THG-Emissionen .....	87
3.3.2 Globale Ebene.....	89
3.3.3 EU und Deutschland .....	94

---

<b>4</b>	<b>Politikmaßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen: Theorie</b> .....	<b>100</b>
4.1	Management von „global commons“ .....	100
4.1.1	Erdatmosphäre als globale gesellschaftliche Ressource .....	100
4.1.2	THG-Emissionen als negativer externer Effekt.....	101
4.1.3	Herausforderungen und Ansätze des Managements von „global commons“ .....	101
4.2	Instrumente der Internalisierung negativer externer Effekte.....	103
4.2.1	Marktineffizienz beim Auftreten eines negativen externen Effekts .....	103
4.2.2	Wirkungsanalyse der Instrumente der Internalisierung: Grundgedanken .....	104
4.2.3	Wirkungsanalyse der Instrumente der Internalisierung: Vertiefung .....	107
4.2.4	Unilaterale Klimapolitik und „carbon leakage“ Effekt.....	110
4.3	Kosten-Nutzen-Analyse der Klimapolitik.....	112
4.3.1	Kosten-Nutzen-Analyse als Instrument der Analyse.....	112
4.3.2	Nutzen der Klimapolitik .....	113
4.3.3	Kosten der Klimapolitik .....	117
4.3.4	Optimales Minderungsziel und optimaler Minderungspfad .....	120
4.3.5	Unsicherheiten und Frage der Gerechtigkeit .....	121
<b>5</b>	<b>Politische Initiativen zur Minderung der THG-Emissionen</b> .....	<b>123</b>
5.1	Politikmaßnahmen für explizite Preissetzung auf THG-Emissionen.....	123
5.1.1	Emissionsrechtshandlungssysteme .....	126
5.1.2	Kohlenstoffsteuer.....	131
5.2	Politikmaßnahmen für implizite Preissetzung auf THG-Emissionen .....	132
5.2.1	Überblick .....	132
5.2.2	Steuer auf Energieträger .....	133
5.2.3	Standards und Kennzeichnungen.....	136
5.2.4	Mengen- und Preissteuerung zur Förderung erneuerbarer Energien .....	142
5.2.5	Kapitalzuschüsse und Steuererleichterungen .....	147
5.3	Initiativen zur Minderung der agrarrelevanten THG-Emissionen .....	147
5.3.1	Überblick .....	147
5.3.2	Preissetzung auf Emissionen aus der Produktion von Düngemitteln in der EU....	152
5.3.3	Steuer auf Düngemittel bzw. Düngerüberschuss.....	154
5.3.4	Steuer auf gesättigte Fettsäuren in Dänemark .....	163
5.4	Wechselwirkungen zwischen Politikmaßnahmen für explizite und implizite Preissetzung auf THG-Emissionen .....	165

---

<b>6</b>	<b>Eigene empirische Analyse der Politikinstrumente zur Minderung der agrarrelevanten THG-Emissionen mit dem GTAP-Modell.....</b>	<b>166</b>
6.1	GTAP-Modell als methodische Wahl .....	167
6.1.1	Begründung der Methodenauswahl .....	167
6.1.2	Überblick über das Standard-GTAP-Modell .....	169
6.1.3	GTAP-Datenbasis .....	183
6.2	Modellmodifikation und Erweiterung der Datenbasis .....	187
6.2.1	Anforderungen der empirischen Fragestellung an Modell und Datenbasis.....	187
6.2.2	Modifikation der Produktionsfunktion des Standard-GTAP-Modells .....	189
6.2.3	Anpassung der Datengrundlage .....	191
6.3	Szenarienformulierung und vorbereitende Berechnungen .....	199
6.3.1	Szenarienformulierung .....	199
6.3.2	Vorbereitende Simulation: EU-Osterweiterung .....	200
6.3.3	Berechnungen zu Einflussgrößen der CO <sub>2</sub> -Steuer.....	201
6.4	Simulationsergebnisse .....	206
6.4.1	Präsentation ausgewählter Ergebnisse .....	206
6.4.2	Sensitivitätsanalyse .....	229
6.4.3	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und Vergleich mit anderen Studien .....	237
<b>7</b>	<b>Kurzfassung der Arbeit und Abschlussbetrachtungen.....</b>	<b>241</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>253</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>278</b>
9.1	Modifikation des Standard-GTAP-Modellcodes .....	278
9.2	Disaggregation des GTAP-Sektors „crp“ .....	282
9.3	GEMPACK Files für die Durchführung der Vorbereitenden Simulation (VS) .....	291
9.4	GEMPACK File für die Durchführung der Simulationen.....	294
9.5	Simulationsergebnisse .....	296



---

## Abkürzungsverzeichnis

AEE	Agentur für Erneuerbare Energien
AGBM	Ad hoc Group Berliner Mandate
AGGG	Advisory Group on Greenhouse Gases
AIJ	Activities Implemented Jointly
AOSIS	Alliance of Small Island States
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers
ÄV / EV	Äquivalente Variation / Equivalent Variation
BAPA	Buenos Aires Plan of Action
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BtL	Biomass to Liquid
CARB	California Air Resources Board
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek
CCS	Carbon capture and Storage
CDE	Constant Difference of Elasticity
CDM	Clean Development Mechanism
CEFIC	The European Chemical Industry Council
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)
CES	Constant Elasticity of Substitution
CGEM	Computable General Equilibrium Model
CH <sub>4</sub>	Methan
CLASP	Collaborative Labeling and Appliance Standards Program
CMP	Conference of the Parties Serving as the Meeting of the Parties to the Kyoto Protocol
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
COP	Conference of the Parties
CRF	Common Reporting Format
dena	Deutsche Energie-Agentur GmbH
EC	European Commission
ECCC	Energy and Climate Change Committee
ECCP	European Climate Change Programme
EEA	European Environment Agency
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EES	Energy Efficient Strategies, Australia



---

EPA	U.S. Environmental Protection Agency
EU ETS/EHS	EU Emissions Trading System / Emissionshandelssystem der EU
EU	Europäische Union
Eurostat	Statistical Office of the European Communities
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
FIT	Feed-in Tariff
GA	General Assembly
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GBEP	Global Bioenergy Partnership
GEMPACK	General Equilibrium Modelling PACKage
GRFA	Global Renewable Fuels Alliance
GTAP	Global Trade Analysis Project
IA	Integrated Assessment
ICSU	International Council of Scientific Union
IEA	International Energy Agency
IECC	International Energy Conservation Code
IFA	International Fertilizer Industry Association
IFPRI	International Food Policy Research Institute
IMF	International Monetary Fund
INC	Intergovernmental Negotiating Committee
INDC	Intended Nationally Determined Contribution
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
IRSG	International Rubber Study Group
ISO	International Standards Organisation
ITMO	Internationally Transferred Mitigation Outcome
JI	Joint Implementation
KNA	Kosten-Nutzen-Analyse
KRK	Klimarahmenkonvention
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
LDCs	Least-Developed Countries
LGM	Lembaga Getah Malaysia / Malaysian Rubber Board
LULUC	Land Use, Land-Use Change
MAC	Marginal Abatement Cost
MEPS	Minimum Energy Performance Standard
MINAS	Minerals Accounting System
MSR	Markstabilisierungsreserve
MW	Mittelwert



---

N	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
NAP	Nationaler Aktionsplan
NCEE	National Center for Environmental Economics
NGO	Non-Governmental Organization
NIR	National Inventory Report
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PICCMAT	Policy Incentives for Climate Change Mitigation Agricultural Techniques
PRTP	Pure Rate of Time Preference
RGGI	Regional Greenhouse Gas Initiative
RSB	Roundtable on Sustainable Biofuels
SA	Standardabweichung
SCC	Social Cost of Carbon
SRES	Special Report on Emissions Szenarios
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
SSA	Systematische Sensitivitätsanalyse
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
ÜBN	Übertragungsnetzbetreiber
UN/VN	United Nations / Vereinte Nationen
UNCED	United Nation Conference on Environment and Development
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USA	United States of America
USDA	United States Department of Agriculture
WBA	Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WCED	World Commission on Environment and Development
WMO	Weltmeteorologische Organisation
WTO	World Trade Organization



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Ländergruppen und deren spezifische Verpflichtungen gemäß der Klimarahmenkonvention .....	20
Tabelle 2.2:	Emissionsbegrenzungs- und Reduktionsverpflichtungen für Annex-I-Länder im Kyoto-Protokoll .....	22
Tabelle 2.3:	Energiesteuersätze 1999 bis 2006 (in Cent).....	59
Tabelle 2.4:	Förderung von Biokraftstoffen durch Beimischungs- – bzw. Klimaschutzquote .....	64
Tabelle 3.1:	Emissionsquellen agrarrelevanter THG-Emissionen .....	66
Tabelle 3.2:	Kumulierte THG-Emissionen aus der Bereitstellung von Vorleistungen für die Landwirtschaft (Dreijahresmittel 2006-2008) .....	74
Tabelle 3.3:	Überblick über THG-Minderungsmaßnahmen im Bereich Landwirtschaft in Deutschland.....	96
Tabelle 4.1:	Geschätzte Wohlfahrtsverluste in Folge der Klimaänderung .....	114
Tabelle 4.2:	Ausgewählte Eigenschaften gesellschaftlicher Kosten v. Kohlenstoff und deren Wachstumsrate .....	116
Tabelle 4.3:	Zehn Szenarien des EMF 22.....	118
Tabelle 5.1:	C-Steuer: Einführungsjahr, geschätzter Anteil erfasster Emissionen und Steuersatz (2014) .....	131
Tabelle 5.2:	CO <sub>2</sub> -Emissionsgrenzwerte / Kraftstoffverbrauchsstandards für PKWs .....	141
Tabelle 5.3:	Weltweit festgelegte Ziele und Beimischungsquoten für Biokraftstoffe .....	143
Tabelle 5.4:	Beispiele gesundheitsmotivierter Steuern auf Lebensmittel in Industrieländern .....	150
Tabelle 5.5:	Übersicht über Düngemittelsteuern und -abgaben in der EU und Norwegen .....	156
Tabelle 5.6:	Steuersystem auf N- und P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Überschüsse in den Niederlanden .....	161
Tabelle 6.1:	Ausgewählte Angaben zur GTAP v7.0.....	183
Tabelle 6.2:	Länder und Regionen in der GTAP-Datenbasis (v7.0).....	184
Tabelle 6.3:	Sektoren in der GTAP-Datenbasis (v7.0).....	186
Tabelle 6.4:	Aggregation der Länder und Regionen der GTAP-Datenbasis (v7.0).....	192
Tabelle 6.5:	Aggregation der Sektoren der GTAP-Datenbasis (Version 7).....	193
Tabelle 6.6:	Korrespondenz zw. ausgewählten GTAP-Sektoren und Sektoren der NACE/ISIC-Systematik ..	195
Tabelle 6.7:	Anteile der Sektoren „FERT“ und „r_crp“ am Sektor „crp“ für einzelne Regionen, 2004 .....	196
Tabelle 6.8:	Ermittelte Kostenstruktur der Sektoren "FERT" und „r_crp“, Mio. US \$ .....	196
Tabelle 6.9:	Bilaterale Handelsvolumen der Sektoren „FERT“ und „r_crp“, Mio. \$, 2004 .....	197
Tabelle 6.10:	Angaben zum Sektor "FERT", Mio. \$, 2004 .....	197
Tabelle 6.11:	Werte der Substitutionselastizität $\sigma_{LF}$ in unterschiedlichen Regionen .....	198
Tabelle 6.12:	Überblick der formulierten Simulationsszenarien .....	199
Tabelle 6.13:	Überblick zu den Shocks innerhalb der VS .....	201
Tabelle 6.14:	Steuerlasten von CO <sub>2</sub> -Steuern auf Emissionen aus der Produktion von N-Düngemitteln .....	202
Tabelle 6.15:	"Schock 1" - CO <sub>2</sub> -Steuer auf Emissionen aus der Produktion von N-Düngemitteln .....	202
Tabelle 6.16:	Steuerlasten von CO <sub>2</sub> -Steuern auf Emissionen vom Verbrauch synthetischer N-Düngemittel .....	203
Tabelle 6.17:	"Schock 2" - CO <sub>2</sub> -Steuer auf Emissionen vom Verbrauch synthetischer N-Düngemittel .....	204
Tabelle 6.18:	Steuerlasten von CO <sub>2</sub> -Steuern auf Endkonsum von Rindfleisch und Milcherzeugnisse .....	205
Tabelle 6.19:	"Schock 3" - CO <sub>2</sub> -Steuer auf Endkonsum von Rindfleisch und Milcherzeugnisse .....	206
Tabelle 6.20:	Änderungen bilateraler Handelsströme* im Sektor "FERT", % .....	209
Tabelle 6.21:	Änderungen bilateraler Handelsströme* im Sektor "cmt", % .....	216
Tabelle 6.22:	Änderungen des Mengenindex für weltweites Angebot (qow), % .....	219
Tabelle 6.23:	Änderungen von BIP, Äquivalenter Variation und Terms of Trade .....	220
Tabelle 6.24:	Änderungen von Gesamthandelsbilanzen (DBTAL) und Handelsbilanzen für ausgewählte Sektoren (DTBALi), Mio. US \$ .....	222
Tabelle 6.25:	Berechnungen spezifischer Änderungen der THG-Emissionen .....	224
Tabelle 6.26:	Berechnungen der Kosten von der Vermeidung spezifischer THG-Emissionen .....	225
Tabelle 6.27:	Berechnungen der Kosten für die Vermeidung spezifischer THG-Emissionen.....	228
Tabelle 6.28:	MW und SA der Veränderungen ausgewählter Werte bei Variation der Armington-Elastizitäten (Sim. 1, Sim. 2.1 und Sim. 2.2) .....	231
Tabelle 6.29:	MW und SA der Veränderungen ausgewählter Werte bei Variation der Armington-Elastizitäten (Sim. 3.1 und Sim. 3.2) .....	232
Tabelle 6.30:	MW und SA der Veränderungen der Äquivalenten Variation bei Variation der Armington-Elastizitäten, Mio. US\$.....	233
Tabelle 6.31:	MW und SA der Veränderungen ausgewählter Werte bei Variation der Substitutionselastizitäten "Land-FERT" (Sim. 1, Sim. 2.1 und Sim. 2.2) .....	234
Tabelle 6.32:	Veränderungen ausgewählter Werte bei CO <sub>2</sub> -Preis von 20, 40 und 60 US\$/t CO <sub>2</sub> -Äq. (Sim. 1, Sim. 2.1 und Sim. 2.2) .....	235
Tabelle 6.33:	Veränderungen ausgewählter Werte bei CO <sub>2</sub> -Preis von 20, 40 und 60 US\$/t CO <sub>2</sub> -Äq. (Sim. 3.1 und Sim. 3.2).....	236

---

Tabelle 9.1: Berechnung der Anteile der Sektoren „FERT“ und „crp“ am GTAP-Sektor „crp“ für die Regionen „Germany“, „BGR_ROU“ und „rEU_25“, 2004 .....	282
Tabelle 9.2: Berechnung des weltweiten Produktionswerts für den Sektor "crp"*, 2004 .....	283
Tabelle 9.3: Berechnung des weltweiten Produktionswerts für den Sektoren "FERT", 2004 .....	283
Tabelle 9.4: Anteile von Sektoren „FERT“ und „crp“ am Sektor „crp“ in einzelnen Regionen, 2004 .....	283
Tabelle 9.5: Ausgewählte Daten der europäischen jährlichen Unternehmensstatistik für die Berechnung der Kostenstruktur des Sektors „FERT“, 2004 .....	284
Tabelle 9.6: Kostenstruktur der Sektoren "crp", "FERT", "r_crp", USA, 2007.....	285
Tabelle 9.7: Kostenstruktur des Sektors "crp" gemäß der Daten der GTAP-Datenbasis.....	285
Tabelle 9.8: Ermittelte Kostenstruktur der Sektoren "FERT" und „r_crp“.....	287
Tabelle 9.9: EU Handel mit Düngemitteln, Mio. EUR, 2004.....	288
Tabelle 9.10: Gesamtes Exportvolumen von Düngemitteln für ausgewählte Regionen, Mio. \$, 2004 .....	288
Tabelle 9.11: Handelsvolumen von Düngemitteln für ausgewählte Regionen, Mio. \$, 2004 .....	288
Tabelle 9.12: Bilaterale Handelsvolumen der Sektoren „FERT“ und „r_crp“, Mio. \$, 2004 .....	289
Tabelle 9.13: Angaben zum Sektor "FERT", Mio. \$, 2004 .....	290
Tabelle 9.14: Differenzierung ausgewählter Verwendungsdaten ("FERT", "r_crp" zu "GrainsCrops") .....	290
Tabelle 9.15: Simulationsergebnisse - Änderungen der Preise.....	296
Tabelle 9.16: Simulationsergebnisse – Mengenänderungen.....	299
Tabelle 9.17: Simulationsergebnisse – Änderungen der makroökonomischen Indikatoren .....	304

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Änderung der globalen Erdoberflächentemperatur seit 1850	7
Abb. 2.2:	Beobachtete Änderungen von Klimaelementen	8
Abb. 2.3:	Änderungen der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid, Methan und Lachgas	10
Abb. 2.4:	Projizierte THG-Emissionen und Multimodell-Mittel, geschätzte Bandbreite für die Erwärmung an der Erdoberfläche nach ausgewählten SRES-Szenarien	13
Abb. 2.5:	Projizierte THG-Emissionen und Multimodell-Mittel, geschätzte Bandbreite für die Erwärmung an der Erdoberfläche nach ausgewählten SRES-Szenarien	14
Abb. 2.6:	Beobachtete globale CO <sub>2</sub> Emissionen (a), Ausdehnung des arktischen Meereises (b) und Veränderung des Meeresspiegels (c) im Vergleich zur IPCC Szenarien	15
Abb. 2.7:	EU-Klimapaket vom 23.04.2009	45
Abb. 2.8:	Zuteilung des Emissionsbudgets der EU	46
Abb. 2.9:	Nationale Emissionsziele für Sektoren außerhalb des EU-EHS für 2020 (Bezugsjahr 2005)	49
Abb. 2.10:	THG-Emissionen in Deutschland nach Sektoren seit 1990 sowie Ziele für 2020 und 2050	56
Abb. 2.11:	Entkopplung der THG-Emissionen vom Wirtschaftswachstum in Deutschland	57
Abb. 2.12:	Entkopplung nachfragebasierter THG-Emissionen vom Wirtschaftswachstum in Deutschland	58
Abb. 2.13:	Emissionsrechtzuteilung im EU-EHS, 2005-2012	60
Abb. 2.14:	Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland, 1990-2014*	62
Abb. 2.15:	EEG-Gesamtvergütung und EEG-Umlage für Strom in Deutschland, 2000-2016	62
Abb. 3.1:	Globale THG-Emissionen aus der Landwirtschaft (CRF4), 2005	67
Abb. 3.2:	Global durch die Landwirtschaft verursachte THG-Emissionen	68
Abb. 3.3:	Agrarrelevante THG-Emissionen in Deutschland, 2011	69
Abb. 3.4:	THG-Emissionen aus der Quellgruppe CRF4.Landwirtschaft, Deutschland, 1990-2011	70
Abb. 3.5:	Entwicklung der Tierplatzzahlen der deutschen Berichterstattung und Inlandsabsatz von N-Handelsdünger in Deutschland, 1990-2011	71
Abb. 3.6:	Entwicklung der THG-Emissionen in der Quellgruppe 5, Acker- und Grünlandnutzung, Deutschland, 1990-2011	72
Abb. 3.7:	Prozentuale Änderung der Erträge als Reaktion auf steigende Temperaturen	79
Abb. 3.8:	Projizierte Änderung der Temperatur in 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts) relativ zu 1961-1990	82
Abb. 3.9:	Projizierte Änderung der jährlichen (links) und sommerlichen (rechts) Niederschlagsmenge in 2071-2100 relativ zu 1961-1990	83
Abb. 3.10:	Simulierte Ertragsänderungen von Winterweizen und Silomais (2031-50 relativ zu 1991-2010)	86
Abb. 3.11:	Zusammenhang zwischen technischen, ökonomischen und marktwirtschaftlichen Minderungspotentialen	89
Abb. 3.12:	Weltweites biophysisches Minderungspotential der Landwirtschaft bis 2030	90
Abb. 3.13:	Weltweite Vermeidungsgrenzkostenkurve für die Landwirtschaft bis 2030	91
Abb. 4.1:	Marktineffizienz beim Auftreten eines negativen externen Effekts	103
Abb. 4.2:	Pigou-Steuer und Umweltzertifikate als Instrumente der Internalisierung	105
Abb. 4.3:	Wohlfahrtsanalyse der Instrumente der Internalisierung	106
Abb. 4.4:	Wirkungen von Quote und Steuer bei Unsicherheiten	109
Abb. 4.5:	„Carbon Leakage“ Effekt als Folge unilateraler Klimapolitik	111
Abb. 4.6:	Änderungen globaler BIP in Folge der Klimaerwärmung	114
Abb. 4.7:	Änderungen globaler BIP in Folge der Klimaerwärmung	116
Abb. 4.8:	Kerndichteschätzung der Kohlenstoffsteuer (Ziel: 550 ppm CO <sub>2</sub> -Äq. in 2100)	119
Abb. 4.9:	Perzentile der Kohlenstoffsteuer in 2015 als Funktionen der THG-Konzentrationen in 2100	119
Abb. 4.10:	Dichtefunktion der optimalen THG-Konzentration für drei alternative Zeitpräferenzraten	120
Abb. 5.1:	Eingeführte, geplante und potentielle nationale und subnationale EHS und Kohlenstoffsteuern	124
Abb. 5.2:	Kohlenstoffpreise in vorhandenen Preissetzungssystemen	125
Abb. 5.3:	Regionale und nationale EHS: Einführungszeitpunkt & Anteil an globalen THG-Emissionen	127
Abb. 5.4:	Effektive Preise für CO <sub>2</sub> -Emissionen im Stromerzeugungssektor nach Form der Politikinstrumente	133
Abb. 5.5:	Besteuerung von Energieträgern im OECD-Raum*	134
Abb. 5.6:	Anzahl der Energieeffizienz-Standards und -Kennzeichnungen je Land und Produktgruppe	138
Abb. 5.7:	Grundsätzliche Fördermodelle für erneuerbare Energien	146
Abb. 5.8:	N- und P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Verbrauch und entsprechende Steuersätze in Schweden (1982-2012)	159
Abb. 5.9:	Stickstoffverbrauch und Preisentwicklung für N-Düngemittel in Norwegen (1959-2003)	160
Abb. 5.10:	Inputs und Überschüsse von N (a) bzw. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (b) in den Niederlanden (1980-2013)	162
Abb. 6.1:	Grafische Darstellung des Standard-GTAP-Modells	170
Abb. 6.2:	Besteuerung und Subventionierung der Nachfrage des privaten Haushalts	173

---

Abb. 6.3: Besteuerung und Subventionierung des Angebots .....	174
Abb. 6.4: Besteuerung und Subventionierung von Exporten .....	175
Abb. 6.5: Besteuerung und Subventionierung von Importen .....	175
Abb. 6.6: Produktionsstruktur des Standard-GTAP-Modells.....	177
Abb. 6.7: Konsumstruktur des Standard-GTAP-Modells .....	180
Abb. 6.8: Modifizierte Produktionsstruktur des GTAP-Modells .....	190
Abb. 6.9: Änderungen von Produktions- Inlandsabsatz-, Export- und Importmengen bei „FERT“ .....	208
Abb. 6.10: Änderungen von Gesamt-, Inlands- und Importnachfrage nach „FERT“ bei „GrainsCrops“ .....	211
Abb. 6.11: Änderungen von Produktions- Inlandsabsatz-, Export- und Importmengen bei „GrainsCrops“ .....	212
Abb. 6.12: Änderungen von Produktions- Inlandsabsatz-, Export- und Importmengen bei „ctl_rmk_mil “ .....	214
Abb. 6.13: Änderungen der Nachfrage des Endverbrauchers nach Produkte des Sektors „ctl_rmk_mil “ .....	215
Abb. 6.14: Änderungen von Produktions- Inlandsabsatz-, Export- und Importmengen bei „cmt“ .....	217
Abb. 6.15: Änderungen der Nachfrage der Endverbraucher nach Produkte des Sektors „cmt“.....	218



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das relativ stabile Erdklima in den letzten 10.000 Jahren hat den Aufstieg und das Bestehen der menschlichen Zivilisation überhaupt erst ermöglicht. Allerdings wurden in der Vergangenheit bereits Aufstiege und Niedergänge von ganzen Kulturen zum Teil durch klimawandelbedingte Instabilitäten und Extremen geprägt (KENNETT, & MARWAN, 2015). Viele Menschen empfinden aber trotzdem das Klima in ihren Regionen als selbstverständliche Gegebenheit. Daher müssen sich viele mit der Aussage, dass sich unser Klima erwärmt und die Menschheit handeln muss um dies einzudämmen, erst einmal abfinden.

Auf wissenschaftlicher Ebene wird über Änderungen des Erdklimas, deren Ursachen und Folgen schon seit Jahrhunderten diskutiert. Mittlerweile gilt als gesichert, dass sich das Erdklima erwärmt und diese Erwärmung durch den beobachteten Anstieg der anthropogenen THG-Emissionen verursacht ist (IPCC, 2014A, 2007A). Die negativen Folgen der fortschreitenden ungebremsten Klimaerwärmung können für die Menschheit gravierend sein (IPCC, 2007B).

Angesichts der Gefahren, die eine Klimaänderung mit sich bringt, ist es auch nachvollziehbar, dass Klimaänderung zum politischen Thema geworden ist: Verantwortungsvolle Politik kann mögliche negative Folgen der Klimaänderung nicht ignorieren, sondern muss darauf eine Antwort geben. Obwohl es eine Weile gedauert hat, bis Politiker dieses Thema aufgegriffen haben, ist Klimapolitik heute sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene nicht mehr wegzudenken.

Das im Dezember 2015 bei COP-21 in Paris ausgehandelte „Pariser Abkommen“ ist ein neuer Meilenstein und in vielen Sichten der bisher größte Erfolg der internationalen Klimapolitik (STAVINS, 2015; AHRENS ET AL., 2015). Nach 25 Jahren UN-Klimadiplomatie haben Stellvertreter der Regierungen der Welt zum ersten Mal einen umfassenden Vertrag verabschiedet, der Klimaschutzbeiträge von allen Staaten vorsieht. Somit wurde die Ära der Aufteilung der Welt in „Industrie“ und „Nicht-Industriestaaten“ mit Auferlegung der Pflichten zur Minderung von THG-Emissionen alleine auf die „Industriestaaten“, die bei der COP-1 in Berlin 1995 geschaffen wurde, und mit dem Kyoto-Protokoll für fast 20 Jahre zementiert worden war, beendet. Der Abkehr von dieser Dichotomie war dringend nötig, da nach Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls in 2005 ein weiterer Anstieg von THG-Emissionen lediglich in großen Entwicklungsländern wie China, Indien, Brasilien, Korea, Südafrika, Mexiko und Indonesien stattfindet. Industriestaaten, die unter dem bis 2020 verlängerten Kyoto-Protokoll zu Emissionsminderungen verpflichtet sind, decken nicht mehr als 14% der weltweiten THG-Emissionen und weisen kein Emissionswachstum auf. Zum Ende der COP-21 haben 186 von 195 Mitgliedsstaaten der UNFCCC, die derzeit für ca. 96% der globalen THG-Emissionen verantwortlich sind, ihre beabsichtigten nationalen Emissionsminderungsbeiträge vorgelegt.



Ein internationales Klimaabkommen kann allerdings nur dann Erfolge bringen, wenn einzelne Staaten eigene nationale Minderungsziele festlegen und Instrumente, mit deren Hilfe diese Ziele erreicht werden können, ausgearbeitet werden.

Bereits im Jahr 2007 hat der Europäische Rat beschlossen, dass die EU eine unabhängige Verpflichtung eingeht ihre THG-Emissionen bis 2020 um 20% gegenüber 1990 zu reduzieren. Der Umsetzung dieses ambitionierten Klimaschutzziels dient das sogenannte „EU-Klimapaket“. Es besteht aus vier Rechtsetzungsakten, die unterschiedliche Aspekte der EU-Klimapolitik regeln: Emissionshandels-Richtlinie zur Weiterentwicklung des EU EHS; Entscheidung über Lastverteilung zur Festlegung nationaler Ziele zur Minderung von THG-Emissionen in Sektoren außerhalb des EU EHS; Erneuerbare-Energien-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien und CCS-Richtlinie zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung.

Das EU EHS ist das wichtigste Instrumentarium der EU zur Minderung der THG-Emissionen. Allerdings erfasst das durch die Emissionshandels-Richtlinie für die Handelsperiode 2013-2020 neu geregelte EU EHS weniger als die Hälfte der THG-Emissionen der EU. Für die Minderung der verbleibenden Emissionen aus den Sektoren, die nicht unter das EU EHS fallen, insbesondere aus dem Straßenverkehr, des Gebäudesektors, der Landwirtschaft und der Abfallwirtschaft, bildet die Entscheidung über Lastverteilung die einheitlichen Rahmenbedingungen. Die Richtlinie sieht eine EU-weite Minderung von THG-Emissionen aus den Sektoren vor, die nicht unter das EU EHS fallen, in 2020 von insgesamt 10% gegenüber dem Niveau von 2005. Einzelne EU-Mitgliedsstaaten haben dabei spezifische Beiträge in Form verbindlicher nationaler Emissionsziele zu leisten. Im Gegensatz zu Emissionen aus Sektoren, die unter das EU EHS fallen und deren Menge auf EU-Ebene reguliert ist, liegt es in der Verantwortung der Mitgliedsstaaten nationale Politikmaßnahmen zur Begrenzung der THG-Emissionen aus Sektoren, die unter die Entscheidung über Lastverteilung fallen, zu definieren und umzusetzen.

Gemäß Inventarbericht zu THG-Emissionen der EU hat die Landwirtschaft einen Anteil von 10,3% an den gesamten (ohne LULUCF) THG-Emissionen (Deutschland: 7,4%) und ist somit nach der Quellkategorie „Energie“ die zweitbedeutendste Quellkategorie der THG-Emissionen (EEA, 2014; UBA, 2014). Daher verdienen auch die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft und die Möglichkeiten deren Minderung besondere Aufmerksamkeit.

In der vorliegenden Arbeit wird daher untersucht, welche Politikinstrumente zur Minderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft eingesetzt werden können und wie effizient diese sind. Allerdings werden unter Emissionen aus der Landwirtschaft nicht nur solche verstanden, die gemäß dem festgelegten Berichtsformat der UNFCCC auf die Quellkategorie „Landwirtschaft“ anfallen, sondern auch solche, die bei sektoralen Ansätzen zur Bilanzierung der gesamten landwirtschaftlichen Emissionen berücksichtigt werden. Diese Emissionen werden in der vorliegenden Arbeit agrarrelevante THG-Emissionen genannt und umfassen sowohl die Emissionen der Quellkategorie „Landwirtschaft“ als



auch indirekte Emissionen, die bei der Produktion landwirtschaftlicher Vorleistungen entstehen und Emissionen, die durch Einsatz von Energie und Treibstoffen bei der landwirtschaftlichen Produktion und durch Landnutzung und Landnutzungsänderung entstehen. Die Bewertung einzelner Politikinstrumente erfolgt außerdem nicht nur nach dem Territorialprinzip, d.h. ob einzelne Politikinstrumente zu Emissionsminderungen in den betroffenen Regionen führen, sondern auch auf globaler Ebene. Im Mittelpunkt der Betrachtung liegt die Klimapolitik der EU, daher wird eine Einführung ausgewählter Politikmaßnahmen in der gesamten EU oder nur in einer Region - Deutschland – untersucht. Für diese Analyse kommt ein allgemeines Gleichgewichtsmodell GTAP zum Einsatz.

## 1.2 Aufbau der Dissertationsschrift

Nach dieser Einleitung wird in **Kapitel 2** zuerst das Phänomen Klimaänderung näher betrachtet. Es werden die wichtigsten Beobachtungen dargestellt, die eine Aussage über die aktuelle Erwärmung des Klimas untermauern, Ursachen dieser Klimaerwärmung geschildert und Projektionen zukünftiger Änderungen des Klimas sowie deren Auswirkungen auf unterschiedliche Systemen vorgestellt. Im Anschluss folgt ein Überblick über Klimapolitik, die als Folge der Anerkennung der Klimaänderung als ernsthaftes Problem entstanden ist. Dabei wird die Entstehung und Entwicklung der Klimapolitik zuerst auf internationaler Ebene und dann auf Ebene der EU und der Bundesrepublik Deutschland näher betrachtet. Die Darstellung der Entwicklung der internationalen Klimapolitik reicht von der ersten Weltklimakonferenz in Genf in 1979, über die Verabschiedung der Klimarahmenkonvention in Rio de Janeiro in 1992, die Unterzeichnung des Protokolls von Kyoto in 1997 und dessen Inkrafttreten in 2005 bis zu dem im Dezember 2015 bei COP-21 in Paris ausgehandelten „Pariser Abkommen“. Bei Betrachtung der Klimapolitik der EU werden neben dem Überblick über die Entstehung und die historische Entwicklung vor allem vier Komponenten des EU-Klimapaketes von 2009 ins Visier genommen. Zum Schluss wendet sich der Blick auf die Klimapolitik der Bundesrepublik Deutschland zur Minderung der THG-Emissionen. Es wird die Rolle der Bundesrepublik Deutschland in der internationalen Klimapolitik analysiert und politische Maßnahmen zur Minderung nationaler THG-Emissionen betrachtet.

In **Kapitel 3** wird die Rolle der Landwirtschaft als Verursacher, Betroffene und Wohltäter in Frage der Klimaänderung näher betrachtet. Die landwirtschaftliche Produktion ist mit dem Ausstoß von THG-Emissionen verbunden, wodurch die Landwirtschaft als Verursacher der Klimaänderung anzusehen ist. Daher werden zuerst THG-Emissionen aus der Landwirtschaft auf globaler Ebene und in der Bundesrepublik Deutschland unter Berücksichtigung unterschiedlicher Möglichkeiten der Abgrenzung des Sektors und Bilanzierungsmethoden analysiert. Die Landwirtschaft ist Betroffene der Klimaänderung, da die Veränderung klimatischer Bedingungen einen direkten Einfluss auf die landwirtschaftliche Produktion hat. Entsprechend folgt im Anschluss eine Betrachtung der Folgen der Klimaänderung für die Landwirtschaft auf globaler Ebene, sowie in Deutschland. Die Landwirtschaft kann bspw. helfen Kohlenstoff aus der Luft zu binden und im Boden zu speichern oder durch Produktion von Biokraftstoffen, die fossile Brennstoffe ersetzen, zur Minderung der THG-Emissionen beitragen und als Wohltäter in

Fragen der Klimaänderung auftreten. Über den möglichen Beitrag der Landwirtschaft zum Klimaschutz sowohl auf globaler Ebene als auch in der EU und Deutschland wird ebenso diskutiert.

Um die fortschreitende Klimaerwärmung einzudämmen, müssen weltweit THG-Emissionen gemindert werden. In **Kapitel 4** wird aus theoretischer Sicht betrachtet, welche Politikinstrumente ergriffen werden können, um THG-Emissionen zu mindern. Dabei wird zuerst auf die Besonderheiten des Managements globaler gesellschaftlicher Ressourcen, zu denen die Erdatmosphäre gehört, und den Umgang mit negativen externen Effekten, zu denen auch THG-Emissionen gehören, eingegangen. Dann wird eine theoretische Analyse der Instrumente zur Internalisierung externer Effekte wie Pigou-Steuer oder Quote durchgeführt. Mit Hinblick auf das globale Ausmaß der Problematik der THG-Emissionen wird dabei das Auftreten der „carbon-leakage“ Problematik bei der unilateralen Klimapolitik zusätzlich analysiert. Zum Schluss wird die Kosten-Nutzen-Analyse als Methode für die Bewertung unterschiedlicher Optionen der Politik zur Minderung der THG-Emissionen dargestellt.

Eine Mehrheit der Industrieländer haben Politikmaßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen bereits durchgeführt, weitere Politikmaßnahmen sowohl in Industrie- als auch in Schwellen- und Entwicklungsländern sind geplant oder werden gerade getestet. **Kapitel 5** bietet einen Überblick über bereits umgesetzte oder für die Zukunft vorgesehene Politikmaßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen. Dabei wird zwischen Politikmaßnahmen für explizite Preissetzung auf THG-Emissionen (Emissionsrechtshandelssysteme und Kohlenstoffsteuer) und Politikmaßnahmen für implizite Preissetzung auf THG-Emissionen (Steuer auf Energieträger, Standards und Kennzeichnungen, Mengen- und Preissteuerung zur Förderung erneuerbarer Energien, Kapitalzuschüsse und Steuererleichterungen) unterschieden. Es werden sowohl Maßnahmen dargestellt, die die gesamten THG-Emissionen aus der Wirtschaft einzelner Länder bzw. Regionen begrenzen sollen, als auch spezifische Politikmaßnahmen, die darauf ausgelegt sind bestimmte THG-Emissionen zu minimieren. Gesondert wird dabei auf Initiativen zur Minderung agrarrelevanter THG-Emissionen (Preissetzung auf Emissionen aus der Produktion von Düngemitteln in der EU, Steuer auf Düngemittel bzw. Düngerüberschuss, Steuer auf gesättigte Fettsäuren in Dänemark) eingegangen.

In **Kapitel 6** wird eine eigene empirische Analyse der Politikinstrumente zur Minderung agrarrelevanter THG-Emissionen mit dem GTAP-Modell präsentiert. Nach Begründung der Wahl des allgemeinen Gleichgewichtsmodell GTAP als Methodenauswahl folgt ein Überblick zur Struktur des Standard-GTAP-Modells und der GTAP-Datenbasis. Danach werden Anforderungen der empirischen Fragestellung an Modell und Datenbasis diskutiert und deren Umsetzung anschließend beschrieben: Die Produktionsfunktion des Standard-GTAP-Modells wird modifiziert um eine Substitution zwischen den Faktoren Boden und Düngemittel zu ermöglichen; eine lizenzgeeignete Datenbasis wird generiert und um einen weiteren Sektor „FERT“ (Düngemittel) erweitert. Die Analyse der Politikinstrumente zur Minderung agrarrelevanter THG-Emissionen erfolgt anhand von fünf Simulationen. Simulationsszenarien werden erst verbal formuliert, und anschließend werden einzelne „Shocks“, die die Einführung spezifischer CO<sub>2</sub>-Steuern in Deutschland und EU-27 darstellen, berechnet. Vor der Durchführung der



beschriebenen Simulationen erfolgt noch eine vorbereitende Simulation, die eine EU-Erweiterung berücksichtigt. Die erhaltenen Simulationsergebnisse werden in Hinblick auf Output-, Handel- und Konsumänderungen für relevante Sektoren sowie Änderungen von makroökonomischen Indikatoren und Änderungen von THG-Emissionen präsentiert. Eine detaillierte Sensitivitätsanalyse wird eingesetzt, um die Ergebnisse auf ihre Robustheit zu überprüfen. Anhand der erzielten Simulationsergebnisse werden Schlussfolgerungen gezogen.

In **Kapitel 7** werden schließlich die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.



## 2 Klimaänderung und Klimapolitik

In diesem Kapitel wird zuerst das Phänomen Klimaänderung näher betrachtet. Es werden die wichtigsten Beobachtungen dargestellt, die eine Aussage über die aktuelle Erwärmung des Klimas untermauern, Ursachen dieser Klimaerwärmung geschildert und Projektionen zukünftiger Änderungen des Klimas sowie deren Auswirkungen auf unterschiedliche Systeme vorgestellt. Erkenntnisse über die Klimaänderung lassen sich auf Basis zahlreicher Veröffentlichungen zu diesem Thema gewinnen. Die Berichte des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (engl.: Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC<sup>1</sup>) genießen aber eine Sonderstellung. Diese umfassenden Berichte und deren Zusammenfassungen für Entscheidungsträger werden von den Regierungen weitgehend anerkannt und als wissenschaftliche Grundlage für die nationalen Klimapolitiken herangezogen. Außerdem sind die IPCC-Berichte eine Hauptinformationsquelle bei Verhandlungen im Rahmen der UNFCCC. Auch die folgende Darstellung orientiert sich im Wesentlichen auf die drei Bände des in 2007 veröffentlichten Vierten IPCC-Sachstandsberichts (Fourth Assessment Report of the IPCC, AR4) (IPCC 2007A, 2007B, 2007C)

Die Erwärmung des Erdklimas wurde bereits vor Jahrzehnten als ernsthaftes Problem anerkannt und führte zur Entstehung der Klimapolitik. Somit werden als nächster Schritt die Entstehung und Entwicklung der Klimapolitik zuerst auf internationaler Ebene und dann auf Ebene der EU und der Bundesrepublik Deutschland näher betrachtet. Eine Darstellung der historischen Entwicklung der internationalen Klimapolitik reicht von der ersten Weltklimakonferenz in Genf in 1979, über die Verabschiedung der Klimarahmenkonvention in Rio de Janeiro in 1992, die Unterzeichnung des Protokolls von Kyoto in 1997 und dessen Inkrafttreten in 2005 bis zu aktuellen Verhandlungen über die Gestaltung des künftigen Klimaabkommens. Bei Betrachtung der Klimapolitik der EU werden neben dem Überblick über die Entstehung und die historische Entwicklung vor allem vier Komponenten des EU-Klimapakets von 2009 ins Visier genommen. Zum Schluss wendet sich der Blick auf die Klimapolitik der Bundesrepublik Deutschland zur Minderung der THG-Emissionen. Es wird die Rolle der Bundesrepublik Deutschland in der internationalen Klimapolitik analysiert und politische Maßnahmen zur Minderung nationaler THG-Emissionen betrachtet.

---

<sup>1</sup> Der IPCC ist ein wissenschaftliches zwischenstaatliches Gremium, das im Jahr 1988 von der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet wurde. Seine Aufgabe besteht darin, eine objektive Informationsquelle über die Klimaänderungen, seine Ursachen, mögliche Folgen und über die Optionen zur Anpassung an und Minderung von Klimaänderung für politische Entscheidungsträger und anderen am Klimawandel Interessierten zur Verfügung zu stellen. Der IPCC betreibt selbst keine Forschung, sondern trägt die aktuelle klimarelevante weltweit publizierte Literatur umfassend, objektiv, offen und transparent zusammen und bewertet sie. (IPCC, 2011: <http://www.de-ipcc.de/de/119.php>)

## 2.1 Klimaänderung: Beobachtungen, Ursachen, Folgen

### 2.1.1 Beobachtete Klimaänderung

Im engeren Sinne wird Klima als das Durchschnittswetter definiert. Etwas genauer: Klima ist die statistische Beschreibung des Wetters in Form von Mittelwerten und Schwankungsbereichen von Klimaelementen (Temperatur, Niederschlag, Wind, Druck usw.) bezogen auf einen mittleren Zeitraum (IPCC, 2007A; MÖLLER, 2010). Die Weltmeteorologische Organisation (WMO) hat diese Mittelungsperiode auf 30 Jahre festgelegt, jedoch werden auch andere Zeitspannen verwendet (z. B. 20 Jahre in einigen Kapiteln der IPCC-Berichte). Klimaänderung ist jede Änderung des Klimas im Verlauf der Zeit und bezieht sich dementsprechend auf jede Änderung der Mittelwerte und/oder Schwankungsbereiche von Klimaelementen, die identifiziert werden kann und länger andauert.

Die Beobachtung von Klimaelementen ist daher wichtig, damit eine Aussage über die Klimaänderung gemacht werden kann. Die derzeit festgestellte Klimaänderung ist vor allem auf den Anstieg der beobachteten mittleren Temperaturen weltweit zurückzuführen. Ausreichend viele instrumentale Temperaturmessungen, die es erlauben eine quasi-globale Temperatur zu ermitteln, gibt es seit 1850. Diesen Messungen zufolge hat sich die mittlere globale Erdoberflächentemperatur seit 1850 um rund  $0,8^{\circ}\text{C}$  erhöht (Abb. 2.1). Bei Betrachtung der linearen Trends über die unterschiedlichen Perioden lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass sich der Temperaturanstieg beschleunigt hat. So zeigt der 100jährige lineare Trend noch eine Erwärmung von  $0,074^{\circ}\text{C}$  pro Jahrzehnt und der 50jährige lineare Trend bereits  $0,128^{\circ}\text{C}$  pro Jahrzehnt.

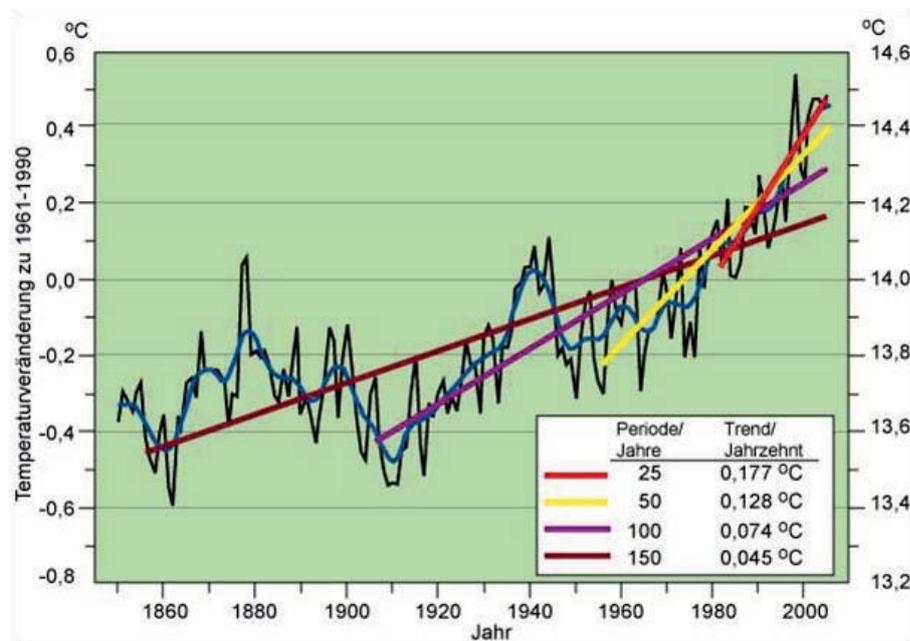
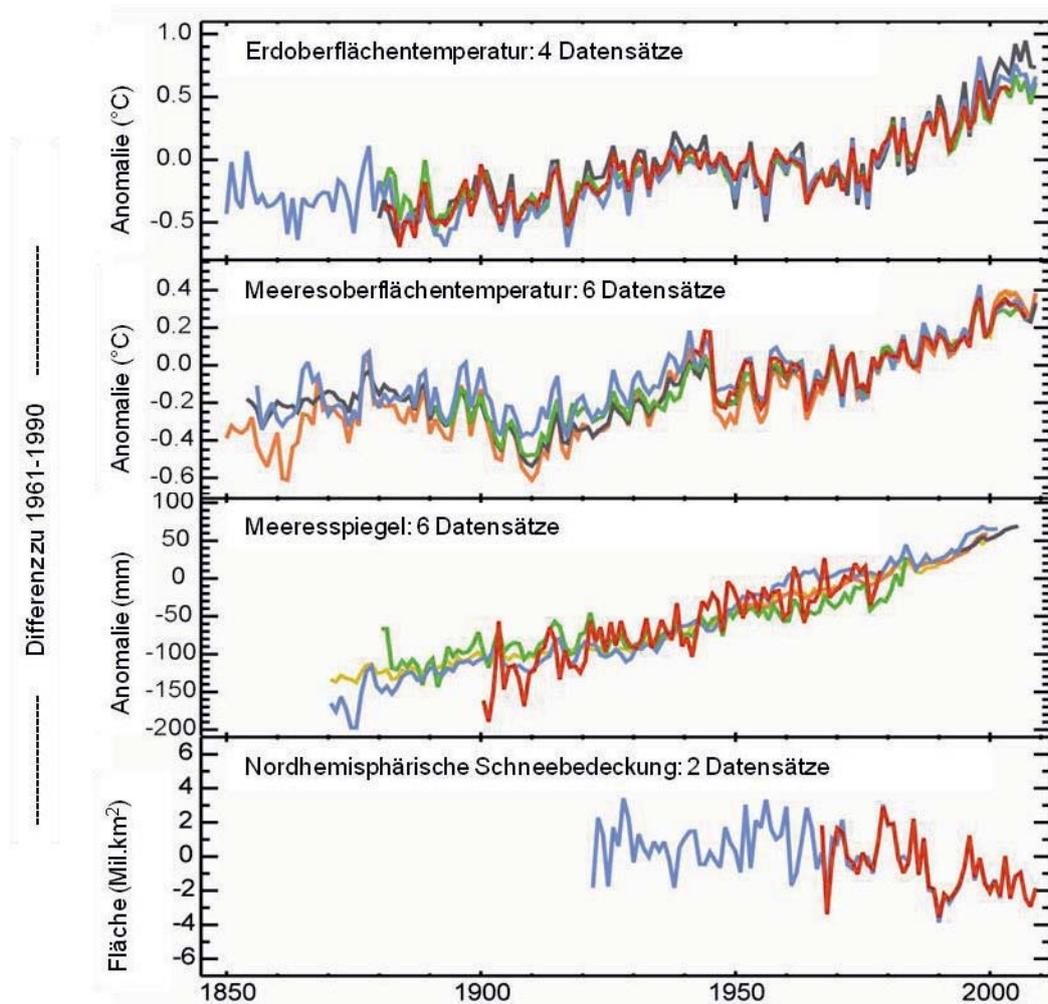


Abb. 2.1: Änderung der globalen Erdoberflächentemperatur seit 1850

Quelle: IPCC (2007A)



Die gestiegene Lufttemperatur ist aber nicht der einzige Hinweis auf die Klimaerwärmung. Weitere Änderungen, die im Einklang mit dem Anstieg der Erdoberflächentemperatur stattfinden, sind Anstieg der Meeresoberflächentemperatur, Anstieg des Meeresspiegels, Anstieg des atmosphärischen Wasserdampfgehalts, Abnahme von Eis- und Schneebedeckung (Abb. 2.2)



**Abb. 2.2: Beobachtete Änderungen von Klimaelementen**

Quelle: KENNEDY J. ET AL. (2010); MET OFFICE HADLEY CENTRE FOR CLIMATE CHANGE ([www.hadobs.org](http://www.hadobs.org))

Die Zunahme von extremen Wetterereignissen wie Dürren, Starkniederschläge, Hitzewellen und der Intensität von Wirbelstürmen, Änderungen im Salzgehalt der Ozeane und Windmuster sind weitere Beobachtungen der Klimaänderung. (IPCC, 2007A). Außerdem ist erkennbar, dass sich das Klima nicht gleichmäßig über den Globus ändert, sondern regionale Unterschiede vorhanden sind.

Der IPCC (IPCC, 2007A) zieht ein eindeutiges Fazit daraus: „Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, wie dies nun aufgrund der Beobachtungen des Anstiegs der mittleren globalen Luft- und Meerestemperatur, des ausgedehnten Abschmelzens von Schnee und Eis und des Anstiegs des mittleren globalen Meeresspiegels offensichtlich ist.“



Die überwiegende Mehrheit von Wissenschaftlern und Institutionen, die sich mit Klimaforschung beschäftigen, vertreten ebenfalls die Meinung, dass sich das Erdklima erwärmt. Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit der erneuten Analyse von Klimadaten und mit der Überprüfung dieser Daten auf Robustheit. Obwohl bei manchen Trends (z. B. Anstieg der Meeresoberflächentemperatur) im letzten Jahrzehnt keine eindeutige Fortsetzung zu beobachten ist (KENNEDY ET AL., 2010; SIMMONS ET AL., 2010), gibt es keine Hinweise darauf, dass die Aussage des IPCC widerlegt werden kann.

### 2.1.2 Ursachen der Klimaerwärmung

Die Erforschung der Erdrinde hat ergeben, dass es im Laufe der Erdgeschichte immer wieder zu großen Änderungen des Klimas kam. Dabei gab es sowohl Klimaänderungen, die über Millionen Jahre andauerten, als auch abrupte Klimawechsel, bei welchen die Temperatur innerhalb von Jahrzehnten um mehrere Celsiusgrade steigen konnte (IPCC, 2007A). Die Auslöser solcher Änderungen können unterschiedlich sein, allgemein aber gilt: Klimaänderungen sind die Folge von Änderungen in der Energiebilanz der Erde, wobei die Energiebilanz eine Differenz zwischen der gesamten einfallenden und abgestrahlten Energie ist. RAHMSTORF ET AL. (2007) unterscheiden drei Ursachen für die Störung der Energiebilanz:

- *Änderungen der einfallenden Sonnenstrahlung* (durch die Änderungen in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne oder in der Sonneneinstrahlung selbst);
- *Änderungen der planetarischen Albedo* und in der Menge von abgestrahlter Sonnenenergie (durch Landnutzungsänderungen, Abnahme / Zunahme der Fläche mit Eis- und Schneebedeckung usw.);
- *Änderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre* und in der Menge von abgehender Wärmestrahlung (vor allem durch Änderung der Konzentration von Treibhausgasen und der Menge von Aerosolen in der Atmosphäre).

Es ist weiterhin möglich, dass sich gleichzeitig mehrere Faktoren verändern oder die Veränderung eines Faktors weitere Veränderungen auslöst. Außerdem lassen sich bei der Veränderung einer oder mehreren Faktoren häufig Selbstverstärkungseffekte erkennen, die auch als positive Rückkopplungen bezeichnet werden. Ein Beispiel dafür ist die so genannte Eis-Albedo-Rückkopplung: Führt eine Abkühlung zur Zunahme der mit Eis- und Schneebedeckten Flächen, so vergrößert sich dadurch die Albedo, was die Abkühlung weiter verstärkt (BUBENZER & RADTKE, 2007).

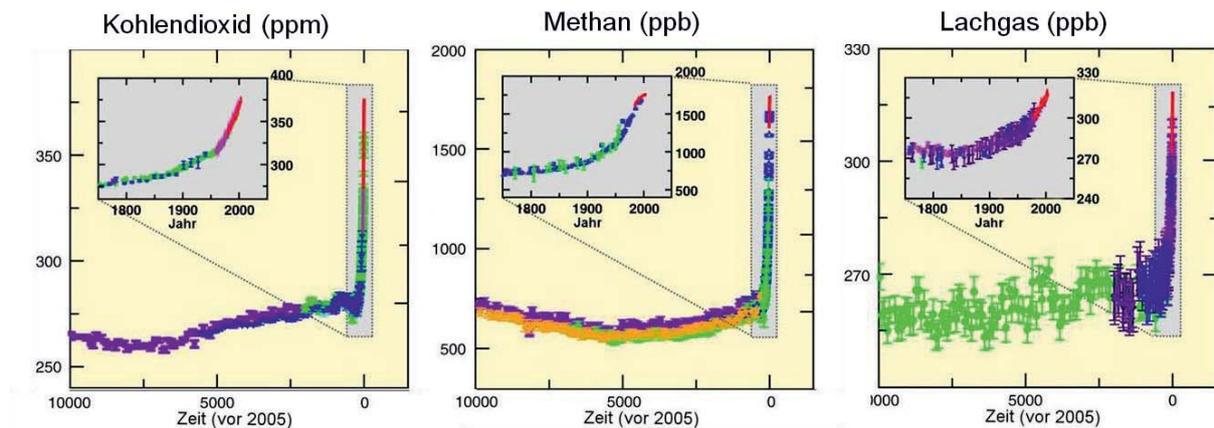
Den Auslöser für die derzeit beobachtete Erwärmung sehen die Klimaforscher in der Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre, und zwar im Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen (THG) und dem dadurch verstärkten Treibhausgaseneffekt (THG-Effekt). Der THG-Effekt beruht auf der besonderen Eigenschaft von THG: Sie lassen zwar die ankommende Sonnenstrahlung passieren, nicht aber die von der Erdoberfläche abgestrahlte langwellige Wärmestrahlung. Diese Wärmestrahlung wird durch die THG absorbiert und wiederum in alle Richtungen abgestrahlt. Dadurch kommt an die



Erdoberfläche zusätzlich zur Sonnenstrahlung noch ein Teil der von den THG abgestrahlten Wärmestrahlung. Diese erwärmende Wirkung von THG wird als THG-Effekt bezeichnet. Die wichtigsten THG in der Atmosphäre sind Wasserdampf ( $H_2O$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Methan ( $CH_4$ ), Lachgas ( $N_2O$ ) und Ozon ( $O_3$ ).

Die Rolle von THG für das Erdklima wurde bereits im 19. Jahrhundert durch die Arbeiten von Fourier, Tyndall und Arrhenius geklärt. Bereits damals wurde auch darauf eingegangen, dass die Erhöhung der Konzentration von THG in der Atmosphäre zur Verstärkung des THG-Effekts und zur Erhöhung der Erdoberflächentemperatur führt (WBGU, 2009).

Die Bekräftigung dieser Aussage sehen die Wissenschaftler in der Korrelation zwischen dem Temperaturanstieg und dem Anstieg der Konzentration von einigen THG. Zeitgleich mit dem beobachteten Anstieg der Temperatur seit der Industrialisierung um ca.  $0,8^\circ C$  sind die Anstiege der globalen atmosphärischen  $CO_2$ -Konzentration von etwa 280 ppm<sup>2</sup> auf 379 ppm, der  $CH_4$ -Konzentration von etwa 715 ppb auf 1774 ppb und der  $N_2O$ -Konzentration von etwa 270 ppb auf 319 ppb in 2005 zu beobachten. (Abb. 2.3)



**Abb. 2.3: Änderungen der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid, Methan und Lachgas**

Quelle: IPCC (2007A)

Einen weiteren Beleg, dass der THG-Effekt eine wichtige Wirkung auf das Klima hat, liefern die Klimamodelle. Nur wenn die Modelle den über die Jahre verstärkten THG-Effekt berücksichtigen, können sie die beobachteten Muster der Erwärmung sowie deren Änderungen im Verlauf der Zeit nachbilden. Ohne Wirkung des THG-Effekts kann der beobachtete Temperaturanstieg nicht erklärt werden (IPCC, 2007A).

<sup>2</sup>ppm (Teile pro Million) oder ppb (Teile pro Milliarde) ist das Verhältnis der Anzahl von THG-Molekülen zur Gesamtzahl der Moleküle in trockener Luft.



Ist die Konzentration von THG in der Atmosphäre ein entscheidender Faktor der beobachteten Klimaerwärmung, so ist auch die Bestimmung der Ursachen dieses Anstiegs bzw. die Identifizierung von Quellen der THG-Emissionen notwendig. Die in diesem Zusammenhang in Vordergrund gezogene Frage ist, ob die beobachtete Änderung der THG-Konzentrationen und die damit verbundene Klimaänderung ein natürlicher Prozess ist oder diese Änderungen vom Menschen verursacht sind.

Das Klimasystem ist komplex, und die Mechanismen von Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf sind nicht vollständig erforscht. Allerdings gibt es genügend Hinweise, dass die Menschen einen Beitrag zum Anstieg der Konzentrationen von THG ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$ ) geleistet haben<sup>4</sup>.

Die Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre seit der vorindustriellen Zeit ist vor allem auf den Verbrauch fossiler Rohstoffe, Landnutzungsänderung und Biomasseverbrennung zurückzuführen. Der Verbrauch fossiler Rohstoffe ist die größte Quelle der  $\text{CO}_2$ -Emissionen, und die Zunahme von  $\text{CO}_2$  dieses Ursprungs lässt sich durch Analyse der Isotopenzusammensetzung des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre nachweisen (IPCC, 2007A). Die Mengen der  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus dem Verbrauch fossiler Rohstoffe lassen sich auf Basis der Mengen von verbrauchten Energieträgern auch für die Vergangenheit gut abschätzen. Die zweitgrößte Quelle der  $\text{CO}_2$ -Emissionen ist die Landnutzungsänderung, die in erster Linie mit der Waldabholzung und der Erweiterung der landwirtschaftlich genutzten Flächen verbunden ist. Die Abschätzung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen sowohl aus der Landnutzungsänderung als auch aus der Biomasseverbrennung ist mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Die Quellen der  $\text{CH}_4$ -Emissionen haben sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprung. Die Quellen der  $\text{CH}_4$ -Emissionen sind bekannt, die Stärke und Trends einzelner Quellen aber nicht. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass der beobachtete Anstieg der  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen durch menschliche Aktivitäten verursacht ist. (IPCC, 2007A) Die wichtigsten anthropogenen Quellen der  $\text{CH}_4$ -Emissionen sind die Landwirtschaft (Viehhaltung, Reisanbau usw.) und der Verbrauch fossiler Rohstoffe.

Mehr als ein Drittel der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen sind durch die Menschen verursacht. Die Landwirtschaft ist Hauptquelle dieser Emissionen, die vor allem auf die Düngung landwirtschaftlicher Flächen zurückzuführen sind.

Der IPCC befürwortet in seinem Bericht, dass der durch die Menschen verstärkte THG-Effekt eine Hauptursache für die beobachtete Klimaerwärmung ist: „Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich durch den beobachteten Anstieg der anthropogenen THG-Konzentrationen verursacht“ (IPCC, 2007A).

---

<sup>4</sup> Wasserdampf ist das wichtigste THG, es ist aber im Gegenteil zu  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  kein langlebiges THG und seine Konzentration kann durch die Menschen nicht direkt verändert werden. (RAHMSTORF ET AL., 2007)



### 2.1.3 Projizierte Änderungen des Klimas in der Zukunft und deren Folgen

Für die Projektionen zukünftiger Änderungen des Klimas kommen Klimamodelle zum Einsatz. Wie bereits erwähnt, weisen Klimamodelle darauf hin, dass der Anstieg von THG-Konzentrationen in der Atmosphäre der Hauptverursacher beobachteter Klimaänderung ist. Die Reaktion des Klimasystems auf Änderungen der THG-Konzentrationen wurde anhand von Daten aus der Vergangenheit geschätzt und dann für zukünftige Klimaprojektionen verwendet. Dadurch sind die Klimaprojektionen stark von den für die Zukunft geschätzten THG-Emissionen abhängig.

Die zukünftigen THG-Emissionen sind von der demografischen, sozioökonomischen und technologischen Entwicklungen abhängig. Die Abschätzungen dieser Entwicklungen sind bereits für die nächsten 50 bis 100 Jahre mit sehr hohen Unsicherheiten verbunden. Insofern können auch keine ernsthaften Prognosen über die zukünftigen THG-Emissionen gemacht werden. Als Alternative werden unterschiedliche plausible Annahmen über die zukünftigen Entwicklungen einzelner Faktoren gemacht und dann, aus den kohärenten und in sich konsistenten Reihen von Annahmen eine Palette von Emissionsszenarien abgeleitet. Emissionsszenarien sind plausible alternative Darstellungen der zukünftigen Entwicklungen der THG-Emissionen, wobei im Gegenteil zu Prognosen keine Angaben über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens jedes einzelnen Szenarios gemacht werden. Im Sonderbericht zu Emissionsszenarien (NAKICENOVIC ET AL., 2000) hat der IPCC eine Reihe von Emissionsszenarien – sogenannte SRES<sup>5</sup>-Szenarien – entwickelt, die weitestgehend als Grundlage für die Analyse zukünftiger Klimaänderungen verwendet wurden.

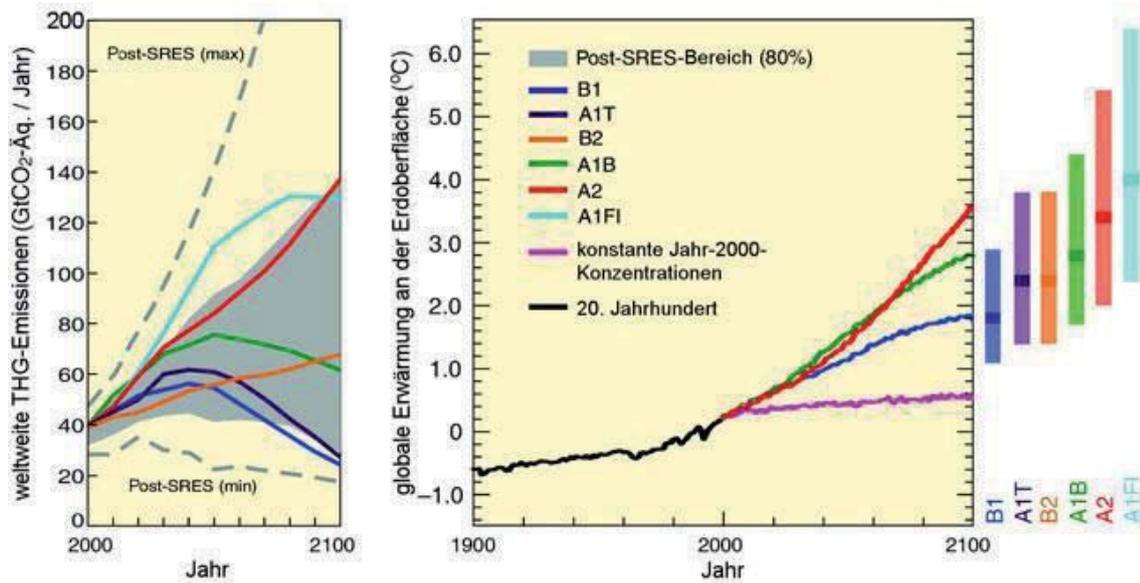
Auch im Vierten IPCC-Bericht wurden die Klimaprojektionen von den SRES-Szenarien abgeleitet. Um die Ergebnisse anschaulich zu machen, wurden für die Zusammenfassung für politischer Entscheidungsträger aus den unterschiedlichen Szenarien-Gruppen sechs illustrative SRES-Musterszenarien (A1B, A1F1, A1T, A2, B1 und B2<sup>6</sup>) ausgewählt, die sowohl niedrige als auch höhere SRES-Emissionsszenarien abdecken.

In Abb. 2.4 sind projizierte THG-Emissionen und entsprechende projizierte Änderungen der Erdoberflächentemperatur bis Ende des 21. Jahrhunderts für die SRES-Musterszenarien dargestellt. Den Modellrechnungen zufolge liegt beispielweise die beste Schätzung für die mittlere globale Erwärmung der Erdoberfläche für das niedrige Emissionsszenario (B1) bei 1,8°C und für das hohe Emissionsszenario (A1F1) bei 4,0°C (IPCC, 2007A).

---

<sup>5</sup> SRES steht für **S**pecial **R**eport on **E**missions **S**cenarios

<sup>6</sup> Beschreibung einzelner Szenarien findet man im Sonderbericht zu Emissionsszenarien (NAKICENOVIC ET AL., 2000)



**Abb. 2.4:** Projizierte THG-Emissionen und Multimodell-Mittel, geschätzte Bandbreite für die Erwärmung an der Erdoberfläche nach ausgewählten SRES-Szenarien

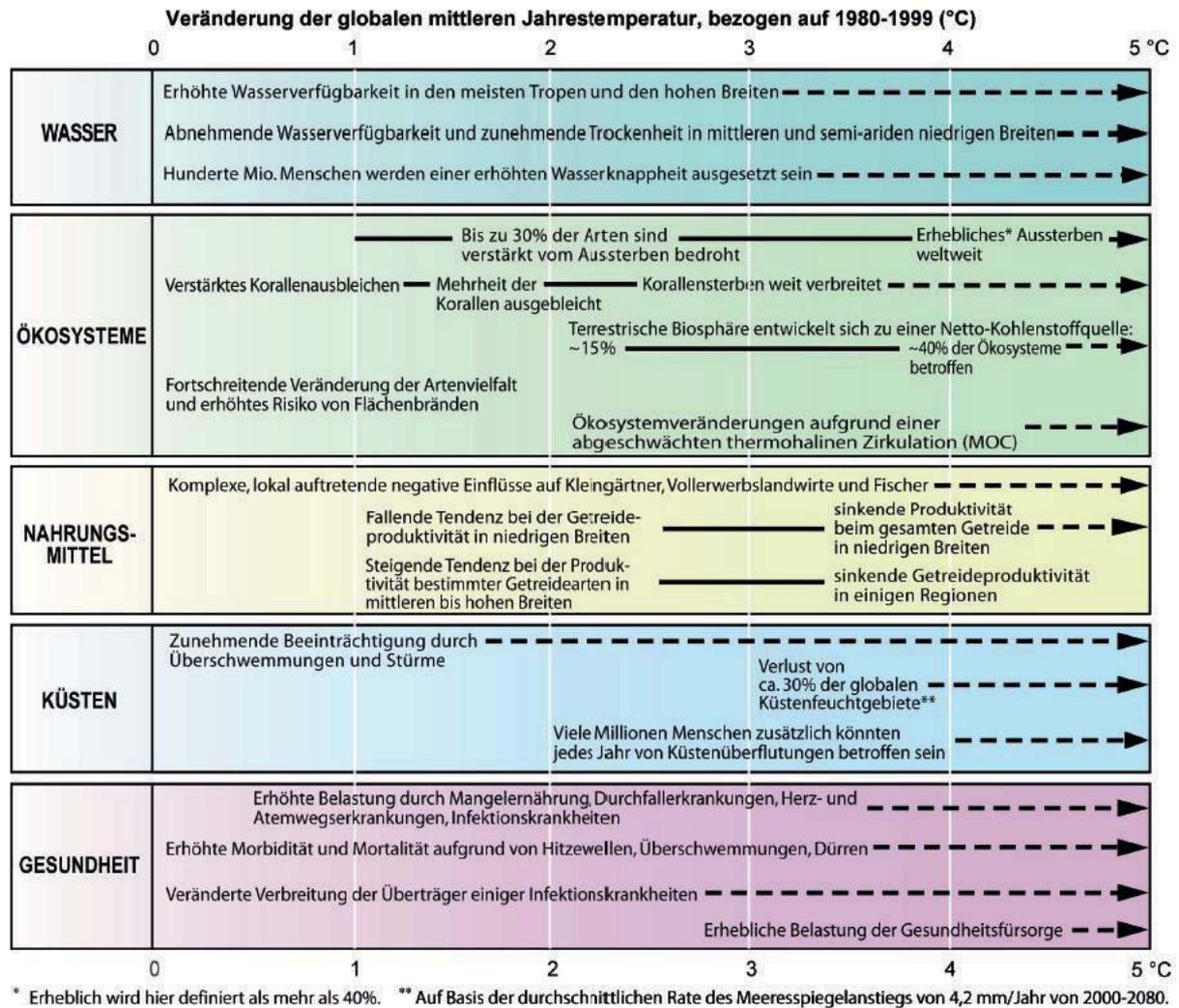
Quelle: IPCC (2007A)

Zusätzlich zum anhaltenden Anstieg der Erdoberflächentemperatur veranschaulichen die Modellsimulationen, dass auch mit weiteren Änderungen im Klimasystem zu rechnen ist. Für alle SRES-Szenarien wird eine Schrumpfung des Meereises in der Arktis und in der Antarktis projiziert. Es wird auch eine Abnahme der Schneebedeckung projiziert. Der Zufluss von Schmelzwasser in die Ozeane und die thermische Ausdehnung des Meeresswassers werden, modellbasierten Projektionen zufolge, zu einem Meeresspiegelanstieg bis 2100 um 0,18 – 0,59 m (im Vergleich zu 1980-1999) führen. Außerdem wird eine steigende atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration zu einer zunehmenden Versauerung der Ozeane führen. Es ist auch mit einer Veränderung der Wind- und Niederschlagsmuster und der Zunahme von Wetterextremen, wie Hitzewellen, Dürren, Starkregen und Überflutungen zu rechnen (IPCC, 2007A).

Obwohl die Erdoberflächentemperatur erst um 0,8°C angestiegen ist, sind zahlreiche Veränderungen in der natürlichen und menschlichen Umwelt zu beobachten. In hydrologischen Systemen sind dies beispielweise erhöhter Abfluss und früher eintretende Abflusshöchstmenngen bei vielen von Schnee und Gletschern gespeisten Flüssen und allgemeine Erwärmung von Seen und Flüssen in vielen Regionen. Die offensichtlichen Veränderungen in biologischen Systemen sind vor allem mit der Verschiebung der geografischen Verbreitungsgebiete von Pflanzen- und Tierarten polwärts und in höhere Lagen und mit dem früheren Eintreten von Frühlingseignissen verbunden. Weitere dokumentierte Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft in den höheren Breiten der nördlichen Hemisphäre sind frühere Frühjahrsaussaat von Getreide sowie negative Folgen von Bränden und Schädlingsbefall. Negative Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen, wie hitzebedingte Sterblichkeit in Europa, Übertragung von Infektionskrankheiten in einigen Gebieten und allergene Pollen in den hohen und mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre, sind ebenso auf die Klimaerwärmung zurückzuführen (IPCC, 2007B).



Mit weiterem Temperaturanstieg werden viele Auswirkungen stärkeres Ausmaß haben und länger andauern oder häufiger auftreten. Es werden aber auch weitere Auswirkungen dazu kommen. In Abb. 2.5 sind illustrative Beispiele für projizierte globale Auswirkungen in Abhängigkeit vom Temperaturanstieg auf hydrologisches System, Ökosystem, Nahrungsmittelproduktion, Küstengebiete und auf die Gesundheit dargestellt.



**Abb. 2.5: Projizierte THG-Emissionen und Multimodell-Mittel, geschätzte Bandbreite für die Erwärmung an der Erdoberfläche nach ausgewählten SRES-Szenarien**

Quelle: IPCC (2007B)

Die Auswirkungen der Klimaänderungen werden regional unterschiedlich sein. Beim globalen Temperaturanstieg von 1-3°C (gegenüber 1990) werden an manchen Orten und in manchen Sektoren positive und an anderen Orten und in anderen Sektoren negative Auswirkungen auftreten. Insgesamt ist projiziert, dass die Auswirkungen - global aggregiert und auf die Gegenwart diskontiert - Nettokosten verursachen werden, die sich mit weiterem Temperaturanstieg im Verlauf der Zeit immer weiter erhöhen werden (IPCC, 2007B).