

# Integrierte Bewertung der Instrumente und der fiskalischen und marktbasieren Anreize internationaler Klimapolitik und ihrer Auswirkungen (IACCP)

*Markus Zimmer, Rahel Aichele, Anna Sophia Ciesielski, Julian Dieler,  
Ana Maria Montoya Gómez und Tilmann Rave*



# Integrierte Bewertung der Instrumente und der fiskalischen und marktbasieren Anreize internationaler Klimapolitik und ihrer Auswirkungen (IACCP)

Studie gefördert vom



im Rahmen von



## **Autoren**

*Dr. Markus Zimmer (ifo Institut)*

*Dr. Rahel Aichele (ifo Institut)*

*Dipl. Vw. Anna Sophia Ciesielski (ifo Institut)*

*Dr. Julian Dieler (ifo Institut)*

*Ana Maria Montoya Gómez, MSc in Economics (ifo Institut)*

*Dr. Tilmann Rave (ifo Institut)*

Mai 2017

**ifo** INSTITUT

Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung  
an der Universität München e.V.

ifo Zentrum für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen

**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.

ISBN: 978-3-95942-028-0

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlags ist es auch nicht gestattet,  
dieses Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege  
(Fotokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen.

© ifo Institut, München 2017

Druck: ifo Institut, München

ifo Institut im Internet:  
<http://www.cesifo-group.de>

# Vorwort

Die vorliegende Studie wurde in einer Kooperation des ifo Zentrums für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen und des ifo Zentrums für Außenwirtschaft erstellt und im Dezember 2015 abgeschlossen. Auftraggeber war das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Die Erarbeitung erfolgte im Projekt „Integrierte Bewertung der Instrumente und der fiskalischen und marktbasierenden Anreize internationaler Klimapolitik und ihrer Auswirkungen (IACCP)“ als Teil des Förderschwerpunkts „Ökonomie des Klimawandels“ innerhalb des Rahmenprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA)“. Gegenstand der Studie sind die Abschätzung der Effekte unilateraler Klimapolitik-Maßnahmen sowie deren Wirksamkeit. In methodischer Hinsicht vereint die zugrunde gelegte Methodik ökonomische Modellierung, Daten und ökonometrische Analysen in einem konsistenten Ansatz. In der bestehenden Literatur geschieht dies vornehmlich durch die Nutzung von „Computable General Equilibrium“ (CGE) Modellen oder der darauf basierenden Integrated Assessment Modellen. Die Auswahl der zur Kalibrierung der Modelle benötigten Daten erfolgt jedoch häufig ad hoc und auf der Grundlage unterschiedlicher Studien, die weder untereinander noch mit der theoretischen Modellierung konsistent sind. Der konsistente und integrierte Ansatz des Projekts baut hingegen auf Forschungsergebnissen auf welche die Struktur der Schätzgleichungen aus der theoretischen Modellierung herleiten und die geschätzten mikro-fundierten Zusammenhänge in entsprechenden CGE-Modellen zur Analyse klimapolitischer Rahmenbedingungen berücksichtigen. Zu den Ergebnissen des Projekts zählen der Aufbau geeigneter Datenbanken zur Analyse internationaler Klimapolitik, die Bewertung der Instrumente internationaler Klimapolitik, die Entwicklung von Indizes zum internationalen Vergleich klimapolitischer Maßnahmen sowie die Prognose der Wohlfahrtswirkungen klimapolitischer Ziele mit besonderem Fokus auf den langfristigen Folgewirkungen.



# Inhalt

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | Einleitung.....  | 1  |
| 1.1.   | Aufgabenstellung .....   | 1  |
| 1.2.   | Wissenschaftlicher und technischer Stand .....   | 2  |
| 1.3.   | Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....   | 3  |
| 2.     | Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen.....                        | 4  |
| 2.1.   | Effektivität von Benzin- und Dieselsteuern in Europa .....   | 6  |
| 2.1.1. | <i>Daten</i> .....   | 7  |
| 2.1.2. | <i>Methode</i> .....   | 10 |
| 2.1.3. | <i>Ergebnisse</i> .....  | 11 |
| 2.1.4. | <i>Schlussfolgerungen</i> .....  | 12 |
| 2.1.5. | <i>Literatur</i> .....   | 13 |
| 2.2.   | Klimapolitikindex zur Messung der Stringenz der OECD Länder in ihrer Stringenz in der Klimapolitik ..... | 14 |
| 2.2.1. | <i>Daten</i> .....   | 14 |
| 2.2.2. | <i>Methoden</i> .....  | 16 |
| 2.2.3. | <i>Ergebnisse</i> .....  | 19 |
| 2.2.4. | <i>Schlussfolgerungen</i> .....  | 21 |
| 2.2.5. | <i>Literatur</i> .....   | 21 |
| 2.3.   | Innovationsindikatoren zum globalen Klimaschutz – FuE-Ausgaben und Patente .....                         | 22 |
| 2.3.1. | <i>Ausgaben für Forschung, Entwicklung und Demonstration</i> .....                                       | 24 |
| 2.3.2. | <i>Patente</i> .....   | 31 |
| 2.3.3. | <i>Schlussfolgerungen</i> .....  | 39 |
| 2.3.4. | <i>Literatur</i> .....   | 40 |
| 2.4.   | CO <sub>2</sub> Emissions-Szenarien in Europa basierend auf einem endogenen Wachstumsmodell.....         | 41 |
| 2.4.1. | <i>Daten</i> .....   | 42 |
| 2.4.2. | <i>Methoden</i> .....  | 43 |
| 2.4.3. | <i>Ergebnisse</i> .....  | 44 |
| 2.4.4. | <i>Schlussfolgerungen</i> .....  | 46 |
| 2.4.5. | <i>Literatur</i> .....   | 47 |

|  |    |
|--|----|
| 2.5. Die Kalibrierung und Integration eines endogenen Wachstumsmodells in DICE.....                              | 48 |
| 2.5.1. Daten.....  | 49 |
| 2.5.2. Methoden.....   | 50 |
| 2.5.3. Ergebnisse .....  | 51 |
| 2.5.4. Schlussfolgerungen.....   | 54 |
| 2.5.5. Literatur.....  | 55 |
| 2.6. Carbon-Leakage durch unilaterale Klimapolitiken.....  | 56 |
| 2.6.1. Methoden.....   | 56 |
| 2.6.2. Daten.....  | 57 |
| 2.6.3. Ergebnisse .....  | 59 |
| 2.6.4. Schlussfolgerungen.....   | 63 |
| 2.6.5. Literatur.....  | 64 |
| 2.7. Wirkung nationaler klimapolitischer Maßnahmen auf die freiwillige Emissionsvermeidung von Unternehmen ..... | 65 |
| 2.7.1. Daten.....  | 66 |
| 2.7.2. Methode .....   | 67 |
| 2.7.3. Ergebnisse .....  | 68 |
| 2.7.4. Schlussfolgerungen.....   | 69 |
| 2.7.5. Literatur.....  | 69 |
| 3. Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen .....  | 70 |
| 4. Erfolgte und geplante Konferenzbeiträge und Veröffentlichungen.....   | 71 |
| 5. Bearbeiter der Studie .....   | 73 |

# 1. Einleitung

## 1.1. Aufgabenstellung

Die Abschätzung der Effekte von (unilateralen) Klimapolitik-Maßnahmen sowie deren Wirksamkeit geschieht in der bestehenden Literatur vornehmlich durch „Computable General Equilibrium“ (CGE) Modelle oder durch darauf basierende Integrated Assessment Modelle. Diese Modelle sind vorwiegend von der ökonomischen Theorie geprägt, nutzen aber auch in hohem Maße die Erkenntnisse der Klimaforschung. Die Auswahl der zur Kalibrierung der Modelle benötigten Daten erfolgt jedoch häufig ad hoc und auf der Grundlage unterschiedlicher Studien, die weder untereinander noch mit der theoretischen Modellierung konsistent sind. Zudem sind die entscheidenden ökonomischen Zusammenhänge typischerweise nicht mikrofundiert und die Modelle werden in reduzierter Form wiedergegeben. Dies trifft insbesondere auf die Modellierung des internationalen Wettbewerbs und die durch eine einseitige Klimapolitik verursachten Wettbewerbsverzerrungen zu. Gleiches gilt auch für die Modellierung der durch eine solche Politik entstehenden Rückkopplungseffekte auf das Verhalten der Ressourcenanbieter. Empirische Schätzungen bestehender Studien decken weder den für die Kalibrierung eines CGE-Modell benötigten Informationsbedarf ab, noch wurden diese Schätzungen entsprechend der Restriktionen theoretischer Modelle durchgeführt. Folglich müssen die Ergebnisse der auf diesen Schätzungen basierenden CGE Simulationen angezweifelt werden.

In anderen Forschungsbereichen der angewandten Ökonomie, insbesondere im Bereich der internationalen Handelstheorie, haben Wirtschaftsforscher in der jüngeren Zeit Methoden zur empirischen Schätzung geeigneter Modellparameter entwickelt, welche auch die strukturellen Zusammenhänge theoretischer Modelle berücksichtigen. Hierdurch wird gewährleistet, dass der theoretische Modellansatz auch mit dem empirischen Ansatz vereinbar ist. Es gehört zu den Zielsetzungen dieses Projektes, auf diesen Forschungsergebnissen aufzubauen und Strukturen für Schätzgleichungen aus der theoretischen Modellierung herzuleiten und die geschätzten mikrofundierten Zusammenhänge in entsprechenden CGE-Modell zur Analyse klimapolitischer Rahmenbedingungen zu nutzen, beziehungsweise diese für andere Modelle zur Verfügung zu stellen. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die internationale



Klimapolitik gelegt und diese einerseits in einer für die ökonomische Klimaforschung geeigneten Datenbank aufbereitet und andererseits in einem insbesondere auf die Bedürfnisse der Integrated Assessment Modelle aufbereitetem Klimapolitikindex zusammengefasst. Maßgeblich war dabei stets eine konsistente Abstimmung von Theorie, Empirie und Prognose.

### 1.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Eine zunehmende Anzahl von Studien hat in den letzten Jahren nachfrageseitige Klimaschutzmaßnahmen dokumentiert und bewertet. Von der Internationalen Energieagentur und der OECD wurden Datenbanken erstellt, die allerdings unvollständig sind: Sie spiegeln nicht die integrierte Bewertung der Angebots- und Nachfrageseite wider, auf deren Notwendigkeit erst in jüngster Zeit hingewiesen wurde. Derzeit wird das Forschungsfeld zur integrierten Analyse noch von theoretischen Arbeiten dominiert. Diese sind wichtig um Mechanismen und Kausalzusammenhänge herauszustellen; sie bedürfen aber einer empirischen Überprüfung und Quantifizierung, um für Politikgestaltung verwendet werden zu können.

Die Literatur zu Wohlfahrtseffekten von Klimawandel und Klimapolitik folgt zwei grundsätzlichen Ansätzen: Im ersten Ansatz werden optimale Klimapolitiken unter verschiedenen Modellparametrisierungen und alternativen Definitionen von „optimal“ bewertet (Nordhaus 1982; Nordhaus 2008; Tol 2002; Weitzman 2009). Diese Studien schätzen sowohl die Kosten von Klimapolitik als auch ihren Nutzen (d.h. die vermiedenen Auswirkungen des Klimawandels). Klimapolitik wird ausnahmslos kosteneffektiv umgesetzt. Optimale Klimapolitik wird typischerweise mit geplanten oder bestehenden Klimapolitikmaßnahmen verglichen. Die drei bekanntesten Modelle in diesem Forschungsfeld sind: DICE (*Dynamic Integrated Climate-Economy model*, Nordhaus 1992; Nordhaus 2007; Nordhaus and Yang 1996), FUND (*Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*, Anthoff et al. 2009; Anthoff and Tol 2010; Tol 1997; Tol 1999a, 1999b, 1999c; Tol 2003) und PAGE (*Policy Analysis of the Greenhouse Effect Model*, Hope et al. 1993; Hope 2006; Hope 2008; Plambeck et al. 1997). FUND ist das detaillierteste unter diesen Modellen.

Der zweite Ansatz, der in der Literatur verfolgt wird, geht von einem festgelegten Ziel aus (üblicherweise für Treibhausgasemissionen oder -konzentrationen). Die kostengünstigste Strategie zur Erreichung dieses Ziels wird mit alternativen Strategien ver-

glichen, typischerweise ausgerichtet auf die Fragen, wann, wo und welche Emissionen reduziert werden müssen (Barker et al. 2007; Clarke et al. 2009; Edenhofer et al. 2006; Hourcade et al. 1996; Hourcade et al. 2001; Koehler et al. 2006; Weyant 1993; Weyant et al. 2006). Weitere Themen sind die Effekte von sektorspezifischen Klimapolitikmaßnahmen (Pizer et al. 2006) sowie die Wechselwirkungen zwischen Klimapolitik und bestehenden Verzerrungen in der Wirtschaft (Babiker et al. 2003; Boehringer et al. 2008; Parry et al. 1999; Parry and Williams III 1999). Während diese Literatur die Wohlfahrtsminderung durch suboptimale Umsetzung von Klimapolitik identifiziert, ignoriert sie den Wohlfahrtsverlust durch eine suboptimale Wahl des Ziels.

### **1.3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Für die Durchführung des Projekts sollten insbesondere im Bereich der Integrated Assessment Modellierung Kapazitäten in Deutschland aufgebaut werden, die über den Stand zu Projektbeginn hinausgingen. Dafür wurde zusätzlich zu DICE-basierten Analysen eine projektspezifische Implementierung von FUND erarbeitet, an die handelspezifischen Fragestellung in einem auf GAMS (*General Algebraic Modeling System*) und GTAP (*Global Trade Analysis Project*) basierenden Model angebunden wurden. Hierfür konnten wir im Projekt auf die enge Zusammenarbeit mit Prof. Richard Tol und Prof. David Anthoff in Bezug auf FUND sowie Prof. Thomas Rutherford und Dr. Geoffrey Blanford betreffend GTAP und GAMS zurückgreifen. Letztere brachten insbesondere auch ihre Erfahrungen aus dem MERGE Modell (*Model for Evaluating Regional and Global Effects*) in die Modellierung im Projekt mit ein. Diese Zusammenarbeit war nicht nur beratend, sondern führte auch über gegenseitige Gastaufenthalte zu nachhaltigen Forschungszusammenarbeiten, welche sich in gemeinsamen Forschungspapieren und Forschungsprojekten, über das IACCP Projekt hinaus, ausdrücken. So ist in der Folge beispielsweise eine Vergleichsstudie der geläufigen Integrated Assessment Modelle oder auch ein eigenes Strommarktmodell am ifo entstanden. Des Weiteren konnte vielfach von den Aktivitäten des CESifo Netzwerks und dem Gästeprogramm des ifo Instituts profitiert werden. Als Beispiele seien nur Carol McAusland (University of British Columbia) und Jean-Marie Grether und Nicole Mathys (beide Universität Neuchatel) genannt. Beide haben im Jahr 2014 das ifo Zentrum für Außenwirtschaft mehrtägig besucht und Seminarvorträge gehalten. Die Mitarbeiter des Projekts konnten von der Expertise dieser Gastforscher im Bereich

„Außenhandel und Umwelt“ profitieren. Carol McAusland ist Spezialistin im Bereich Carbon Footprint Besteuerung und war so eine sachverständige Ansprechpartnerin für die politischen Empfehlungen im Teilprojekt Carbon Leakage. Diskussionen mit Jean-Marie Grether und Nicole Mathys waren insbesondere im Bereich Zusammenhang von Umweltpolitik und Auswirkungen auf Produktionsverlagerung und Handel wertvoll für das Projekt. Von diesen Zusammenarbeiten erwartet das ifo Institut die Entwicklung eines konsistenten integrierten Ansatzes zur Verbesserung der Klimapolitikberatung.

## 2. Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen

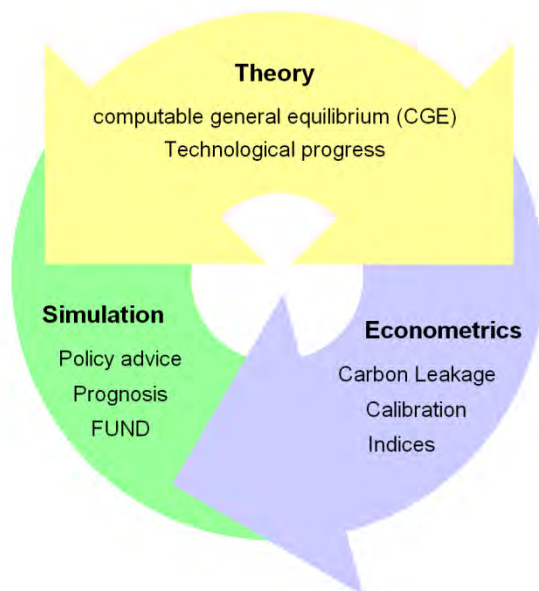
Entscheidend für den Erfolg des Projekts ist die Zusammenstellung vergleichbarer Daten über Steuern, Subventionen und weitere Politikmaßnahmen zur Regulierung der Energieproduktion und Energienutzung in den einzelnen Ländern. Durch die unzureichende Aufbereitung geeigneter Daten wurden die Fortschritte in der empirischen Forschung auf diesem Gebiet bisher erheblich behindert. Ein zweiter wichtiger Schritt ist die Entwicklung geeigneter Erweiterungen des FUND Modells und des DICE Modells, so dass eine theoretisch fundierte strukturelle Schätzung der verhaltensökonomischen Zusammenhänge ermöglicht wird. Im letzten Schritt werden, mit Hilfe des erweiterten Modellansatzes, Erkenntnisse über die Auswirkungen und die Effizienz existierender unilateraler Klimapolitikmaßnahmen gewonnen und ausgewertet. Letztendlich können die Ergebnisse zur Bewertung bestehender Politikinstrumente genutzt werden oder neue Politikmaßnahmen vorgeschlagen werden.

Als Grundlage für die Analysen wurde eine umfassende Datenbank über die CO<sub>2</sub>-Emissionen und Klimapolitikmaßnahmen aufgebaut, welche danach in Form von Indizes und Indikatoren aufbereitet wurden und eine Bewertung und den Vergleich der Strategien der Länder sowie der Instrumente erlauben.

Aus den genannten Projektzielen wurden die Projektergebnisse erarbeitet, welche größtenteils bereits in Form von Publikationen verfügbar sind. Im Folgenden werden die Hauptergebnisse kurz hinsichtlich der verwendeten Daten, der Methode und ihrer Politikimplikationen dargestellt. Im ersten Kapitel wird die Effektivität von Benzin- und Dieselsteuern untersucht. Ein weiterer Bestandteil des Projekts ist die Be-

wertung von Klimapolitikmaßnahmen im Rahmen von Indizes, der im zweiten Kapitel betrachtet wird. Im dritten Kapitel werden Innovationsindikatoren zum globalen Klimaschutz erstellt. Dabei werden insbesondere die FuE-Ausgaben und Patente im Bereich des Klimaschutzes in ihrer zeitlichen Entwicklung und im Ländervergleich betrachtet. Die Kapitel 0 und 5 greifen die Innovationsthematik auf und integrieren endogenes Wachstum in FUND und DICE. Das sechste Kapitel beschäftigt sich mit einer Studie zum Carbon-Leakage unter Anwendung unilateraler Klimapolitikmaßnahmen. Im siebten Kapitel – dem letzten der sieben Ergebnisteile – wird auf die Wirkung nationaler klimapolitischer Maßnahmen auf die freiwillige Emissionsvermeidung von Unternehmen eingegangen.

Abbildung 1: Forschungsstrategie zur Erreichung der Hauptziele des Projekts



## 2.1. Effektivität von Benzin- und Dieselsteuern in Europa

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, verursacht durch die Benutzung von Kraftfahrzeugen, machen insgesamt 21% der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Europäischen Union (EU) aus. Damit die EU ihre Klimaziele erreichen kann, müssen also auch die Treibhausgasemissionen von PKWs und LKWs reduziert werden. Je nach Szenario rechnet die EU mit Reduktionen zwischen 54% und 67% im Transport- und Logistiksektor (inkl. Luftverkehr) bis 2050. Die EU setzt hierbei auf verbindliche Obergrenzen für die Fahrzeugindustrie hinsichtlich des Flottendurchschnittsverbrauchs. Die Nationalstaaten hingegen setzen zusätzlich weiterhin auf die Verbrauchsbesteuerung von Kraftstoffen. Neben dem fiskalischen Zweck sollen diese Verbrauchssteuern auch einen Lenkungszweck erfüllen.

In dieser Untersuchung geht es um die Quantifizierung dieses Lenkungseffekts. Wir analysieren die Effektivität von Benzin- und Dieselsteuern in Europa hinsichtlich der Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasemissionen durch PKWs und LKWs anhand eines Datensatzes für 11 europäische Länder. In der Vergangenheit wurden solche Studien meist mit Daten aus den Vereinigten Staaten von Amerika durchgeführt. Der amerikanische und der europäische Treibstoffmarkt unterscheiden sich jedoch grundlegend durch die großen Unterschiede in den Steuerniveaus. In den USA belaufen sich die Verbrauchssteuern für Benzin auf ca. 0,08 € pro Liter, während sich der Durchschnitt in den 11 EU-Ländern unseres Datensatzes auf 0,52 € beläuft<sup>1</sup>. Aufgrund solcher enormen Unterschiede in den Niveaus ist nicht klar, ob Konsumenten in Europa auf gleiche Weise auf eine marginale Steueränderung reagieren, wie in den USA und somit lassen sich die Ergebnisse für den amerikanischen Markt nur bedingt auf Europa übertragen. Daher ist eine Studie mit europäischen Daten notwendig, um Aussagen über die Wirksamkeit von Benzin- und Dieselsteuern in Europa treffen zu können.

Neben dem starken Fokus der bisherigen Literatur auf den amerikanischen Markt wurde bis vor kurzem nicht zwischen Preis- und Steuereffekten unterschieden. Hughes et al. (2008) untersuchen zum Beispiel die Veränderungen der Preiselastizitäten der Benzinnachfrage über die Zeit und zwischen den Staaten der USA. Erst in neueren Papieren wird versucht die Preis- und die Steuerelastizität der Nachfrage zu

---

<sup>1</sup> Beide Werte beinhalten nicht die zusätzlich anfallende Mehrwertsteuer.

trennen. Wir halten dies für einen entscheidenden Fortschritt in der Bewertung der Effektivität von Benzin- und Dieselsteuern, da es nicht klar ist, ob die Konsumenten auf eine Nettopreisänderung gleich reagieren wie auf eine Steueränderung. Daher differenzieren wir ebenfalls zwischen Steuer- und Preiseffekten.

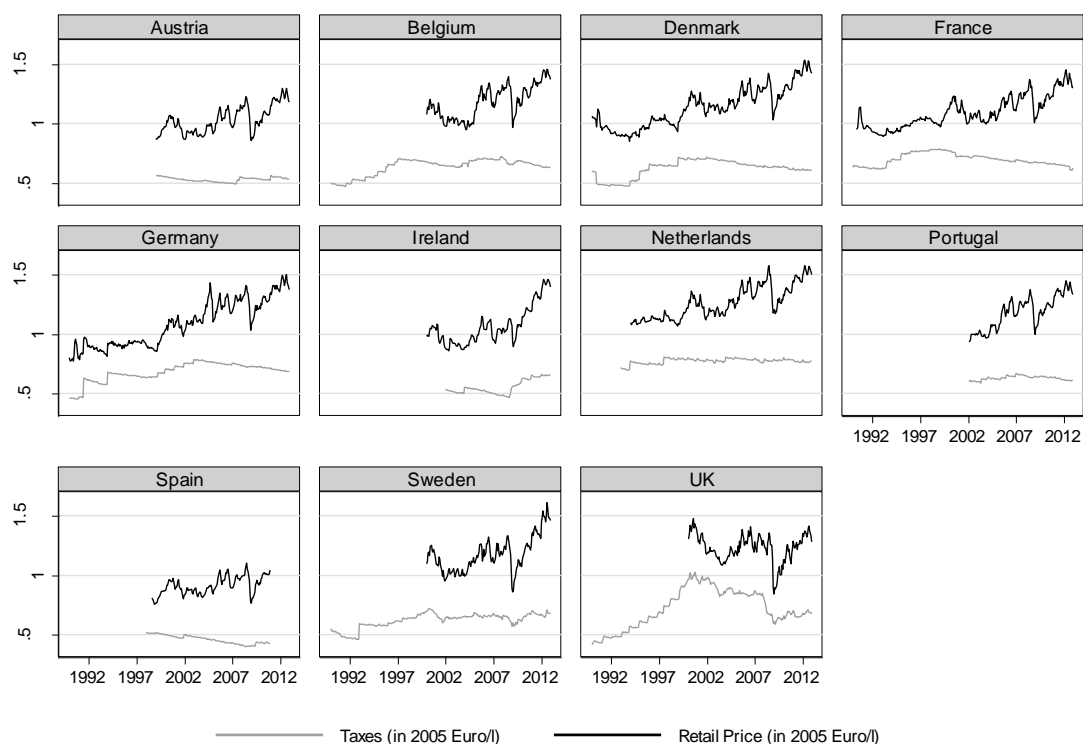
In einer aktuellen Studie von Davis und Kilian (2011) finden die Autoren auf Grundlage amerikanischer Daten einen Unterschied zwischen der Verbrauchsreduktion von Konsumenten aufgrund einer Preisänderung und einer Verbrauchsreduktion aufgrund einer Steueränderung. Letztere fällt mit 1,4% bei einer Erhöhung der Steuer um 7 Cent pro Gallone (10 Dollar-Cent) mehr als doppelt so hoch aus wie eine Reaktion auf eine Preisänderung. Bei einer ähnlichen Interpretation unserer Ergebnisse erhalten wir eine Reduktion des Benzinverbrauchs um 2,5%. Auch der Unterschied zwischen Preis- und Steuerelastizität fällt in unseren Daten deutlich stärker ins Gewicht. Der Effekt einer Preiserhöhung um den gleichen Betrag führt lediglich zu einer Verbrauchsreduktion von 0,4%.

Wir gehen in unserer Studie noch einen Schritt weiter und betrachten auch die Zeiträume vor und nach einer Steueränderung, um zu überprüfen, ob es sich bei dem gemessenen Steuereffekt nicht lediglich um kurzfristige Verschiebungen in der Nachfrage handelt. Genau dies ist nach unseren Ergebnissen der Fall, denn wir beobachten in dem Monat vor einer Steuererhöhung einen Anstieg des Benzin- und Dieselabsatzes. Ebenso steigt der Absatz im Folgemonat einer Steuererhöhung wieder an und nähert sich dem Niveau vor der Steuererhöhung. Diese umfassende Betrachtung führt zu einer Abschwächung des Gesamtlenkungseffekts der Benzin- und Dieselsteuern.

### **2.1.1. Daten**

Für unsere Studie haben wir einen Paneldatensatz für 11 Länder (Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Irland, Niederlande, Österreich, Portugal, Spanien, Schweden und Großbritannien) über einen Zeitraum von 23 Jahren (1990-2012) erstellt. Um die Effekte möglichst genau identifizieren zu können verwenden wir Monatsdaten. Bei unserem Datensatz handelt es sich um Makrodaten, das heißt wir verwenden auf Nationalstaatenniveau aggregierte Daten.

Abbildung 2: Steuern und Preise pro Liter in 2005 Euros



Die Schlüssel Variablen unseres Datensatzes sind der Verbrauch, bzw. der Absatz von Benzin (wir verwenden die aktuell gängigste Benzinsorte „Super“, also ein 95 Oktan Benzin) und Diesel, die jeweiligen Endverbraucherpreise und die Steuern, welche auf die beiden Kraftstoffe erhoben werden. Da die Preise nicht fix sind über einen Monat und über alle Tankstellen eines Landes, verwenden wir anhand des Absatzes gewichtete, gemittelte Daten. Die Steuern bestehen in allen Ländern aus Verbrauchs- und Mehrwertsteuer. In einzelnen Ländern unserer Stichprobe kommen zu den genannten Steuern noch weitere Abgaben hinzu, die wie Verbrauchssteuern erhoben werden. In Deutschland ist dies zum Beispiel die Abgabe für den Erdölbevorratungsverband. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Endverbraucherpreise und der Steuern für Benzin in den untersuchten Ländern.

Abbildung 3: Benzin- und Dieselabsatz

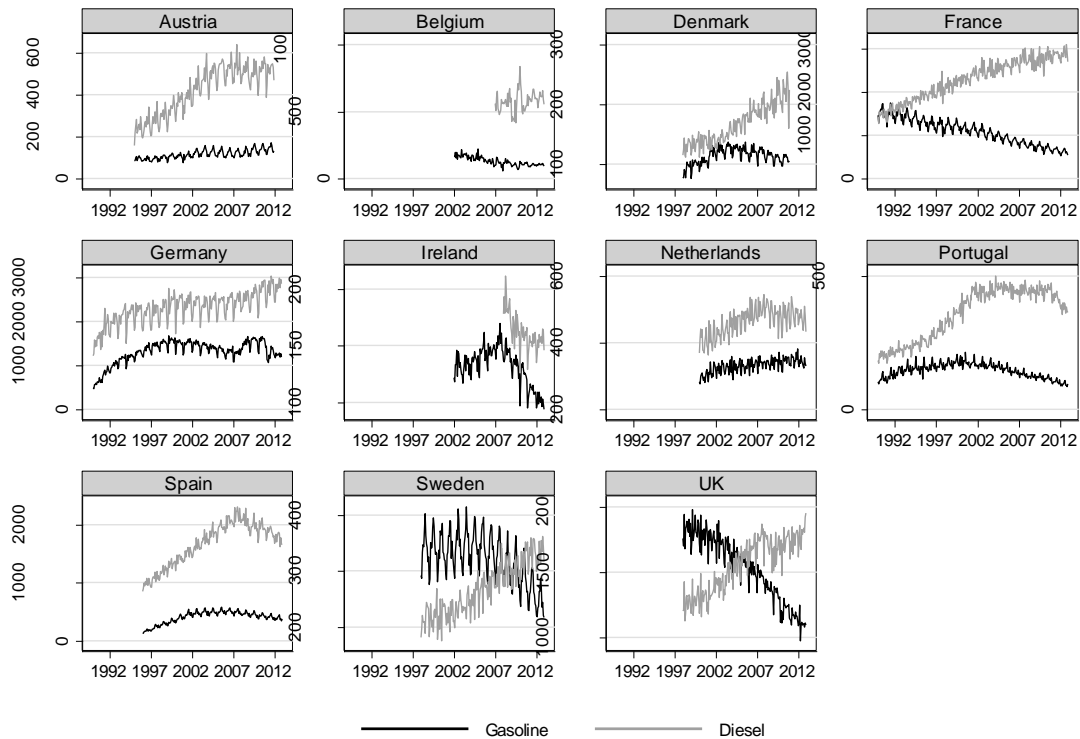


Abbildung 3 zeigt die Entwicklung des Benzin- und Dieselabsatzes in den verschiedenen Ländern. Auffällig ist die Zunahme des Dieselkonsums in den beobachteten Ländern über die Zeit<sup>2</sup>. Dies ist nicht zuletzt auf die zunehmende Verbreitung von turboaufgeladenen Dieselmotoren in PKWs ab Ende der 80er Jahre zurück zu führen. In Frankreich und Großbritannien ist der Substitutionseffekt zwischen Benzin und Diesel am stärksten ausgeprägt. In etwas abgeschwächter Form beobachten wir den Trend weg von Benzinmotoren, hin zu sparsameren Dieselmotoren auch in den übrigen Ländern. Ein weiteres datenprägendes Ereignis stellt die Finanzkrise, vor allem in den Ländern die besonders stark betroffen sind (Irland, Portugal und Spanien), dar.

Als Kontrollvariablen verwenden wir in unseren Schätzungen u.a. die Anzahl der Arbeitstage eines Monats, den Rohölpreis und den Dollarwechsellkurs. Diese stammen allesamt aus Datenbanken der OECD und der Weltbank, wohingegen der Konsum,

<sup>2</sup> In Irland ist der Konsum von Diesel auf monatlicher Basis leider erst nach der Finanzkrise 2008 erhältlich, sodass der Dieselkonsum dort zurückgegangen ist in dem beobachtbaren Zeitraum.



die Steuern und die Preise aus einer Vielzahl an Quellen stammen. Zu diesen Quellen zählen statistische Ämter, Ministerien aber auch Verbände der einzelnen Länder.

### 2.1.2. Methode

Hinsichtlich der analytischen Struktur orientieren wir uns an der Arbeit von Davis und Kilian (2011). Somit ist es uns möglich erste Ergebnisse für den europäischen Markt mit den Ergebnissen für die USA zu vergleichen. Davis und Kilian schätzen eine log-linearisierte Nachfragefunktion, bei der die Wachstumsrate des Konsums abhängig ist von einer Konstanten, dem Konsumentenpreis und zeit- und länderfixen Effekten. Wie oben bereits erwähnt kontrollieren wir zusätzlich für die Veränderung der Arbeitslosenrate und der Monat-zu-Monat-Veränderung der Anzahl der Arbeitstage. In einem weiteren Schritt schätzen wir die oben beschriebene Beziehung mit einer Unterscheidung des Konsumentenpreises in Nettopreis und Steuer. Damit tragen wir dem Gedanken Rechnung, dass die Steuer einen stärkeren Einfluss auf den Konsum hat als der Preis. Hierfür lassen sich zwei Gründe anführen. Zum einen die Volatilität der beiden Konsumentenpreisteile und zum anderen deren Vorhersehbarkeit. Für die Volatilität des Konsumentenpreises ist in den meisten Fällen der Nettopreis verantwortlich und in deutlich weniger Fällen die Steuer. Diese ist jedoch wiederum deutlich einfacher und genauer vorhersehbar, da Steueränderungen durch die mediale Aufmerksamkeit hinreichend in der Bevölkerung bekannt werden. Vor diesem Hintergrund erscheint es durchaus plausibel zu argumentieren, dass Konsumenten ihr Verhalten eher aufgrund einer nachhaltig wirkenden Steueränderung, deren Einführung im Vorhinein bekannt ist, anpassen, als aufgrund einer volatilen Änderung des Nettopreises, die am nächsten Tag bereits wieder in die entgegengesetzte Richtung ausfallen kann. Weiterhin nehmen wir die Steueränderung des vorigen Monats und des darauffolgenden Monats in unsere Schätzgleichung mit auf, um zu überprüfen, ob es sich bei dem gemessenen Steuereffekt in dem Monat der Steueränderung nicht lediglich um eine temporäre Verschiebung des Auftankens handelt.

Wie Davis und Kilian (2011) und auch Li, Linn und Muehlegger (2012) in ihren Studien zur Preiselastizität der Benzinnachfrage bereits erwähnt haben, ist es dringend notwendig die eventuelle Endogenität des Nettopreises zu untersuchen, da diese zu verzerrten Schätzergebnissen führen würde. In Schätzungen von Nachfragegleichungen kommt es üblicherweise durch gegenseitige Kausalität von Preisen und Nachfrage zu einem Endogenitätsproblem. Wenn also nicht nur der Preis einen Ein-

fluss auf die konsumierte Menge hat, sondern auch die konsumierte Menge einen Einfluss auf den Preis hat, würde die Preiselastizität durch eine Schätzung mit der Kleinste-Quadrate-Methode unterschätzt werden. Daher schätzen wir die oben beschriebene Gleichung erneut und instrumentieren dabei den Nettopreis mit dem Rohölpreis und dem Dollarwechsellkurs. Bei diesen beiden Instrumenten handelt es sich um valide und in der Literatur erprobte Werkzeuge, da sie für den Nettobenzin- und Nettodieselpreis relevant sind, das heißt sie sind maßgebliche erklärende Variablen der Nettopreise und erfüllen die Exogenitätsanforderung, die an Instrumente in zweistufigen Schätzverfahren gestellt wird. Es stellt sich jedoch heraus, dass die gegenseitige Kausalität von Preis und Nachfrage in unserem Datensatz keine allzu entscheidende Rolle spielt, sodass sich die Ergebnisse der Kleinste-Quadrate-Methode nicht wesentlich von den Ergebnissen der Instrumentalvariablenschätzung unterscheiden.

### 2.1.3. Ergebnisse

In unserer präferierten Spezifikation der Schätzgleichung erhalten wir für die Benzinnachfrage eine kurzfristige Nettopreiselastizität von  $-0,06$  und  $-0,07$  für die Dieselnachfrage. Das heißt eine einprozentige Nettopreiserhöhung führt zu einer Nachfragereduktion von  $0,06\%$  respektive  $0,07\%$ . Die Steuerelastizitäten liegen betragsmäßig deutlich darüber. Die Steuerelastizität der Benzinnachfrage beträgt  $-0,84$  und die Steuerelastizität der Dieselnachfrage  $-1,04$ . Auch diese drückt aus um wie viel Prozent der Konsum bei einer einprozentigen Steuererhöhung zurückgeht. Um diese Zahlen greifbarer und vergleichbar mit den Ergebnissen für die USA zu machen schauen wir uns exemplarisch eine Steuererhöhung von 7 Cents pro Gallone an. Dies entspricht einer Steuererhöhung von 1,9 Cents pro Liter. Davis und Kilian (2011) finden für eine solche Steuererhöhung eine Verbrauchsreduktion von  $1,4\%$  für die USA. Die oben aufgeführten Steuerelastizitäten, geschätzt aus unserem europäischen Panel, implizieren bei einer Steuererhöhung von 1,9 Cents pro Liter einen Nachfragerückgang von  $2,5\%$  in Bezug auf die Benzinnachfrage und  $4,5\%$  in Bezug auf die Dieselnachfrage.

Wie jedoch im Methodikteil bereits angesprochen wurde, beinhaltet dieser Nachfrageeffekt zwei Komponenten: Erstens die Verhaltensänderung der Konsumenten, hervorgerufen durch eine Steueränderung und zweitens, die betragsmäßig deutlich größere Komponente, die intertemporale Verschiebung des Kraftstoffkaufs. Dies

wird offensichtlich wenn man sich das Konsumverhalten in dem Vor- und dem Folgemonat einer Steueränderung anschaut. Bei der Benzinnachfrage steigt der Verbrauch in Folge einer Steuererhöhung von 1,9 Cent im kommenden Monat um 1,1% im Vormonat. Im Monat nach der Steuererhöhung steigt die Nachfrage ebenfalls und zwar um 0,8%.<sup>3</sup> Da sich die Basis, die abgesetzten Mengen, absolut in diesen drei Monaten ändert, kann man die Änderungsraten nicht einfach aufaddieren, um den Gesamteffekt zu erhalten, allerdings wird bereits klar, dass der auf den ersten Blick große Effekt im Steuermonat zumindest teilweise von einem Vorzieheffekt kompensiert wird. Bei aggregierter Betrachtung des Steuerzeitraums (Vormonat, Monat der Steueränderung und Folgemonat) ist der Steuereffekt nicht mehr statistisch signifikant verschieden von Null, das heißt, der Gesamteffekt ist nach Abzug des Vorzieheffekts sehr gering und empirisch nicht nachweisbar.

#### 2.1.4. Schlussfolgerungen

Studien zur Messung des Steuereffekts auf Basis von Monatsdaten überschätzen die Effektivität von Benzin- und Dieselsteuern, wenn sie nicht den Einfluss der Steuer auf den Verbrauch im Vor- und Folgemonat berücksichtigen. Ein Großteil des nachfrage-senkenden Effekts, der im Steuermonat gemessen wird ist darauf zurückzuführen, dass die Konsumenten kurz vor Ende des Vormonats noch einmal an die Tankstelle fahren, um aufzutanken. Daraufhin müssen sie im Monat der Steuererhöhung etwas weniger tanken und es kommt zu einem niedrigeren Benzin- und Dieselabsatz. Im Folgemonat hingegen kehren sie wieder zum alten Tankrhythmus zurück und demzufolge steigt der Kraftstoffabsatz wieder an. Für die kurze Frist finden wir dementsprechend keinen signifikanten Einfluss von Benzin- und Dieselsteuern hinsichtlich einer Verhaltensänderung der Auto- und LKW-Fahrer. Beim Dieselkonsum beobachten wir einen stärkeren Steuereffekt sowohl im Monat der Steueränderung als auch in dem Monat davor. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass kommerzielle Dieselskonsumenten, wie Speditionen bessere Möglichkeiten haben strategisch einzukaufen auf Grund von Lagermöglichkeiten.

Da der Nettopreis im Vergleich zur Steuer sehr volatil und nur begrenzt vorhersehbar ist, beobachten wir keine Vorzieheffekte hinsichtlich Preisänderungen. Die Volatilität und die begrenzte Vorhersehbarkeit des Preises führen auch dazu, dass die Prei-

---

<sup>3</sup> Bei Diesel beträgt der Anstieg im Vormonat 1,4% und im Folgemonat 1.6%.

selastizität geringer ausfällt als die Steuerelastizität im Monat der Steueränderung. Die Konsumenten haben in der kurzen Frist nur sehr begrenzte Möglichkeiten auf Preisänderungen zu reagieren.

Zur Quantifizierung langfristiger Steuerelastizitäten, die üblicherweise betragsmäßig größer sind als kurzfristige Steuerelastizitäten, bedarf es einer Analyse von Haushaltsdaten, um langfristige Verhaltensänderungen identifizieren zu können.

#### **2.1.5. Literatur**

Davis, L. W. und Kilian, L. (2011), "Estimating the effect of a gasoline tax on carbon emissions", *Journal of Applied Econometrics* 26(7), S. 1187-1214.

Li, Shanjun, Linn, J. und Muehlegger, E. (2012), „Gasoline Taxes and Consumer Behaviour“, NBER Working Paper 17891.

Hughes, J. E., Knittel, C. R. und Sperling, D. (2008), "Evidence of a Shift in the Short-Run Price Elasticity of Gasoline Demand", *The Energy Journal* 29(1), S. 113-134.

## 2.2. Klimapolitikindex zur Messung der Stringenz der OECD Länder in der Klimapolitik

Obwohl Klimaschutz eine globale Aufgabe ist, hat der bisher beschränkte Erfolg internationaler Klimaabkommen dazu geführt, dass ein großer Teil der politischen Anstrengungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen auf nationaler Ebene stattgefunden hat. Die Vielfältigkeit dieser Anstrengungen in Bezug auf Art und Ausgestaltung der einzelnen Politikinstrumente macht einen objektiven Vergleich der Stringenz verschiedener Länder untereinander und über die Zeit sehr schwierig. Um den Vergleich von klimapolitischen Anstrengungen zu erleichtern haben wir einen Klimapolitikindex erstellt, der eine Vielzahl an klimapolitischen Instrumenten zu einem Index zusammenfasst und somit eine schnelle Informationsquelle für Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit darstellt – den CPMI (Climate Policy Measure Index). Der CPMI ermöglicht den Vergleich der Stringenz der Klimapolitik in den OECD Ländern<sup>4</sup> über den Zeitraum von 1991-2012. Stringenz beinhaltet in diesem Zusammenhang 3 Faktoren. Erstens, das Niveau in dem das jeweilige Politikinstrument zum Einsatz kommt, z.B. die Höhe einer Steuer. Zweitens, die Verbreitung des Instruments, beim Beispiel der Steuer wäre dies also die Größe der Steuerbasis und drittens die Effektivität des jeweiligen Politikinstrumentes in der Reduzierung der Emissionsintensität der Produktion.

Der Hauptbeitrag des CPMI zu den bestehenden Indizes in diesem Bereich besteht in der ausschließlich datengestützten Fundierung. Sowohl die einzelnen beinhalteten Politikvariablen, als auch deren Gewichtung basieren ausschließlich auf quantitativen Methoden. Dies führt zu einem hohen Maß an Objektivität und Transparenz, was den CPMI sowohl für Entscheidungsträger als auch für Wissenschaftlicher, die den CPMI in ihren Analysen einsetzen möchten, besonders wertvoll macht.

### 2.2.1. Daten

Der CPMI beinhaltet alle OECD Länder bis auf Island, da Island einige Datenverfügbarkeitsprobleme aufweist. Damit deckt der CPMI fast 40%<sup>5</sup> der weltweiten CO<sub>2</sub>

---

<sup>4</sup> Der CPMI beinhaltet alle OECD bis auf Island, da es für Island aus Datenverfügbarkeitsgründen nicht möglich war einen Klimapolitikindex zu erstellen.

<sup>5</sup> Stand 2012.

Emissionen ab. Bislang umfasst er den Zeitraum von 1991 bis 2012. Der Anfangszeitpunkt wurde mit dem Jahr 1991 festgelegt, da vor diesem Zeitpunkt so gut wie kein Politikinstrument verabschiedet wurde vor dem Hintergrund damit den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren. Die *United Nations Framework Convention of Climate Change* (UNFCCC) wurde im Jahre 1992 gegründet und kann als Startpunkt nationaler und internationaler Klimabemühungen betrachtet werden.

Wie bereits erwähnt, konzentriert sich der CPMI ausschließlich auf quantitative Politikinstrumente, um ein Höchstmaß an Objektivität zu gewährleisten. Die Stringenz von Politikinstrumenten zur Information und Bildung der Öffentlichkeit oder Verordnungen lassen sich objektiv nicht metrisch vergleichen und werden daher nicht berücksichtigt. Andere Indizes, die solche Maßnahmen beinhalten weichen bei deren Messung dann meist auf Expertenmeinungen aus, was bei einem ländervergleichenden Index zu Verzerrungen der Ergebnisse führen kann. Daher beschränkt sich der CPMI auf die Politikategorien Energiesteuern, Subventionen für erneuerbare Energien und die Bepreisung von CO<sub>2</sub> Emissionen.

Die Steuern auf Energieprodukte stammen aus der *IEA Energy Taxes and Prices Statistics* Datenbank (IEA 2015a). Die Internationale Energie Agentur (IEA) stellt in dieser Datenbank sowohl Steuer- als auch Preisdaten für viele verschiedene Energieprodukte zur Verfügung. Insgesamt umfasst die *IEA Energy Taxes and Prices Statistics* Datenbank 14 verschiedene Produkte, wie zum Beispiel mehrere Arten von erdölbasierten Treibstoffen und verschiedene Arten von Kohle. Neben der Differenzierung der Steuern und Preise nach Produkten, werden sowohl Preise als auch Steuern nach Sektoren (Haushalte, Industrie, Energieerzeugung) unterschieden. Die Einheit der verwendeten Steuer- und Preisdaten ist nationale Währung pro Tonne Erdöl-äquivalent, damit ist eine Vergleichbarkeit der Steuern und Preise zwischen den verschiedenen Produkten sicher gestellt.

Leider gibt es keine Datenbank, die solch detaillierte Informationen zu Subventionen auf erneuerbare Energien für eine so große Anzahl an Ländern und einen solchen Zeitraum zur Verfügung stellt. Schon für einzelne Länder ist es sehr schwer Zeitreihen für, zum Beispiel Einspeisevergütungen, zu berechnen da diese sich nicht nur nach Technologien sondern zusätzlich auch nach Größe der jeweiligen Anlagen und weiteren anlagenspezifischer Charakteristika unterscheiden. Daher werden die Politikmaßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien im CPMI approximiert durch

den jährlichen Zubau an Erzeugungskapazitäten erneuerbarer Energiequellen. Um für die Größe des Landes zu kontrollieren werden die Kapazitäten normiert mit der Bevölkerungsgröße des jeweiligen Landes. Der Zubau an Kapazitäten ist sehr stark mit Investitions- und Produktionssubventionen korreliert, da ein Großteil der erneuerbaren Energiequellen derzeit noch nicht zu Marktpreisen wirtschaftlich betrieben werden können. Daher sind die zugebauten Kapazitäten ein guter Indikator für die Höhe von Subventionen auf erneuerbare Energien. Ein Besseres Beispiel ist die Energieproduktion aus erneuerbaren Energiequellen, da diese zusätzlich zur Politik noch von Wetterbedingungen und der ökonomischen Entwicklung eines Landes abhängt. Den jährlichen Zubau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten berechnen wir aus den Daten, die die IEA in ihrer *OECD – net Capacity of Renewables* Datenbank (IEA 2015b) zur Verfügung stellt. Die Kapazität wird gemessen in MW Äquivalenten (MWe), da es sich bei den Erzeugungskapazitäten sowohl um Wärme als auch Stromquellen handelt.

Die dritte Politikategorie des CPMI befasst sich mit der Bepreisung von CO<sub>2</sub> Emissionen. Dies schließt sowohl Emissionshandelssysteme wie auch CO<sub>2</sub> Steuern mit ein. Insgesamt waren über den Beobachtungszeitraum des CPMI 8 verschiedene Emissionshandelssysteme in Kraft, wovon eins, das Australische, nach zweijähriger Laufzeit (2012/2013) jedoch bereits wieder abgeschafft wurde. Dennoch findet auch dieses für das relevante Jahr 2012 Berücksichtigung im CPMI. Damit waren oder sind in 28 der betrachteten 33 Länder Emissionshandelssysteme in Kraft. Die hiervon abgedeckten CO<sub>2</sub> Emissionen machten im Jahr 2013 fast einen Anteil von 17% an den weltweiten CO<sub>2</sub> Emissionen aus. CO<sub>2</sub> Steuern wiederum fanden oder finden nur in 12 der 28 Länder des CPMI Anwendung.

### 2.2.2. Methoden

Der Klassifizierung von Freudenberg (2003) folgend handelt es sich bei dem CPMI um einen zusammengesetzten Index. Dieser besteht insgesamt aus drei Subindikatoren, den drei Politikategorien Steuern auf Energieprodukte, Subventionen für erneuerbare Energien und CO<sub>2</sub> Preisen. Diese wiederum bestehen aus einer Vielzahl individueller Indikatoren (siehe Freudenberg, 2003; S. 7), die einzelne Politikinstrumente widerspiegeln.

Abbildung 4: Aufbau des CPMI (Quelle: eigene Darstellung)

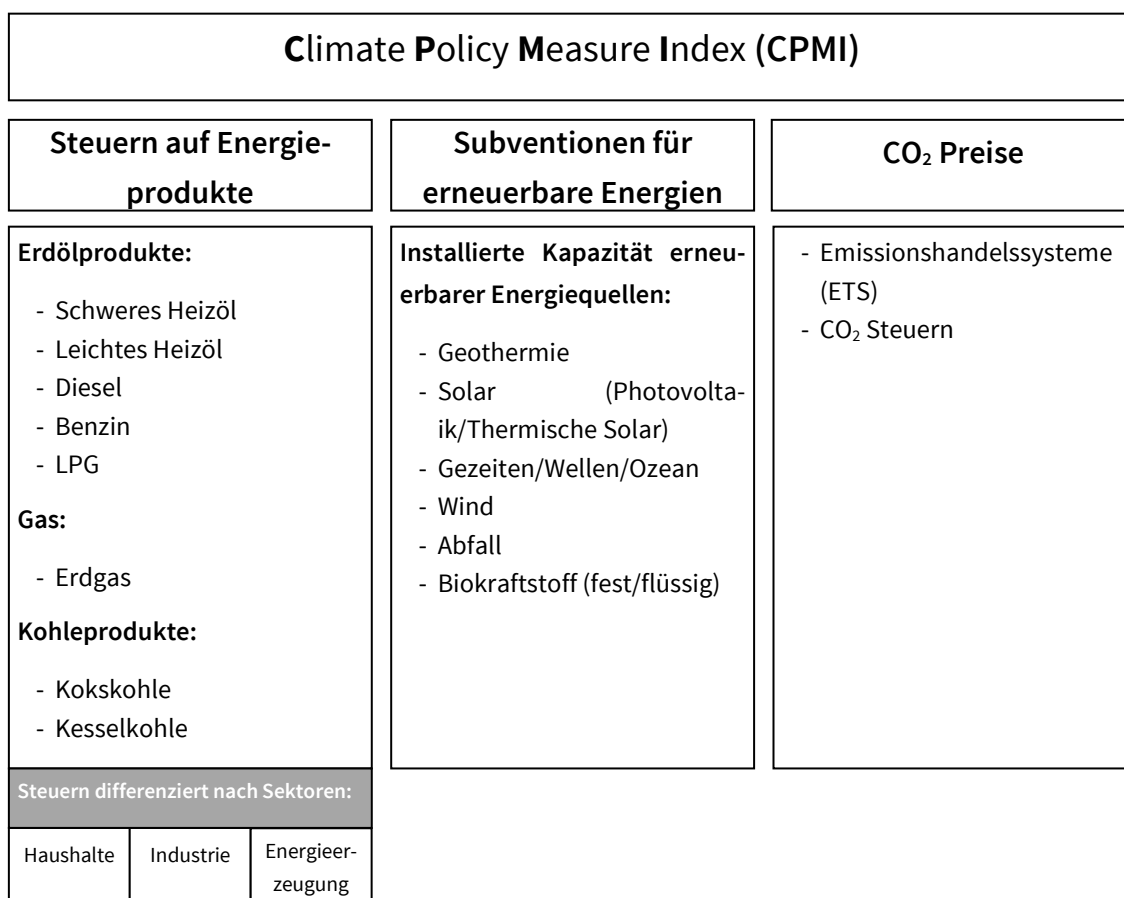


Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau des CPMI. Der Subindikator „Steuern auf Energieprodukte“ umfasst Steuern auf fossile Treibstoffe (Ölprodukte, Erdgas und Kohleprodukte) und Steuern auf den Konsum von Elektrizität. Wie bereits bei der Datenbeschreibung angeklungen, gibt es die Energiesteuer-Daten auf einem sehr disaggregierten Produktlevel. In der Abbildung sind aus Gründen der Übersichtlichkeit zum Beispiel die verschiedenen Benzinsorten zu einer Produktkategorie zusammengefasst worden. Darüber hinaus werden die Steuern unterschieden nach den Sektoren (Haushalte, Industrie und Energieerzeugung) in denen sie erhoben werden. Insgesamt beinhaltet der CPMI 23 verschiedene Energiesteuern, die aus den verschiedenen Kombinationen von besteuerten Produkten in den jeweiligen Sektoren resultieren. Um aus den 23 verschiedenen Steuerzeitreihen einen Subindikator für Energiesteuern zu berechnen wird eine gewichtete Durchschnittssteuer auf Energieprodukte in nationaler Währung pro Tonne Erdöläquivalent berechnet. Als Gewichte



hierfür dient der Anteil des Verbrauchs der jeweiligen Energieprodukte am Gesamtverbrauch im jeweiligen Land und Jahr.

Die Subventionen auf erneuerbare Energiequellen werden, wie bereits in der Datenbeschreibung erwähnt, durch den jährlichen Zubau von Erzeugungskapazitäten erneuerbarer Energiequellen approximiert. Abbildung 4 listet die 6 verschiedenen Typen erneuerbarer Energieerzeugung auf, die im CPMI Berücksichtigung finden. Laufwasser- und Pumpspeicherkraftwerke sind absichtlich nicht enthalten, da deren Bau stärker von anderen Faktoren wie den topographischen Grundvoraussetzungen eines Landes abhängt als von Subventionen. Durch die Normierung der jährlich zugebauten Kapazitäten mit der Bevölkerungsgröße des jeweiligen Landes spiegelt der Subindikator „Subventionen auf erneuerbare Energiequellen“ den jährlichen Kapazitätszubau erneuerbare Energiequellen pro Kopf wider.

Der CO<sub>2</sub> Preis Subindikator setzt sich aus zwei Politikvariablen zusammen. Zum einen aus Zertifikatspreisen von Emissionshandelssystemen und zum anderen aus CO<sub>2</sub> Steuern. Beide Politikvariablen werden gemessen in nationaler Währung pro Tonne CO<sub>2</sub>. Bei der Aggregation zu einem Subindikator sind zwei Fragen von Bedeutung: Erstens, welchen Anteil an den Gesamtemissionen des Landes werden von dem jeweiligen Instrument abgedeckt und zweitens, wird nur ein Instrument der CO<sub>2</sub> Be-preisung verwendet oder beide. In den Ländern, in denen entweder eine CO<sub>2</sub> Steuer oder ein Emissionshandelssystem zur Anwendung kommt wird der CO<sub>2</sub> Preis mit dem Anteil der abgedeckten Emissionen an den Gesamtemissionen normiert, um auch hier wieder für die Bedeutung des jeweiligen Instruments in dem Land zu kontrollieren. Kommen sowohl CO<sub>2</sub> Steuern als auch Emissionszertifikate zum Einsatz wird ein gewichteter Durchschnittspreis für die CO<sub>2</sub> Emission des Landes berechnet. Als Gewichte dienen auch hier die Anteile der abgedeckten Emissionen an den Gesamtemissionen. Von den 33 Ländern, die im CPMI enthalten sind, werden in 11 Ländern beide Instrumente simultan verwendet.

Da die drei Subindikatoren sich sowohl in den Einheiten als auch in ihrer jeweiligen Skala unterscheiden, bedarf es vor der Gewichtung einer Standardisierung. Zur Standardisierung wird die Methode der Abweichung vom Mittelwert verwendet. Aufgrund dessen, dass der CPMI sowohl einen Vergleich der klimapolitischen Stringenz zwischen den Ländern als auch für die einzelnen Länder über die Zeit erlaubt, werden für die Standardisierung zwei verschiedene Verteilungen zugrunde gelegt. Für

den Querschnittsvergleich von Ländern, wird die Verteilung eines Subindikators über die Länder zu einem Zeitpunkt standardisiert. Für den Vergleich der Entwicklung der klimapolitischen Stringenz eines Landes, wird die Verteilung eines Subindikators für ein Land über die Zeit standardisiert. Nach der Standardisierung der Subindikatoren sind diese standardnormalverteilt und werden zu einem Index zusammengesetzt. Hierzu werden die einzelnen Subindikatoren gewichtet mit empirisch fundierten Gewichtungsfaktoren. Die Gewichtungsfaktoren werden berechnet aus den Elastizitäten der Emissionsintensität der Produktion hinsichtlich der einzelnen Politikategorien der drei Subindikatoren. Dadurch werden die Subindikatoren mit ihrer jeweiligen Effektivität in der Emissionsreduktion gewichtet. Theoretisch motiviert wird die Schätzgleichung aus einer zweistufigen Schätzung der Kaya-Identität.

### 2.2.3. Ergebnisse

Zur Interpretation der Ergebnisse des CPMI ist es wichtig, sich noch einmal in Erinnerung zu rufen, was der CPMI misst. Er misst ausschließlich die Stringenz (wie stark kommt ein Politikinstrument zum Einsatz und wie effektiv ist es in der Reduzierung von CO<sub>2</sub> Emissionen?) der aktuellen klimapolitischen Anstrengungen eines Landes, und nicht, wie in anderen bereits existierenden Indizes üblich, eine generelle Umweltfreundlichkeit von Ländern (z.B. der Environmental Performance Index (EPI) vom Yale Center for Environmental Law & Policy oder der Climate Change Performance Index (CCPI) von Germanwatch). In diesen Indizes stellt Klimapolitik immer nur einen von mehreren Subindikatoren dar. Der CPMI jedoch fokussiert sich hingegen auf die Bewertung der aktuellen Klimapolitik in den OECD Ländern, was als Indikator für die zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen in diesen Ländern betrachtet werden kann.

Abbildung 5: CPMI-Ranking der OECD-Länder für das Jahr 2012

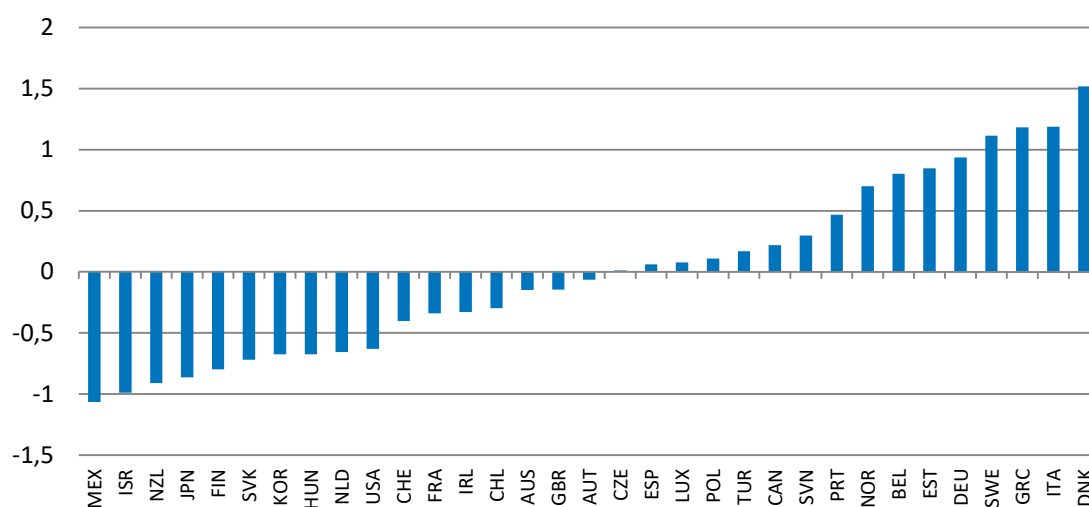
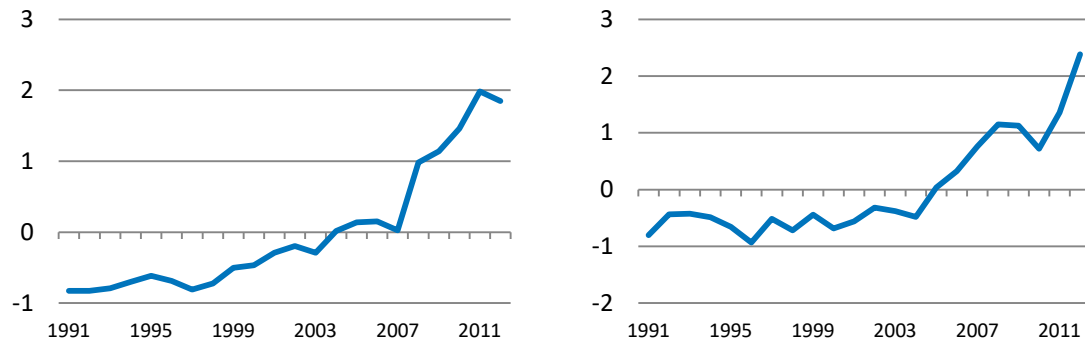


Abbildung 5 zeigt das Querschnittsergebnis des CPMI-Ranking für das Jahr 2012. Die verwendete Standardisierungsmethode führt dazu, dass die durchschnittliche Stringenz den Indexwert 0 erhält und dementsprechend alle Länder mit einem positiven (negativen) Indexwert eine (unter-) durchschnittlich stringente Klimapolitik betreiben. Um ein Gefühl für die Höhe der Indexwerte zu bekommen, sei erwähnt, dass die Wahrscheinlichkeit einen höheren Wert als die Standardabweichung (=1) zu beobachten, bei einer Standardnormalverteilung 16% beträgt. Damit weisen also 68% der Länder einen Indexwert zwischen 1 und -1 auf. Die ersten 10 Plätze des CPMI Länderrankings für das Jahr 2012 werden von EU-Ländern und Norwegen belegt. Dänemark, Schweden und Deutschland schneiden hauptsächlich aufgrund ihres hohen Subindikatorwertes für Subventionen auf erneuerbare Energien so gut ab. Während das gute Abschneiden von Italien und Griechenland hauptsächlich durch die hohen Steuern auf Energieprodukte zu erklären ist.

Die zeitliche Entwicklung der Stringenz der Klimapolitik in Deutschland, als ein Land, welches im Ländervergleich stets überdurchschnittlich abschneidet und den USA, die stets unterdurchschnittlich abschneiden, kann als exemplarisch für alle Länder angesehen werden. Im Beobachtungszeitraum von 1991-2012 hat in allen Ländern die Stringenz der Klimapolitik zugenommen (vgl. Abbildung 6).

**Abbildung 6: Entwicklung der Klimapolitikstringenz über die Zeit in Deutschland (links) und den USA (rechts)**



#### 2.2.4. Schlussfolgerungen

Der CPMI misst die Stringenz von Klimapolitikmaßnahmen in den OECD Ländern über den Zeitraum von 1991-2012. Stringenz bedeutet in diesem Zusammenhang das angewendete Niveau der jeweiligen Politikmaßnahme gewichtet mit der Effektivität dieser Politikmaßnahme bei der Reduzierung der CO<sub>2</sub> Intensität des Bruttoinlandsprodukts. Der CPMI erweitert die bestehende Literatur und die bestehenden Klimapolitikindizes in zweifacher Hinsicht. Zum einen ist er der erste Klimapolitikindex, der einen Vergleich der Entwicklung klimapolitischer Anstrengungen über einen konsekutiven von 22 Jahren ermöglicht und zum anderen ist er der erste Klimapolitikindex, welcher komplett empirisch fundiert erstellt wurde. Damit stellt er ein Höchstmaß an Objektivität und Transparenz sicher, was ihn sowohl für Entscheidungsträger, aber auch für Wissenschaftler sehr wertvoll macht.

#### 2.2.5. Literatur

- Freudenberg, M. (2003), "Composite Indicators of Country Performance: A Critical Assessment", OECD Science, Technology and Industry Working Papers, 2003/16, OECD Publishing.
- IEA (2015a), "End-use prices: Energy prices in national currency per toe", IEA Energy Prices and Taxes Statistics (Datenbank).
- IEA (2015b), "OECD – Net capacity of renewables", IEA Renewables Information Statistics (Datenbank).

## 2.3. Innovationsindikatoren zum globalen Klimaschutz – FuE-Ausgaben und Patente

Die Erfindung, der Einsatz und die Verbreitung sauberer Energietechnologien gelten als wichtiger Hebel im Kampf gegen den globalen Klimawandel. Über zwei Indikatoren - FuE(D)-Ausgaben und Patente - wird hier ein quantitativer Überblick zu möglichen Energieinnovationen gegeben. Im Vordergrund stehen der Vergleich zwischen Technologien (insbesondere zwischen Energie-, Klimaschutz- und anderen Technologien), zwischen Ländern und der Vergleich über die Zeit. Insgesamt hat die Energieforschung über einen Zeitraum von 25 Jahren an Gewicht gegenüber anderen Technologiebereichen verloren und erst in den letzten Jahren, nicht zuletzt durch die Aktivitäten der Schwellenländer, Boden gut gemacht. Der Anteil der potentiellen Klimaschutzausgaben an den energiebedingten FuED-Ausgaben hat jedoch mehr oder weniger beständig zugenommen. Die Zahl potentieller Klimaschutzpatente wächst zugleich schneller als die Zahl der Patente bei fossil-nuklearen Technologien. Ebenso ist der Anteil potentieller Klimaschutzpatente an allen Patenten trotz länderspezifischer Besonderheiten in den letzten 25 Jahren relativ beständig gewachsen. Generell ist von einem Übergewicht von Technologien der Energieangebotsseite gegenüber Maßnahmen der Energieeffizienz und -einsparung auszugehen, was unter dem Gesichtspunkt kostengünstiger Emissionsminderung als problematisch zu werten ist.

Weltweit decken fossile Energieträger zu rund 80% den Primärenergieverbrauch. Dabei konnten – anders als in Deutschland – Kohle, Öl und Gas ihre dominierende Stellung im Markt in den letzten 60 Jahren sogar trotz der Entwicklung der Kernenergie und des Ausbaus moderner erneuerbarer Energien noch leicht erhöhen. Der weltweite Einsatz von Kohle stieg zwischen 1950 und 2010 um etwas mehr als 200 %, der Einsatz von Erdöl um fast 700 % und der Einsatz von Erdgas (von geringem Ausgangsniveau) um mehr als 1300 % (BMW, 2011). Da bei der Verbrennung der fossilen Energieträger über heute standardmäßig vorhandene Technologien unausweichlich CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen, stiegen auch die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 5 Mrd. t im Jahr 1950 auf heute 31 Mrd. t pro Jahr. Gemäß des sog. current policies-Szenario der Internationalen Energieagentur ist bis 2035 mit einer Steigerung des Energiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen um je ca. 50% gegenüber 2009 zu rechnen (IEA, 2011). Folge des Anstiegs der Treibhausgasemissionen ist wiederum die Erhöhung der globalen Jahresmitteltemperatur um fast 0,8° C von 1900 bis heute. Das

erwähnte current policies-Szenario der IEA bis 2035 entspricht einer Temperaturerhöhung von mindestens 6 °C. Dies käme einer eklatanten Verletzung des 2°-Ziels bzw. des Ziels der Verringerung der weltweiten Treibhausgasemissionen um 50-80% bis 2050 gleich. Um dieses Ziel zu erreichen, wäre eine jährliche Verringerung der CO<sub>2</sub>-Intensität um ca. 5- 6% bei einem unterstellten jährlichen Sozialproduktwachstum von etwa 3% erforderlich. Bisher konnte aber selbst in Europa die CO<sub>2</sub>-Intensität zwischen 2000 und 2009 nur um durchschnittlich 2% pro Jahr verringert werden. Angesichts dieser Herausforderungen wird „neben“ Verhaltensanpassungen und Substitutionsprozessen sowie einer Begrenzung des Bevölkerungs- und ggf. Wirtschaftswachstums pro Kopf insbesondere eine regelrechte Technologierevolution als erforderlich angesehen (Galiana und Green, 2009). Die Erfindung, der Einsatz und die Verbreitung neuer sauberer Technologien, vor allem auf der Energieangebots- und Energienachfrageseite, gelten daher als wichtiger Faktor auf dem Weg zu einer Welt mit niedrigem Emissionsniveau.

Energiotechnologische Innovationen werden üblicherweise entlang der verschiedenen Phasen des Innovationsprozesses und der dort wirksamen Einflussgrößen analysiert: Forschung, Entwicklung, Demonstration, Marktformierung und Diffusion (Gallagher et al., 2012). Dabei wird die Analyse dadurch erschwert, dass nicht immer alle Phasen für die Generierung von Innovationen nötig sind (z.B. Innovationsaktivitäten ohne formelle FuE) und die Phasen oft mehrfach miteinander rückgekoppelt sind. Differenziert wird häufig auch zwischen Inputs, Outputs und Outcomes von Innovationssystemen, wobei unter Inputs z.B. FuE- Ausgaben oder der Einsatz von Humankapital gezählt werden. Outputs werden z.B. über die Zahl der Patente oder über die Zahl/Kapazität eingesetzter Technologien approximiert und Outcomes werden etwa über die Marktpenetration, Lernraten, die realisierten ökonomischen Produktivitätsgewinne und die verringerte CO<sub>2</sub>- bzw. Energieintensität gemessen (Gallagher et al., 2011).

An dieser Stelle soll anhand von Indikatoren ein erster quantitativer Überblick über die Entwicklung von (möglichen) Energieinnovationen im Ländervergleich gegeben werden. Dabei werden auch verschiedene Arten von Energietechnologien und ein (grober) Vergleich mit der Innovationstätigkeit insgesamt betrachtet, um die jeweiligen Trends und Spezialisierungsprofile zu verdeutlichen. Angesichts von datenbedingten und methodischen Schwierigkeiten von Ländervergleichen wird hier vereinfacht nur auf zwei oft genutzte und leicht verfügbare Maßgrößen zurückgegriffen:

FuE-Ausgaben als Input und Patente als (intermediären) Output. In beiden Fällen können die gewünschten technologischen Differenzierungen getroffen und langfristige Trends aufgezeigt werden.

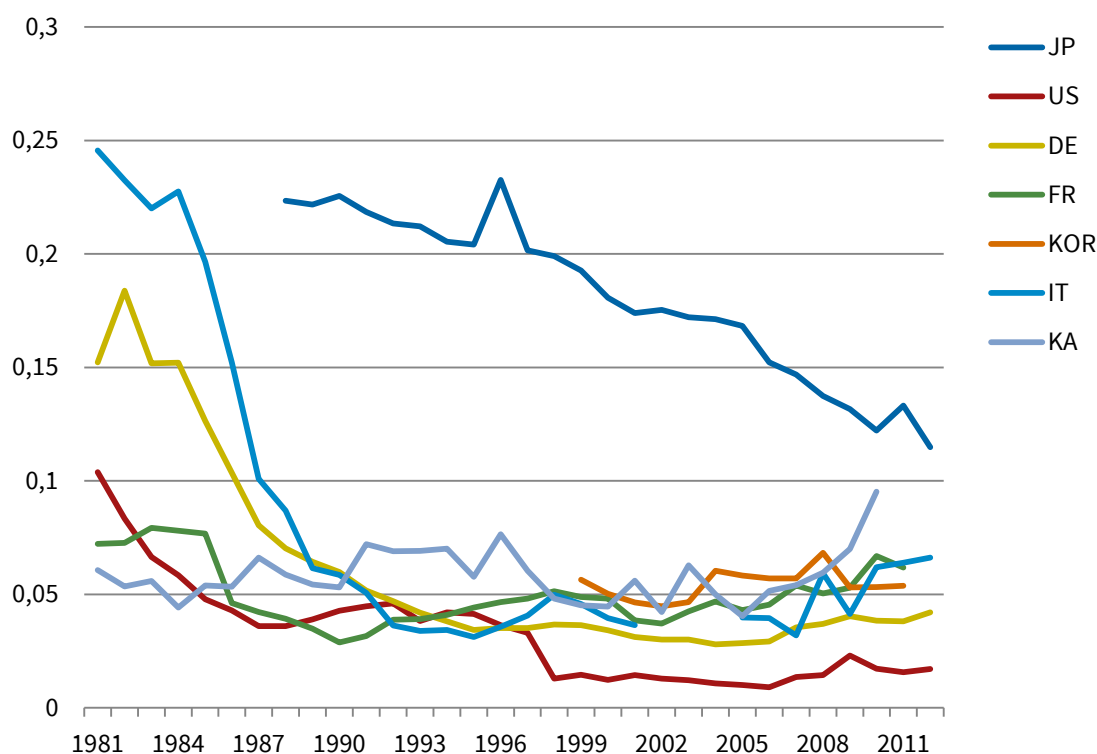
### 2.3.1. Ausgaben für Forschung, Entwicklung und Demonstration

Einen ersten guten Überblick über FuE-Ausgaben im Allgemeinen und energiebedingte FuE-Ausgaben im Besonderen liefern die Daten der OECD und der Internationalen Energieagentur (IEA). In beiden Fällen beziehen sich die Daten im Wesentlichen nur auf die Mitgliedsländer und auf öffentlich finanzierte Budgetausgaben. Etwas enger gefasst sind die sog. GBAORD-Daten (government budget appropriations on research and development) der OECD, die es ermöglichen, die gesamten Ausgaben nach sozioökonomischen Zielen zu untergliedern, darunter das Ziel der „Produktion, Verteilung und rationellen Nutzung von Energie“. Bezogen auf die für die Energieforschung wichtigsten Länder lässt sich gegenüber den frühen 1980er Jahren mit einem Anteil von durchschnittlich 13% an den Gesamtausgaben ein deutlich rückläufiger Trend erkennen (Abbildung 7).<sup>6</sup> Seit dem Tiefpunkt im Jahre 2006 (5,5% im Durchschnitt) lässt sich erst am aktuellen Rand ein Anstieg auf rund 6% erkennen. Der Rückgang ist dabei besonders in Italien, Deutschland, den USA und in dem für die Energieforschung führenden Japan deutlich erkennbar, während dies in Frankreich und Kanada nur bedingt bzw. gar nicht der Fall ist. Insgesamt zeichnet sich ab, dass die gesamten öffentlichen FuE-Ausgaben beständig gewachsen sind, während die energierelevanten FuE-Ausgaben deutlichen Zyklen unterliegen und kumuliert unter relativen Unterinvestitionen leiden.

---

<sup>6</sup> Die Datenlage für etliche OECD-Länder ist vor allem in den 1980er Jahren schlecht. Allerdings gibt es wohl Länder, bei denen Energieforschung grundsätzlich von geringer Relevanz ist (z.B. in Österreich mit einem durchschnittlichen Anteil von 1% über 32 Jahre oder Portugal mit 2% über 27 Jahre).

Abbildung 7: Anteil der energiebedingten FuE an den öffentlichen FuE- Gesamtausgaben



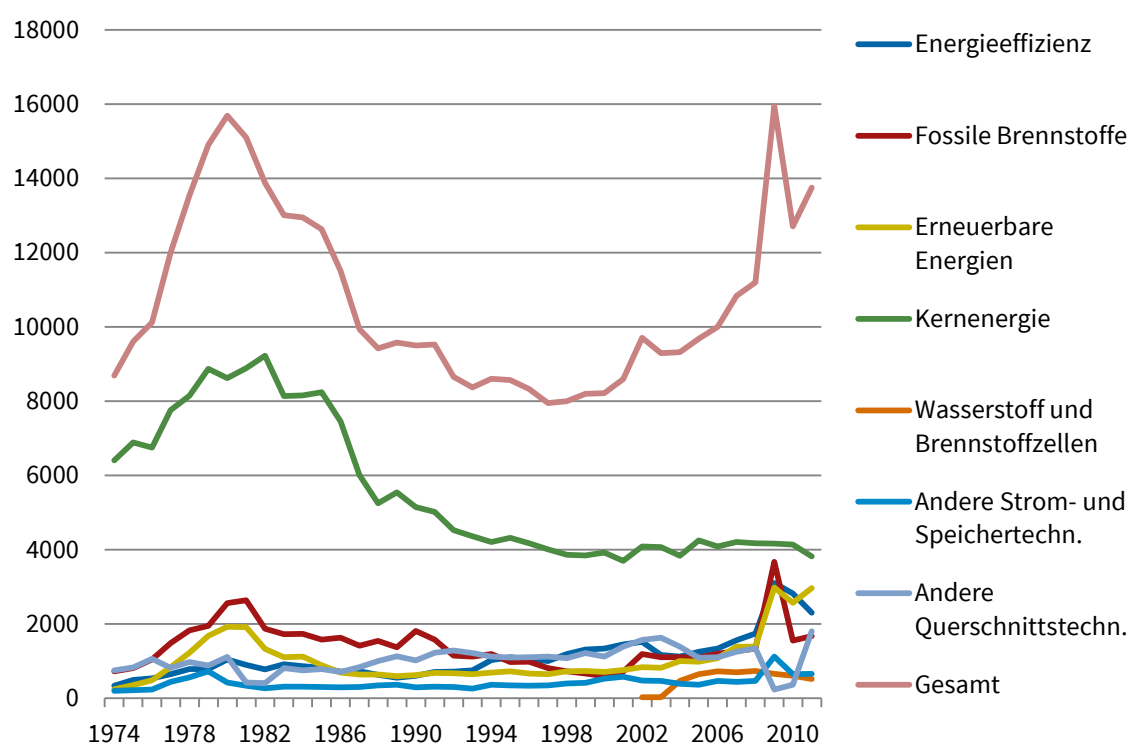
Quelle: OECD, Government budget appropriations or outlays for R&D.

Detaillierte Analysen für die Energieforschung als solche ermöglichen die Daten der IEA, die etwas weiter gefasst sind und prinzipiell auch Demonstrationsvorhaben (FuED) einschließen (vgl. Gallagher et al., 2011 zu den Schwächen dieser Daten). Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der FuED- Ausgaben insgesamt und nach den sieben unterschiedlichen Oberkategorien für alle IEA-Länder. Da die Daten bis Mitte der 1970er Jahre zurückreichen, lässt sich zu Beginn der Betrachtungsperiode noch ein Anstieg der Ausgaben im Zuge der iranischen Ölkrise beobachten. Daraufhin folgen eine längere Abwärtsbewegung mit einem Tiefpunkt im Jahre 1997, dann ein zunächst moderater und schließlich ein rasanter Anstieg bis zum Jahr 2009, als im Zuge der Wirtschafts- und Finanzkrise die Energieforschungsausgaben in einigen Ländern sprunghaft angestiegen sind. Den größten Anteil an den kumulierten Ausgaben hat mit 52% mit Abstand die Nuklearenergie. Ihr Anteil ist von 74% (1974) mehr oder weniger stetig zurückgegangen und erreicht seit 2007 nur noch Werte von unter 40% (28% in 2011). Der zweitgrößte Anteil kumulierter Ausgaben fällt auf fossile Energieträger mit 13%, wobei der Kurvenverlauf dem Verlauf der Gesamtausgaben recht ähnlich ist. Es folgen mit jeweils etwa 10% die Bereiche Energieeffizienz und erneuerbare



Energien. Entgegen dem Gesamtkurvenverlauf lässt sich hier seit 1989 (jeweils 6 %) ein langsamer und zuletzt deutlicher Anteilsgewinn feststellen, der auf die sich intensivierende Klimaschutzdiskussion hindeutet. Auf einen ebenfalls knapp 10%igen Anteil kommen mit einem seit dem Anfang der 1980er Jahre leicht zunehmenden Trend Querschnittsforschungen und -technologien (z.B. Energiesystemanalysen), die auch wesentlich mit dem Thema Klimaschutz und Umgestaltung des Energiesystems zusammenhängen dürften. Insgesamt zeigen die Anteile der Ausgabenbereiche eine starke Fokussierung auf das Energieangebot. Erst am aktuellen Rand ist ein stärkerer Ausgabenanteil auf der Nachfrageseite (Energieeffizienz, Energienutzung, Energiedienstleistungen) erkennbar.<sup>7</sup>

**Abbildung 8: Entwicklung der energiebedingten FuED- Ausgaben insgesamt und nach Oberkategorien (Mio. €, 2011 Preise und Wechselkurse)**



Quelle: IEA Energy Technology R&D Statistics.

Neben öffentlichen FuED- Ausgaben im Energiebereich spielen auch Ausgaben des Privatsektors einige wichtige Rolle, wobei deren genaue Höhe, Struktur und Entwick-

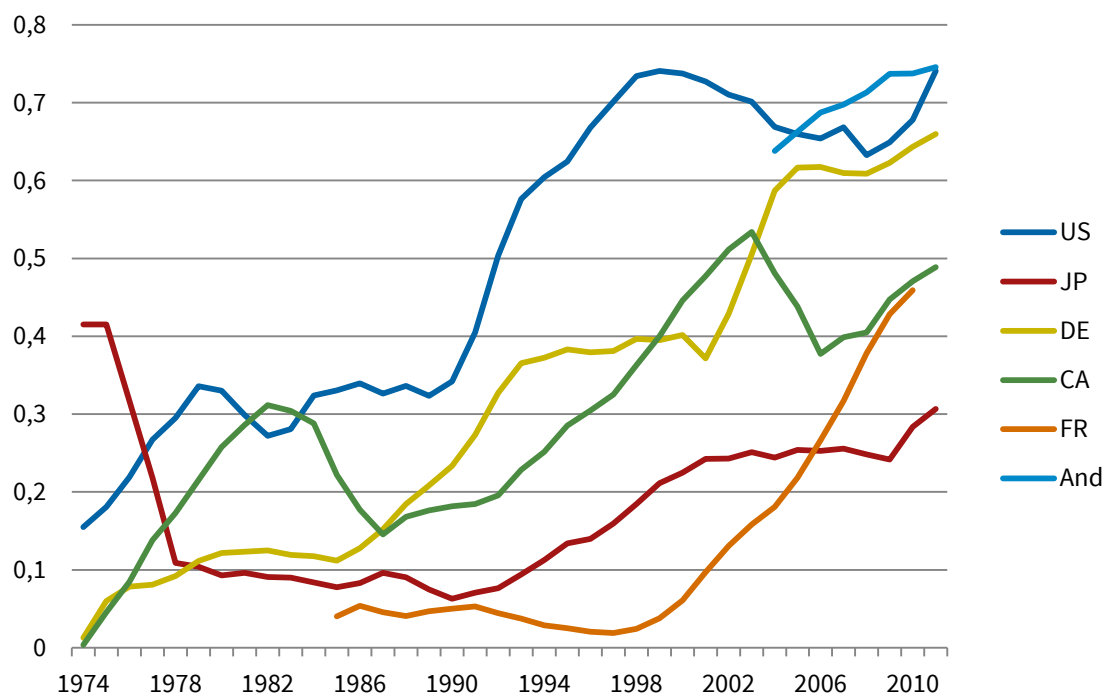
<sup>7</sup> Wilson et al. (2012) zeigen, dass diese einseitige Ausrichtung auch für andere Inputindikatoren des Innovationssystems (z.B. durchgeführte Technologiekooperationen, Technologie-Roadmaps und vorherrschende Art der Analyse und Modellierung des Energiesystems) gilt. Zugleich zeigen sie auf der Output- und Outcome-Seite von Innovationssystemen anhand von Indikatoren, dass die Energienachfrageseite gegenüber der Energieangebotsseite deutlich höhere ökonomische und ökologische Potenziale bietet.

lung allerdings mangels regelmäßig erhobener Daten höchstens grob geschätzt werden können. Grübler et al. (2012) gehen davon aus, dass von 50 Mrd. \$ (PPP) globalen Energieforschungsausgaben 15 Mrd. \$ auf den öffentlichen und 35 Mrd. \$ auf den privaten Sektor fallen.<sup>8</sup> Den genannten Autoren zufolge werden private Forschungsmittel – ähnlich wie öffentliche Gelder – vorwiegend in Energieangebotstechnologien investiert, wobei zumindest ältere Untersuchungen auf Schwerpunkte bei fossilen und nuklearen Technologien hindeuten. Mit Ausnahme von Japan spielen private FuE-Investitionen in Energieeffizienz dagegen eine untergeordnete Bedeutung. Zumindest nach amerikanischen Daten scheinen öffentliche und private FuED-Investitionen ähnlichen Trends zu folgen. Möglicherweise senden zusätzliche öffentliche FuED-Ausgaben bzw. breit angelegte FuED-Programme ein Signal an private Investoren ihrerseits ihre FuED-Mittel zu erhöhen (und umgekehrt bei fallenden öffentlichen Ausgaben zu senken).

---

<sup>8</sup> Gallagher et al. (2012) gehen demgegenüber von einer Aufteilung von 27 Mrd. \$ (öffentlich) und 23 Mrd. \$ (privat) aus.

**Abbildung 9: Entwicklung des Anteils potentieller Klimaschutzausgaben bei energiebedingten FuED- Ausgaben im Ländervergleich (gleitende 3-Jahresdurchschnitte)**



Quelle: IEA Energy Technology R&D Statistics; Berechnungen des ifo Instituts.

Im Folgenden wird – wiederum lediglich anhand der öffentlichen FuED- Mittel – versucht, einen Indikator zu generieren, der den Anteil potentieller Klimaschutzausgaben bei FuED im Zeitablauf und im Vergleich zu den in der Energieforschung wesentlichen Ländern darstellt.<sup>9</sup> Dem Klimaschutz werden dabei die Bereiche Energieeffizienz, erneuerbare Energien, CO<sub>2</sub>-Speicherung und -lagerung, Querschnittstechnologien, Stromspeicherung und Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien hinzugerechnet, während der verbleibende Anteil auf Nuklearenergie, fossile Energieträger und allgemeine Energieumwandlungs-, Verteil- und Übertragungstechnologien fällt. Kumuliert über die Jahre 2004-2011 fallen von allen IEA-Ländern die größten Klimaschutz-FuED-Ausgaben mit Abstand auf die USA (21,4%), gefolgt von Japan (7,8%), Deutschland (2,8%), Frankreich (2,4%) und Kanada (2,3%). Für etliche kleinere Länder fällt dieser Prozentsatz naturgemäß kleiner aus. Dafür tätigen einige von ihnen ihre energiebezogenen FuED-Ausgaben fast ausschließlich im Bereich potentieller Klimaschutztechnologien (z.B. Dänemark, Schweden, Nieder-

<sup>9</sup> Zur besseren Darstellung des Trends werden gleitende 3-Jahresdurchschnitte verwendet.

lande). Für die fünf, absolut in der Energieforschung bedeutsamsten Länder, zeigt Abbildung 9 diesen Indikator im Zeitablauf. Deutlich wird ein durchschnittlicher Anteilsgewinn von etwa 15% Mitte der 1970er Jahre auf 60% am aktuellen Rand. Allerdings wird der wachsende Trend zu klimaschutzbezogenen FuED-Ausgaben durch Trendbrüche und länderspezifische Entwicklungen „gestört“. So hat etwa Japan auf die Ölkrise mit einem deutlichen Anstieg der nuklearen Forschungsausgaben und in den frühen 1980er Jahren auch der Kohle-, Öl- und Gasforschungsausgaben reagiert, während die potentiellen Klimaschutzmittel zunächst rückläufig waren (insbesondere 1977) und dann bis Mitte der 1990er Jahre mehr oder weniger auf demselben Niveau stagnierten. In Kanada wird der Anteilsgewinn potentieller Klimaschutztechnologien zweimal deutlich ausgebremst, Mitte der 1980er Jahre vor allem durch geringere Klimaschutzausgaben und Mitte der 2000er Jahre in erster Linie durch höhere Mittel für die Kernenergie. Relativ gleichmäßig verläuft der Anteilsgewinn in den USA, Deutschland und Frankreich, wobei allerdings die starken Wachstumsphasen zeitlich auseinanderfallen. Einen hohen und seit 2004 wachsenden Anteil der Klimaschutztechnologien weisen auch alle anderen IEA- Länder auf, die hier zusammengefasst werden. Abgesehen von einigen dieser „anderen Länder“ orientieren sich von allen großen Ländern die USA anteilmäßig am stärksten an potentiellen Klimaschutztechnologien in den letzten Jahrzehnten.<sup>10</sup> Dies scheint erstaunlich angesichts der bremsenden Rolle der USA in der internationalen Klimapolitik.

Die IEA-Daten erweisen sich für einen globalen Überblick zu den Energieforschungsausgaben als zunehmend ungeeignet. Der Grund dafür liegt in der wachsenden Bedeutung aufstrebender Schwellenländer. So ergeben Schätzungen für die sog. BRIMCS- Länder (Brasilien, Russland, Indien, Mexiko, China, Südafrika), dass die öffentlichen FuED- Ausgaben bereits 2008, dem letzten Jahren verfügbarer Schätzungen, leicht über dem Niveau aller IEA- Länder lagen (13,8 Mrd. PPP \$ gegenüber 12,7 Mrd. PPP \$) (Gallagher et al., 2011). Unter Hinzurechnung anderer Finanzierungsquellen (regionale/lokale Regierungen, Industrie, halbstaatliche Unternehmen, NGOs) ergibt sich sogar ein Volumen von etwa 18,6 Mrd. \$ PPP. Den mit Abstand größten Anteil an den öffentlichen FuED- Mitteln im Energiebereich der BRIMCS- Länder nimmt China ein (85,5%), gefolgt von Indien (8,4 %) und den anderen drei

---

<sup>10</sup> Wenn man allerdings die Kernenergie unter die Klimaschutztechnologien subsumiert, liegt der Anteil der Klimaschutztechnologien an allen Energietechnologien eines Landes in Deutschland, Japan und zeitweise auch Frankreich höher als in den USA. Zudem ist der über die Zeit wachsende Trend zu Gunsten von Klimaschutztechnologien in allen Ländern deutlich weniger stark erkennbar.

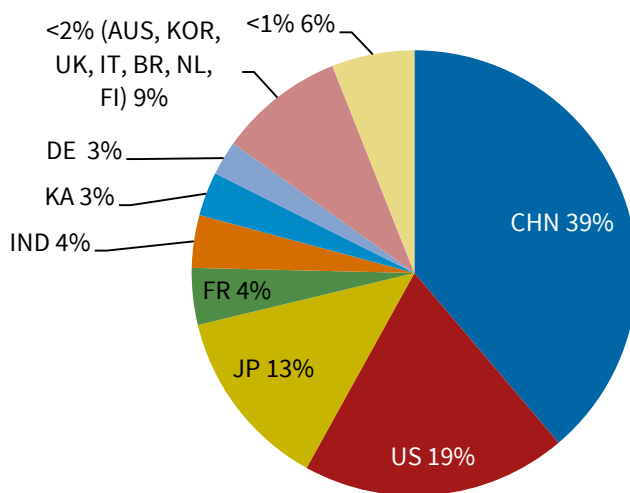
Ländern. Bei den anderen Finanzierungsquellen spielen neben China (27,3%) auch Brasilien (28,3 %) und Russland (19,2 %) eine bedeutendere Rolle.

China konnte dabei zwischen 2000 und 2008 seine energiebezogenen FuED um jahresdurchschnittlich 40% erhöhen, während die allgemeinen FuED- Mittel nur mit einer durchschnittlichen Rate von rund 20% wuchsen. Weitere Mittel sind zudem infolge der Wirtschafts- und Finanzkrise vor allem im Jahr 2009 investiert worden. Unter Einbeziehung der Schwellenländer ist nach diesen Schätzungen China mit Abstand das Land mit den größten öffentlichen Energieforschungsausgaben (Abbildung 10). Auch Indien nimmt mit 4% der Ausgaben noch vor Deutschland den fünften Platz der Länder (IEA + BRIMCS) ein. Bei einer entsprechenden Gewichtung dieser absoluten Daten verblasst die herausgehobene Stellung Chinas und der anderen Schwellenländer allerdings wieder deutlich. Ausgedrückt in FuE- Ausgaben (gross expenditures on R&D, GERD) pro Einheit BIP erreicht China nur etwa 60 % des Durchschnitts der fünf größten IEA- Länder (US, Japan, Deutschland, Frankreich, Kanada). Relativ zur Bevölkerung sind es sogar nur etwa 10%.<sup>11</sup> Auffällig ist im Fall von China schließlich auch noch der geringe Anteil der Grundlagenforschung an der gesamten FuE. Er beläuft sich auf lediglich 5%, während er in den größeren OECD/IEA- Ländern typischerweise zwischen 40 und 60% liegt. So fließen etwa drei Viertel der chinesischen FuE-Mittel in die experimentelle Entwicklung und weitere 20% in die angewandte Forschung (Walz et al., 2008). Die chinesische Forschung ist damit stark auf die Aneignung und Weiterentwicklung importierter Technologien gerichtet, weniger auf die für eine Technologierevolution im Energiebereich als notwendig angesehene Entwicklung von Basistechnologien.

---

<sup>11</sup> Auch unter den IEA- Ländern rücken bei einer Betrachtung der energiebezogenen FuED- Ausgaben relativ zum BIP z.T. andere Länder in den Fokus. Am forschungsinintensivsten sind demnach Finnland, Ungarn, Japan, Kanada und Dänemark.

**Abbildung 10: Anteil der Länder an den Energieforschungsausgaben (IEA + BRIMCS, Durchschnitt 2008 – 2011 bzw. 2008 für BRIMCS)**



Quelle: IEA Energy Technology R&D Statistics; Gallagher et al. (2011).

Die Aufteilung der Energieforschungsmittel in den BRIMCS- Ländern auf die verschiedenen Energietechnologien und Einsatzbereiche erweist sich mangels geeigneter Daten und angesichts methodischer Probleme als schwierig. Gallagher et al. (2011), die dies dennoch versucht haben, legen nahe, dass bezüglich China knapp 60 % der öffentlichen Energie-FuED fossilen Energieträgern zugutekommen und erneuerbare Energien und Energieeffizienz nur einen untergeordneten Stellenwert einnehmen. In Indien scheinen die öffentlichen FuED- Mitteln demgegenüber stark auf die Kernenergie konzentriert zu sein.

### 2.3.2. Patente

FuED-Ausgaben setzen auf der Inputseite des Innovationsprozesses an und können mehr oder weniger hilfreich und notwendig für die Generierung und Verbreitung von Innovationen sein. Patente bilden bereits einen Output von Forschungsaktivitäten und können als ein intermediärer und zählstatistischer Indikator für Innovationen angesehen werden. Patentanalysen haben für unsere Zwecke zwei wesentliche Vorteile. Sie sind zum einen über einen längeren Zeitraum und im globalen Maßstab verfügbar, so dass Entwicklungstendenzen und Hinweise über die Richtung, Dynamik und regionalen Schwerpunkte des technologischen Wandels aufgezeigt werden können. Zum anderen sind in jüngster Zeit erhebliche Anstrengungen unternommen

worden, potenzielle Umwelt- und Klimaschutzpatente aus der Gesamtheit der Patente zu isolieren. Die Grundlage dafür bildet meist die disaggregierte Klassifikation der Patente nach technischem Anwendungsbereich (Patentklassen nach International Patent Classification IPC) (vgl. OECD, 2011). Allerdings ist die Analyse von Patenten auch mit gewissen Nachteilen verbunden. So bleibt offen, ob die patentierten Erfindungen auch auf dem Markt eingeführt werden. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass viele Innovationen nicht patentiert werden (können). So werden viele Innovationen durch andere Mechanismen (z.B. betriebliche Geheimhaltung, Schnelligkeit in der Entwicklung oder der Vermarktung, spezifisches Produktdesign) geschützt. Die Patentneigung variiert damit stark über Sektoren/Industriezweige und Anwendungsbereiche hinweg. Auch der Wert und die Qualität von Patenten können deutlich voneinander abweichen. Patente stellen oft nur Teilausschnitte von technologischen Neuerungen dar, was die Bewertung – auch im Hinblick auf die Umwelt- bzw. Klimaschutzwirkungen – erschwert. Schließlich ist noch zu bedenken, dass die Patentneigung aufgrund unterschiedlicher rechtlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen von Land zu Land verschieden sein kann.

Daher bietet es sich an, den Schwerpunkt auf den relativen Vergleich zwischen Ländern zu legen und vor allem Trends und weniger absolute Niveaus der Patentierung in bestimmten Bereichen zu betrachten. Der unterschiedlichen Patentneigung zwischen den Ländern lässt sich näherungsweise durch die Betrachtung der Anteile der Klimaschutztechnologien an allen Technologien begegnen. Für die folgenden ländervergleichenden Betrachtungen wird die Zahl der Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt nach der EPO Bibliographic Database zugrunde gelegt, wobei sowohl Patentanmeldungen enthalten sind, die nur dort geschützt sind, als auch Patentanmeldungen, die auch bei anderen Patentämtern eingereicht wurden (sog. Patentfamilien). Die EPO-Patentaktivitäten sind im Vergleich zu Daten anderer Patentämter vergleichsweise gut und vollständig erfasst und werden oft für internationale Vergleiche herangezogen.<sup>12</sup> Die EPO Anmeldungen werden dabei nach Land des Erfinders und erstem internationalem Anmeldedatum (sog. priority date) betrachtet.

---

<sup>12</sup> Alternativ kann auf Anmeldungen nach dem Patent Cooperation Treaty (PCT) zurückgegriffen werden. Hierbei werden nur internationale Patentanmeldungen erfasst, von denen angenommen werden kann, dass sie im Einzugsbereich aller regionalen Patentämter zur Geltung kommen sollen. Damit wird zwar ein möglicher "home bias" zu Gunsten europäischer Länder vermieden; allerdings verringert sich die Zahl der Patente auch insgesamt deutlich.

Zu den potentiellen Klimaschutzpatenten können in der Datenbank der OECD und des Europäischen Patentamts (EPO) folgende Oberkategorien gerechnet werden: Energieerzeugung aus erneuerbaren/ nicht fossilen Quellen; Verbrennungstechnologien mit Treibhausgasreduzierungs potenzial (z.B. Kraft-Wärme-Kopplung, integrierter GuD-Prozess, Wärmerückgewinnung); Kohlenstoffabscheidung, -speicherung, -sequestrierung und -lagerung („CO<sub>2</sub>-Technologien“); Technologien mit potentiellen und indirekten Emissionsreduzierungs potenzial (Energiespeicher, Wasserstofftechnologien, Brennstoffzellen); Energieeffizienz im Verkehr; und Energieeffizienz in Gebäuden sowie bei der Beleuchtung. Abbildung 11 zeigt den Anteil potentieller Klimaschutzpatente an allen Patenten eines Landes im Zeitablauf für eine Auswahl von Ländern mit vielen Patentanmeldungen (mindestens 2000 am aktuellen Rand). Ausgangspunkt ist – bis auf Korea und China – das Jahr 1985, ab dem die Zahl der Patente insgesamt jeweils mindestens 400 beträgt. Im Weltdurchschnitt zeigt sich über den Zeitraum von 25 Jahren – bei deutlich steigender Patentierung insgesamt – ein Anteilsgewinn der Klimaschutzpatente von knapp 2% auf knapp 6%. Dabei fallen die Zuwächse in die zweite Hälfte der 1990er Jahre und insbesondere in die Zeit nach 2005. Deutlich über dem globalen Durchschnitt liegen Japan und Korea, mit 8% bzw. etwas über 9%. In Korea ist in den letzten zehn Jahren ein rasanter Bedeutungsgewinn der Klimaschutztechnologien zu verzeichnen, während der Zuwachs in Japan kontinuierlicher verläuft.<sup>13</sup> Die meisten der dargestellten Länder weisen einen ähnlichen Kurvenverlauf wie im globalen Durchschnitt auf (Deutschland und Niederlande mit etwas überdurchschnittlichem Anteil in 2009, Frankreich, USA, Großbritannien und Italien mit unterdurchschnittlichem Anteil). Oft zeigt sich in diesen Ländern erst in den 2000er Jahren ein eindeutiger Anteilszuwachs. Abweichend von den anderen Ländern weist Kanada und China kaum einen wachsenden Trend auf. Kanada hat zwar in den 1980er und 1990er Jahren einen vergleichsweise hohen Anteil an potentiellen Klimaschutztechnologien, kann diesen aber in den 2000er Jahren nur geringfügig erhöhen. Tendenziell deutet dies – auch im Kontext mit den Trendbrüchen bei der Energie-FuE – darauf hin, dass Politikanreize hier eine geringe Rolle gespielt haben. In China ist auch nur ein schwacher Zuwachs in den

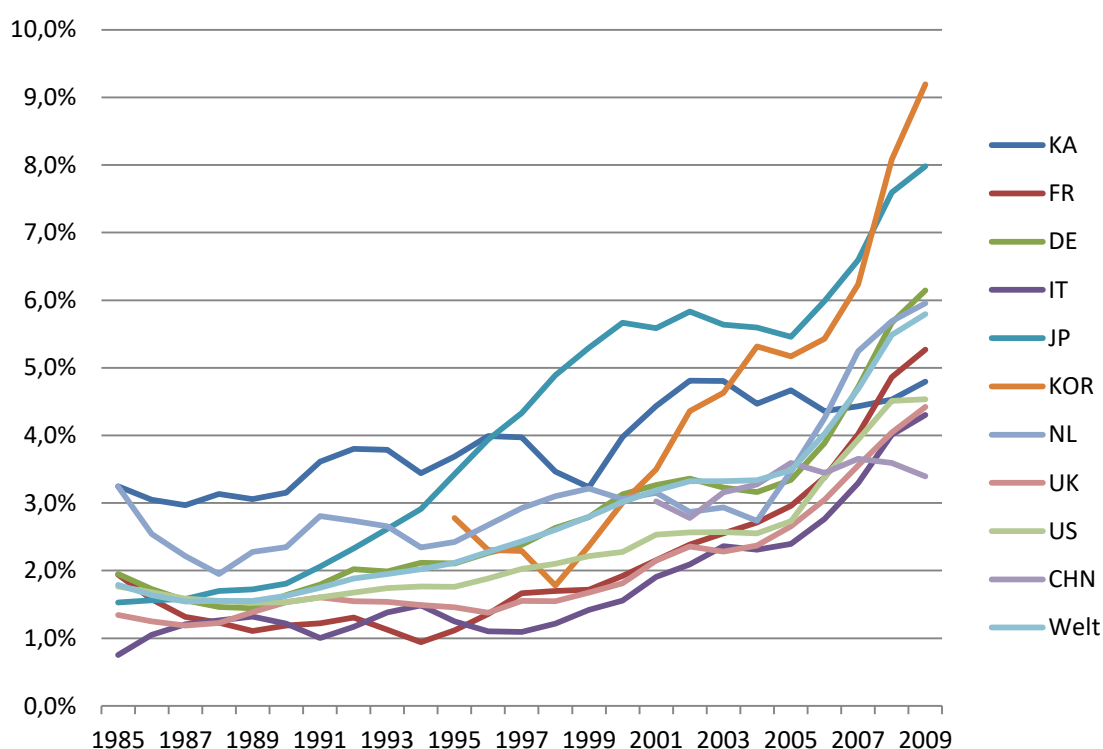
---

<sup>13</sup> Bei einigen kleinen Ländern, die in Abbildung 1 nicht aufgeführt werden, lässt sich ebenfalls ein deutlich überdurchschnittlicher Anteil der Klimaschutztechnologien verzeichnen. Dies gilt vor allem für Dänemark mit fast 18% im Jahr 2009 (von 4% im Jahr 2000), Norwegen (etwa 9% in 2009) und Spanien (fast 8% in 2009).



letzten neun Jahren zu erkennen, obwohl gerade in dieser Phase die Energieforschungsmittel deutlich erhöht worden sind. Auch dies legt nahe, dass patentierte Neuerfindungen in China weniger bedeutsam sind als Maßnahmen zur Anpassung und Modifikation ausländischer Technologien.

**Abbildung 11: Entwicklung des Anteils potentieller Klimaschutzpatente an allen Patenten eines Landes**



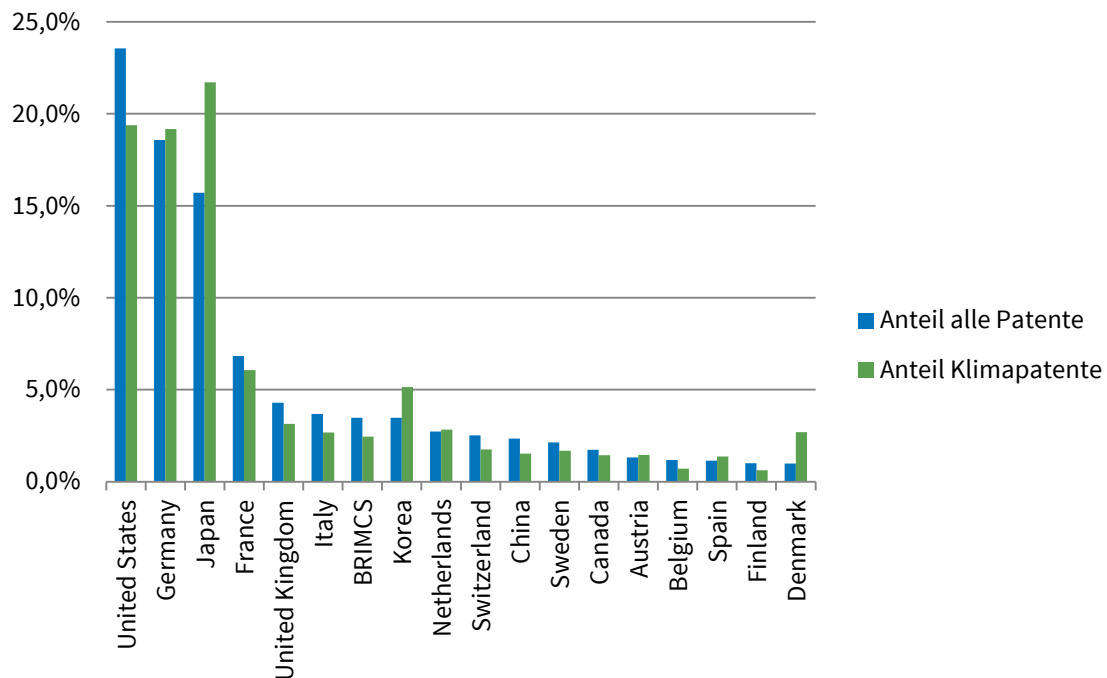
Quelle: OECD, Patents by main technology and by International Patent Classification (IPC); Berechnungen des ifo Instituts.

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**<sup>12</sup> betrachtet alternativ nicht die länderspezifische Entwicklung, sondern den Anteil der im Patentbereich wichtigsten Länder an allen Patenten und an allen potentiellen Klimaschutzpatenten im Durchschnitt der Jahre 2007-2009. Hierbei fällt zunächst auf, dass etwa 60% aller (Klimaschutz-) Patente von Erfindern aus den USA, Deutschland und Japan angemeldet werden.<sup>14</sup> Die USA weisen dabei eine stärkere Konzentration auf „allgemeine“ Patente auf, während Japan und weniger deutlich Deutschland stärker auf

<sup>14</sup> Die Rangfolge zwischen diesen drei Ländern ändert sich, wenn anstelle der Anmeldungen beim Europäischen Patentamt internationale Patente nach dem sog. Patent Cooperation Treaty (PCT) betrachtet werden. Bei allgemeinen Patenten (Klimaschutzpatenten) liegt die USA mit 35 % (26%) vor Japan mit 15 % (25%) und Deutschland mit 12 % (14%).

Klimaschutzpatente setzt. Ein schon deutlich geringeres Gewicht im Patentwesen nehmen schließlich Frankreich, Großbritannien und Italien ein. Die Anteile Italiens entsprechen dabei etwa dem aufsummierten Anteilen aller BRIMCS- Länder, wobei darunter wiederum China deutlich dominiert. In all den zuletzt genannten Ländern liegt der Anteil der allgemeinen Patente höher der Anteil der Klimaschutzpatente. Unter den kleinen Ländern weisen demgegenüber Korea, die Niederlande und Dänemark noch einen relativ hohen Anteil an den Klimaschutzpatenten auf.

**Abbildung 12: Anteil der Länder an allen Patenten und an allen potenziellen Klimaschutzpatenten (Durchschnitt 2007-2009)**



Quelle: OECD, Patents by main technology and by International Patent Classification (IPC); Berechnungen des ifo Instituts.

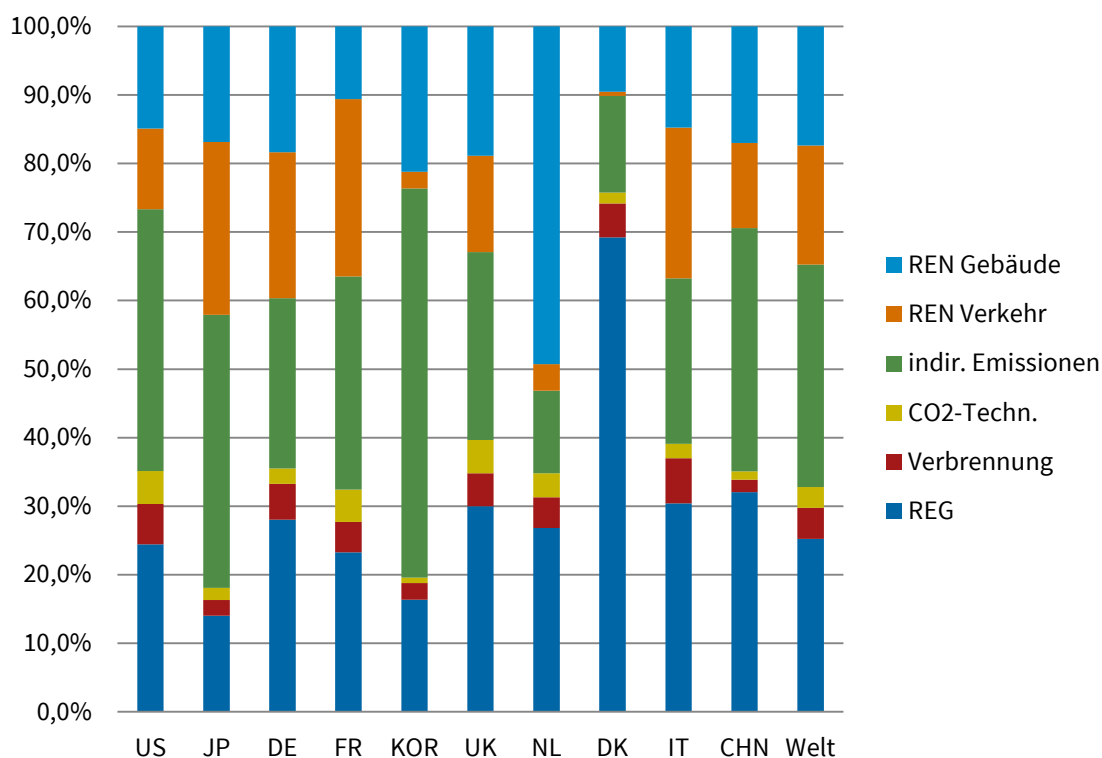
Abbildung 13 nimmt eine Aufteilung der Klimaschutztechnologien in die sechs oben genannten Oberkategorien nach Ländern vor (kumuliert über die Jahre 1985-2009). Im globalen Durchschnitt fallen ein knappes Drittel auf Technologien zur potentiellen und indirekten Emissionsminderung (Energiespeicherung, Brennstoffzellen etc.), gefolgt von Technologien im Bereich erneuerbare Energien (25%), Verkehrs- und Gebäudeeffizienz (je rund 17%), Verbrennungstechnologien (knapp 5%) und „CO<sub>2</sub>-Technologien“ (3%). Bei der Betrachtung der patentstarken Länder fallen bereits einige bedeutende Abweichungen von diesem Muster auf. Überdurchschnittlich stark vertreten ist in Japan und den USA (und erst recht in Korea) die Kategorie indi-

rechte und potentielle Emissionsminderung, bei der der Klimaschutzbeitrag vermutlich von allen Kategorien am wenigsten greifbar ist (40% bzw. 38% bzw. 57%). In Deutschland sind erneuerbare Energien überdurchschnittlich vertreten (28%), was sicherlich mit dem umfangreichen Förderinstrumentarium in diesem Bereich zusammenhängt. Den Schwerpunkt bilden dabei die Fotovoltaik und die Windenergie. Ebenfalls gut repräsentiert sind sowohl in Deutschland als auch in Japan Energieeffizienztechnologien im Verkehr (21% bzw. 25%). Zusammen decken allein diese beiden Länder rund 60% aller einschlägigen Patente weltweit ab. Offensichtlich spiegelt sich darin die traditionelle Stärke der Verkehrs- und Automobilindustrie in beiden Ländern wieder. In den USA spielen demgegenüber u.a. „CO<sub>2</sub>-Technologien“ eine herausgehobene Rolle (5%), was sich auch darin ausdrückt, dass 36% aller weltweiten Patente in diesem Bereich US-amerikanischen Ursprungs sind. Bei den kleineren bzw. weniger patentstarken Ländern sind ebenfalls einige Besonderheiten zu vermerken. So fällt bei der Gebäudeeffizienz der starke Schwerpunkt in den Niederlanden auf (49%iger Anteil bzw. knapp 9% an allen weltweiten Patenten in diesem Bereich). Der Bereich der erneuerbaren Energien ist mit Ausnahme von Korea und Frankreich in den übrigen aufgeführten Ländern überdurchschnittlich stark. Von herausgehobener Bedeutung sind sie in Dänemark, das sich eine starke weltweite Position vor allem bei der Windenergie erarbeitet hat (69%iger Anteil bzw. rd. 4% aller weltweiten erneuerbaren Energiepatente). Demgegenüber liegt in China mit einem Anteil von 32% der Schwerpunkt bei der Fotovoltaik.<sup>15</sup> Aufgrund dieser Profile verliert in diesen Ländern (vor allem in den Niederlanden und Dänemark) damit auch der im Hinblick auf die Klimaschutzwirkung unsichere Bereich der indirekten und potentiellen Emissionsminderung deutlich an Gewicht.

---

<sup>15</sup> Überdurchschnittliche Anteile bei den erneuerbaren Energien weisen eine Reihe weiterer Länder mit insgesamt geringer Anzahl an Patenten auf, darunter Spanien (73% an allen Klimaschutzpatenten), Norwegen (51%), Australien (50%), Belgien (49%), Israel (45%) und Finnland (40%).

**Abbildung 13: Aufteilung pot. Klimaschutzpatente in Oberkategorien nach Ländern (kumuliert 1985-2009)**

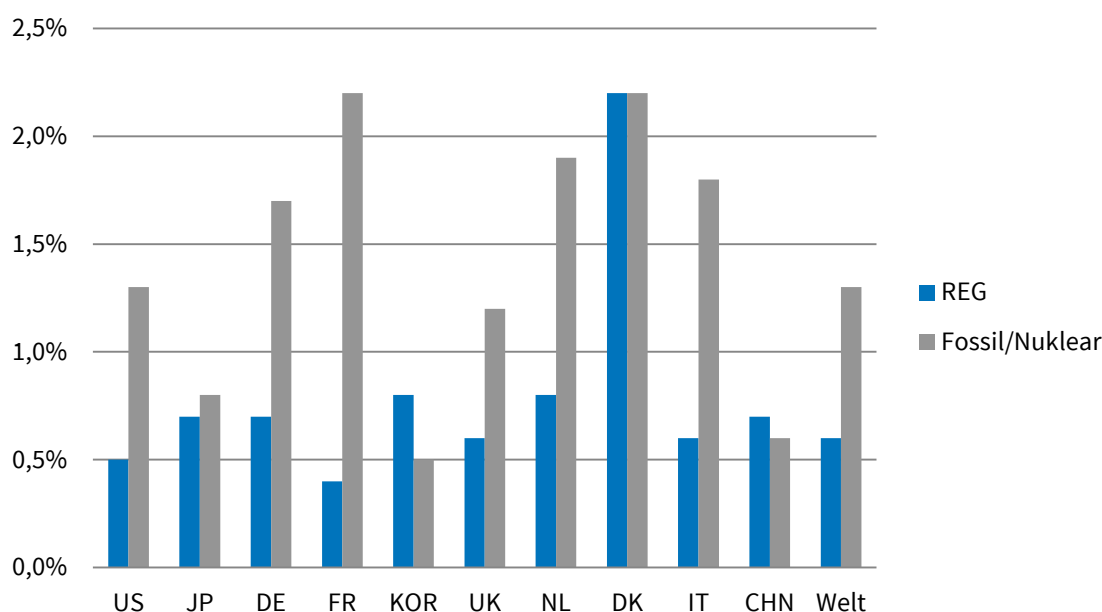


Quelle: OECD, Patents by main technology and by International Patent Classification (IPC); Berechnungen des ifo Instituts.

Statt kumuliert können die genannten Kategorien auch in Wachstumsraten ausgedrückt werden, um Trends zu verdeutlichen. Die durchschnittliche Wachstumsrate aller weltweiten Klimaschutzpatente von rund 10 % wird dabei von Technologien bei erneuerbaren Energien am deutlichsten übertroffen (12 %). Ebenfalls überdurchschnittlich sind auf einem niedrigeren Niveau „CO<sub>2</sub>-Technologien“ (11,1 %), wobei dieser Trend von den USA und Japan geprägt ist. Verkehrstechnologien (und hier vor allem deutsche und japanische Hybrid- und Elektroantriebe) wachsen ebenfalls etwas schneller als der Durchschnitt (10,9 %). Unterdurchschnittlich nehmen dagegen Technologien zur potentiellen und indirekten Emissionsminderung (9,6 %) und Verbrennungstechnologien (6,4 %) zu. Energieeffizienztechnologien im Gebäudebereich wachsen ebenfalls deutlich langsamer als der Durchschnitt (7,4 %). Über die Patentdaten lassen sich somit zwar einzelne Energieeffizienztechnologien bzw. entsprechende länderspezifische Entwicklungen in diesem Bereich identifizieren, die auf

eine überdurchschnittliche Dynamik hinweisen. Im Mittel lässt sich jedoch nicht die bei den FuE-Ausgaben bereits getroffene Aussage widerlegen, dass Energieangebots-technologien (insbesondere erneuerbare Energien) einen relativ größeren Stellenwert einnehmen als innovative Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz und -einsparung.<sup>16</sup>

**Abbildung 14: Anteil der Patente bei erneuerbaren Energien und bei fossilen/nuklearen Energieträgern an allen Patenten (kumuliert 1988 - 2007)**



Quelle: OECD (2011).

Zusätzliche Daten in OECD (2012) ermöglichen es – kumuliert für die Jahre 1988 bis 2007 – die Zahl der Patente bei erneuerbaren Energie den Patenten bei fossilen und nuklearen Energieträgern gegenüberzustellen und beide als Anteil aller Patente darzustellen (Abbildung 14). Dabei fällt zunächst wiederum der geringe Anteil der Energiepatente an allen Patenten von etwa 2% weltweit auf. Im Vergleich zu der Betrachtung der öffentlichen FuE-Ausgaben (Abbildung), bei der im selben Zeitraum der Anteil an den Gesamtausgaben mindestens dreimal so hoch war, dürfte dies zum Teil an der Vernachlässigung anderer Energietechnologien (Energieeffizienz, Brennstoffzellen etc.) und ggf. an der engen Abgrenzung der Patentklassen liegen. Der große

<sup>16</sup> Eine Analyse mit Patentendaten trifft hier auf die Schwierigkeit Energieeffizienztechnologien überhaupt erst in ihrer Breite zu identifizieren. Außerdem dürften zahlreiche Maßnahmen nicht patentiert werden.

Unterschied bei den Anteilen lässt aber vermuten, dass die Patentneigung bei Energietechnologien geringer ist als in anderen Bereichen und/oder das im Energiebereich relativ umfangreiche öffentliche Mittel verausgabt werden (müssen), die nicht unmittelbar mit innovativen Aktivitäten (Patentaktivitäten) in Verbindung stehen (z.B. für den Aufbau von Forschungsinfrastruktur). Zumindest für die asiatischen Länder Japan, Korea und China liegt diese Vermutung nahe, weniger dagegen für Dänemark. Der Anteil kumulierter fossil nuklearer Patente an allen Patenten ist schließlich im weltweiten Durchschnitt rund doppelt so hoch wie der Anteil der kumulierten Patente bei erneuerbaren Energien. Bei den dargestellten Ländern gilt dies erst recht für Frankreich, Italien, Niederlande, Deutschland und die USA. Ausgeglichen ist das Verhältnis demgegenüber in Asien und Dänemark. Ähnlich wie bei anderen Technologien liegt der Anteil von Deutschland (19,3%), Japan (19%) und den USA (18,3%) an allen fossil-nuklearen Patenten bei knapp 60 %. Die Zahl der jährlichen Patente bei fossilen und nuklearen Technologien stagniert allerdings seit vielen Jahren, während über alle Technologien hinweg und erst recht bei erneuerbaren Energien ein deutlicher Wachstumstrend zu verzeichnen ist (OECD, 2012).

### 2.3.3. Schlussfolgerungen

Insgesamt lässt sich in den letzten Jahren eine erfreuliche Belebung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bei Energietechnologien im Allgemeinen und klimaschonenden Energietechnologien im Besonderen beobachten, die der jahrzehntelangen relativen Unterinvestitionstendenz in diesem Bereich entgegenwirkt. Wichtig erscheint es diesen Trend zu verstetigen und die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich nicht nur einmalig wie im Rahmen der Wirtschafts- und Finanzkrise 2009, sondern kontinuierlich und insbesondere auch in den aufstrebenden Schwellenländern zu stärken.

Szenarioanalysen und Modellrechnungen im Rahmen des Global Energy Assessment haben das zukünftige Marktpotential spezifischer Energietechnologien abgeschätzt und dieses Potenzial der öffentlichen FuE-Förderung im Energiebereich gegenübergestellt. In einer vom Klimawandel bedrohten Welt ist demzufolge der Mix der geförderten Energietechnologien in den FuE-Portfolios noch verzerrt (Grubler und Riahi, 2010; Grubler et al., 2012). So ergibt sich als robustes Ergebnis verschiedener Szenarien und Sensitivitätsanalysen, dass auf Energieeffizienztechnologien und -einsparmaßnahmen typischerweise ein Treibhausgasminierungsbeitrag bis 2100

von mindestens 50 % fällt, während der Beitrag der Kernenergie typischerweise bei etwa 10% liegt. In den öffentlichen FuE-Ausgaben wird demgegenüber die Kernenergie immer noch gegenüber der Energieeffizienz und -einsparung priorisiert (erst recht in der kumulativen Betrachtung). Auch die FuE-Anteile der erneuerbaren Energien und der Kohlenstoffabscheidung und -lagerung fallen demzufolge noch etwas hinter dem zurück, was die Analyse der zukünftigen „technologischen Bedürfnisse“ nahelegt. Wenn man die bestehenden FuE-Portfolios bei Energietechnologien als jeweilige Optionswerte alternativer Technologien in einer vom Klimawandel bedrohten Welt betrachtet, müssten demnach die bestehende FuE-Ausgaben allein zu Gunsten der Energieeffizienz und -einsparung um mindestens den Faktor fünf erhöht werden.

#### 2.3.4. Literatur

- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2011): Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Berlin.
- Galiana, I. und Green, C. (2009): Let the global technology race begin, *Nature* 462, S. 570-571.
- Gallagher, K.S. et al. (2011): Trends in investments in global energy research, development, and demonstration, *Review of climate change* 2, pp. 373-396.
- Gallagher, K.S. et al. (2012): The Energy Technology Innovation System, *Annual Review of Environment and Resources* 37, pp. 137-162.
- Grubler, A. et al. (2012): Chapter 24 - Policies for the Energy Technology Innovation System (ETIS), in: *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1665-1744.
- International Energy Agency (IEA) (2011): *World Energy Outlook*, International Energy Agency, Paris.
- OECD (2011): *Invention and Transfer of Environmental Technologies*, OECD Studies on Environmental Innovation, Paris.
- Grubler, A. und Riahi, K. (2010): Do governments have the right mix in their energy R&D portfolios?, *Carbon Management*, Vol. 1/1, pp. 79-87.
- Walz, R. et al. (2008): *Forschungs- und Technologiekompetenz für eine Nachhaltige Entwicklung in den BRICS Staaten*, Studie des Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung für den Rat für Nachhaltige Entwicklung, Karlsruhe.
- Wilson, C. et al. (2012): Marginalization of end-use technologies in energy innovation for climate protection, *Nature Climate Change* 2, pp. 780-788.

## 2.4. CO<sub>2</sub> Emissions-Szenarien in Europa basierend auf einem endogenen Wachstumsmodell

Unsere zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen werden das Ausmaß des Klimawandels und die damit einhergehenden Schäden maßgeblich beeinflussen. Ein Ziel des Projekts ist es, Emissions-Szenarien für Europa bis in das Jahr 2100 zu entwickeln. Im Vergleich zur bestehenden Literatur führen wir in diesem Zusammenhang zwei Innovationen ein. Zum einen projizieren wir ökonomisches Wachstum auf der Grundlage eines endogenen Wachstumsmodells. Zum anderen kalibrieren wir unser Modell anhand von historischen Bevölkerungsdaten und Beobachtungen zum BIP seit 1850. Des Weiteren gehen aus unserer Arbeit Emissions-Szenarien auf Länderebene sowie innerhalb einzelner Regionen in Europa hervor. Dies ermöglicht insbesondere auch den Vergleich zukünftiger Emissionen in West- und Osteuropa. Für alle Projektionen führen wir eine Schätzung des zugehörigen Konfidenzintervalls durch, welches uns eine Intuition über die Genauigkeit unserer Vorhersagen ermöglicht.

Im Ergebnis erlauben unsere Berechnungen eindeutige Aussagen über die Notwendigkeit der Reduktion zukünftiger Energie- und Emissionsintensitäten um bestimmte Emissionsziele zu erreichen. So müssten in Westeuropa die Energie- und Emissionsintensität um 0,75% jährlich sinken um die zukünftigen Emissionen bei einem gegebenen Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum näherungsweise konstant halten zu können. In Osteuropa hingegen wäre eine Reduktion der Energie- und Emissionsintensität um 0,25% hinreichend. Der Unterschied liegt hauptsächlich im langsameren Wirtschaftswachstum der osteuropäischen Staaten begründet.

Das Intergovernmental Panel of Climate Change, kurz IPCC, hat im Jahr 2000 einen interdisziplinären Report von Nakicenovic et al. veröffentlicht, der beeindruckend viele Emissions-Szenarien miteinander vergleicht und dabei die maßgebliche Bedeutung des Wirtschaftswachstums in der Konstruktion solcher Szenarien unterstreicht. In der einschlägigen Literatur wurden endogene Wachstumsmodelle in theoretischen Arbeiten bereits vermehrt implementiert. Beispielhaft hierfür sind die Arbeiten von Bovenberg und Smulders (1995) sowie von Smulders (1995). Auch in der Literatur der sog. Integrated Assessment Modelle wurden zukünftige Emissionspfade bereits mannigfaltig errechnet. Einige Modelle bemühen sich hier insbesondere einen endogenen Technologischen Fortschritt einzubeziehen. Dies betrifft vor allem das



WITCH Modell (siehe Bosetti, Massetti und Tavoni (2007), das ENTICE Modell (siehe Popp (2004)) sowie das DEMETER Modell (siehe Gerlagh und van der Zwaan (2003)). Diese Modelle vereint jedoch, dass das Wirtschaftswachstum von exogen gegebenen Wachstumsraten determiniert wird. Nach unserem besten Wissensstand gibt es derzeit kein kalibriertes Modell welches auf den Annahmen der sogenannten Neuen Wachstumstheorie basiert und das Wirtschaftswachstum endogenisiert.

#### 2.4.1. Daten

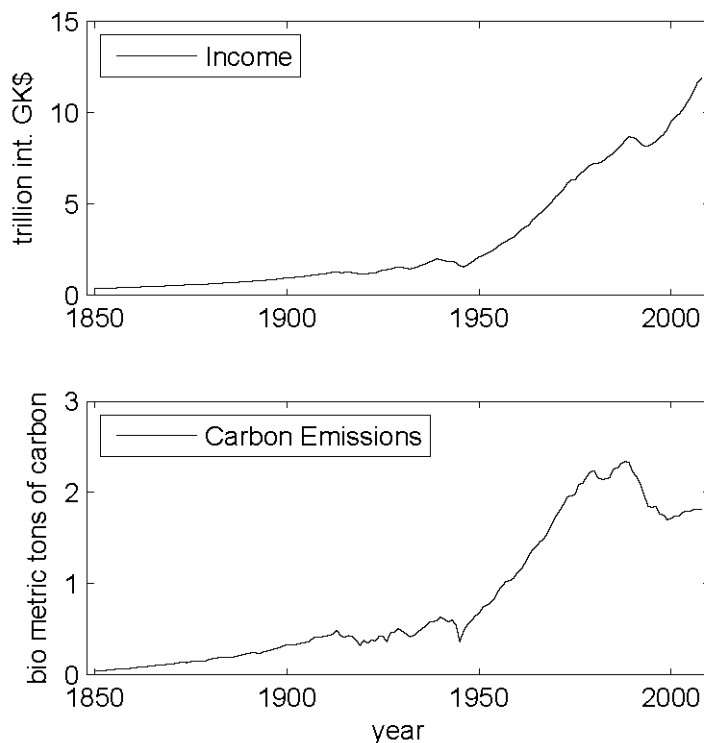
Unsere Daten umfassen 27 Länder beziehungsweise Regionen in Europa und Beobachtungen von 1850 bis 2008 beziehungsweise Projektionen bis in das Jahr 2100.

**Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Datensätze**

| Variable                         | Zeitraum    | Quelle  |
|----------------------------------|-------------|---|
| <b>Bevölkerung</b>               | 1850 - 2008 | Angus Maddisons Historische Statistiken (siehe Maddison 2010) |
|                                  | 2011 - 2100 | Vereinte Nationen (2010)                                      |
| <b>BIP</b>                       | 1850 - 2008 | Angus Maddisons Historische Statistiken (siehe Maddison 2010) |
| <b>Energieverbrauch</b>          | 1960 - 2008 | Weltbank online Datenbank                                     |
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b> | 1850 - 2008 | Boden, Andres und Marland (2013)                              |

Laut der Vorhersagen der Vereinten Nationen wird die Stagnation des Bevölkerungswachstums in Europa seit der Jahrtausendwende auch bis in das Jahr 2100 anhalten (siehe auch Tabelle 1 oben). Diese äußerst akzentuierte Veränderung des Trends wird starke Auswirkungen auf zukünftige Emissionen haben. Zudem erkennen wir in Abbildung 15 unten einen starken Rückgang der Emissionsintensität (Emissionen relativ zum BIP). Diese Veränderung wird ebenfalls starke Auswirkungen auf zukünftige Emissionen haben.

Abbildung 15: BIP und CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa (inkl. Russland)



#### 2.4.2. Methoden

Wir untergliedern CO<sub>2</sub>-Emissionen in vier verschiedene Trends: Das Bevölkerungswachstum ( $P_t$ ), das Pro-Kopf Einkommen ( $Y_t/P_t$ ), die Energieintensität ( $E_t/Y_t$ ) und die Emissionsintensität ( $C_t/E_t$ ). Entsprechend nutzen wir die sogenannte Kaya-Identität:

$$C_t = P_t * \frac{Y_t}{P_t} * \frac{E_t}{Y_t} * \frac{C_t}{E_t} \quad (1)$$

Unser Hauptaugenmerk liegt hierbei darauf das Pro-Kopf Einkommen zu endogenisieren, das heißt ökonomisches Wachstum im Modell zu erklären bzw. als ein Ergebnis des Modells zu betrachten und nicht von vornherein bestimmte Wachstumsraten anzunehmen.

Das ökonomische Modell, welches wir verwenden basiert auf innovationsgetriebenem Wachstum wie erstmals von Romer (1990) beschrieben wurde. Wachstum wird hierbei getrieben von gewinnmaximierenden Unternehmen, welche in die Erfindung neuer Technologien investieren und somit die allgemeine Produktivität der Ökonomie erhöhen. Um Skaleneffekte zu vermeiden (eine Wachstumsrate, die von der Bevölkerungsgröße abhängig ist), kalibrieren wir jedoch die Version von Jones (1995).

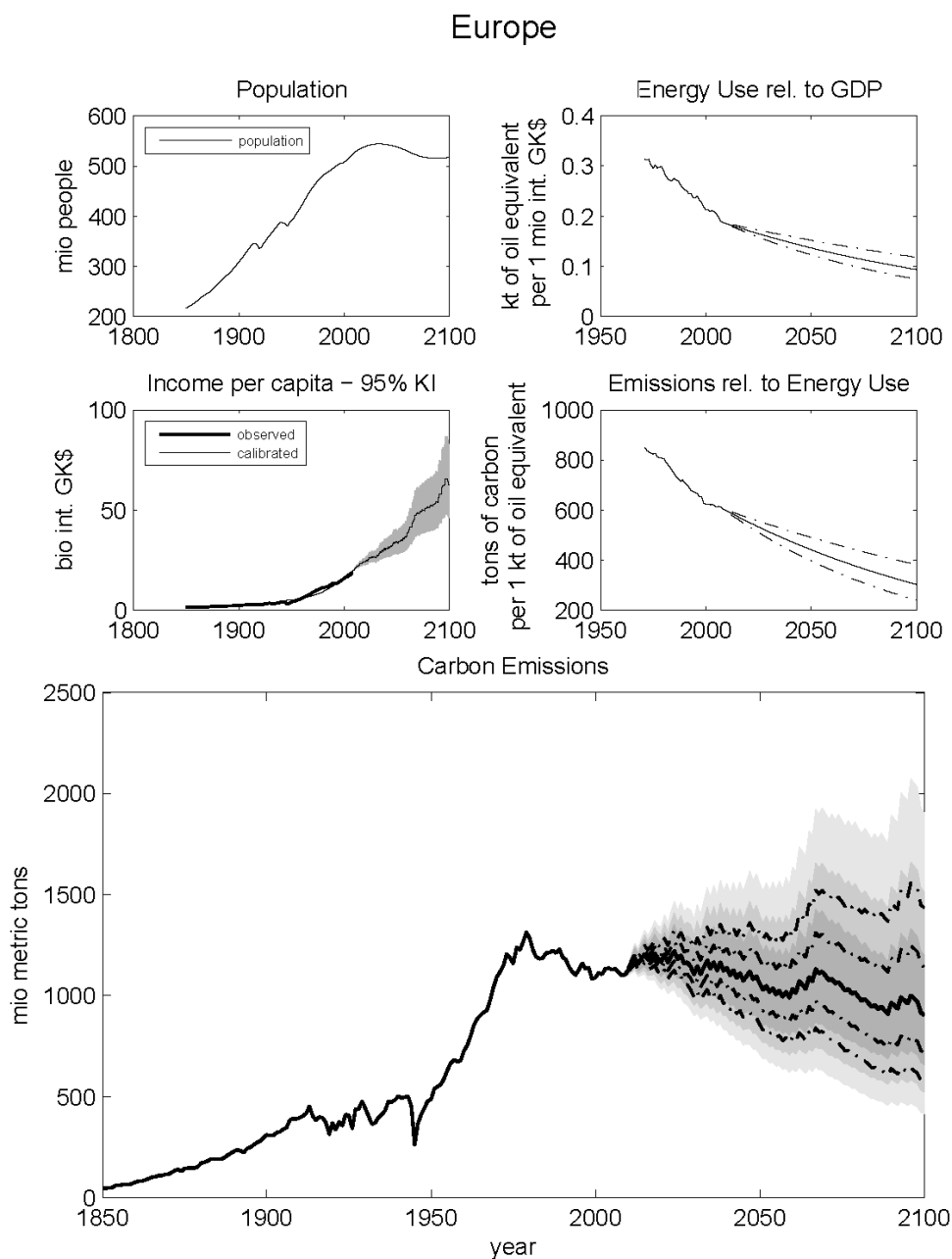
Um das Modell zu kalibrieren, minimieren wir die Summe der quadrierten Fehler der kalibrierten Zeitreihe relativ zur beobachteten. Die Wachstumsrate der Ökonomie ist eine Funktion kalibrierter Parameter. Das heißt, es gibt im Modell keine inhärenten Annahmen über die Stärke des Wirtschaftswachstums.

Die Konfidenzintervalle basieren auf der Annahme, dass alle kalibrierten Parameter einer trunkeierten multivariaten Normalverteilung folgen. Folglich ist es möglich die Hesse-Matrix und die Kovarianz Matrix zu bestimmen, welche die Verteilung der kalibrierten Parameter determiniert. Durch eine Ziehung zufällig generierter Parameterwerte, welche der zuvor berechneten Verteilungsfunktion folgen, ist es demnach möglich das erste und letzte Quantil unserer Projektionen zu bestimmen.

### 2.4.3. Ergebnisse

In Anlehnung an Gleichung (1) erstellen wir in dieser Arbeit CO<sub>2</sub>-Emissions-Szenarien unter Verwendung von UN Bevölkerungsvorhersagen, eigenen Vorhersagen über die Entwicklung des BIP basierend auf einem endogenen Wachstumsmodell, sowie verschiedenen Projektionen von Energie- und Emissionsintensität. Die sich daraus ergebenden Emissionspfade werden in Abbildung 16 für Europa veranschaulicht. Anhand dieser Grafik ist deutlich zu erkennen, dass die Energie- und Emissionsintensitäten jeweils um ca. 0,75% jährlich reduziert werden müssten, um bei gegebenem Einkommen und Bevölkerungswachstum die Emissionen annähernd konstant halten zu können. Für Osteuropa und Russland hingegen wäre eine jährliche Reduktion um 0,25% ausreichend, was in einem deutlich langsameren Wirtschaftswachstum begründet liegt. Die Divergenz der Wachstumsraten in West- und Osteuropa ist ein Ergebnis aus der Verwendung eines endogenen Wachstumsmodells und unüblich in der Szenario Literatur. Zumeist wird zumindest in Europa von konvergierenden Einkommen ausgegangen, was die Last der Emissionsvermeidung nach Osteuropa und Russland schieben würde, unseren Ergebnissen zu Folge allerdings schlichtweg falsch wäre.

Abbildung 16: Kaya Dekomposition der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa



Population (links oben): Bevölkerungsvorhersage der Vereinten Nationen

Income per capita (links Mitte): Beobachtetes und kalibriertes Einkommen. Die grau hinterlegte Fläche repräsentiert das 95% Konfidenzintervall.

Energy Use rel. to GDP (rechts oben): Energieintensität relativ zum BIP. Ab 2008 repräsentiert die durchgezogene Linie einen jährlichen Rückgang um 0,75%, die darüber liegende gestrichelte Linie einen Rückgang von 0,5% und die darunter liegende um 1%.

Emissions rel. to Energy Use (rechts Mitte): Emissionen relative zum Energieverbrauch. Ab 2008 repräsentiert die durchgezogene Linie einen jährlichen Rückgang um 0,75%, die darüber liegende gestrichelte Linie einen Rückgang von 0,5% und die darunter liegende um 1%.

Carbon Emissions (unten): CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ab 2008 repräsentiert die fette Linie die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einem Rückgang der Energie- und Emissionsintensität um jeweils 0,75%. Die dunkelgrau schattierte Fläche repräsentiert das zugehörige 95% Konfidenzintervall. Die gestrichelten Linien von oben nach unten stehen für eine Reduktion der Emissions- und Energieintensität von 0,5%, 0,5% und 0,75%, 0,75% und 1% sowie zuletzt von 1%. Die Konfidenzintervalle wurden entsprechend grau abgestuft.

Die relativ große Bandbreite an Konfidenzintervallen verdeutlichen den nicht unerheblichen Einfluss der Unsicherheit über zukünftige wirtschaftliche Entwicklungen auf unsere Emissionspfade. In Europa schwanken die möglichen Emissionen in 2100 immerhin um über 30% um die Punktprognose. Zudem erhalten wir für einige Länder nicht symmetrische Konfidenzintervalle. In Osteuropa zum Beispiel weisen unsere Konfidenzintervalle darauf hin, dass zukünftige Emissionen die Tendenz haben unterschätzt zu werden, während sie in Russland eher überschätzt werden.

#### 2.4.4. Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit gehen wir einen ersten Schritt in Richtung der Endogenisierung von wirtschaftlichem Wachstum für die Konstruktion von CO<sub>2</sub>-Emissions-Szenarien. Unsere Ergebnisse zeigen die Bedeutung einer endogenen Wachstumsmodellierung in der Szenario-Literatur und potentiell auch für das sog. Integrated Assessment Modelling auf. Wir beweisen, dass die Endogenisierung des Wirtschaftswachstums zu anderen Vorhersagen über das Einkommen führt, als was üblicherweise für die Konstruktion von Emissions-Szenarien angenommen wird. Insbesondere beobachten wir größere jährliche Wachstumsraten in Ländern mit einem größeren derzeitigen Pro-Kopf Einkommen. Folglich müssen diese Länder ihre jährlichen Energie- und Emissionsintensitäten stärker reduzieren, um ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen konstant halten zu können. Während Westeuropäische Länder ihre Energie- und Emissionsintensität um ca. 0,75% pro Jahr senken müssten, würden in Osteuropa und Russland 0,25% pro Jahr reichen. Des Weiteren beobachten wir, dass Vorhersagen auf Länderebene die Genauigkeit unserer Vorhersagen stark erhöhen. Insbesondere wenn Europa als Ganzes kalibriert wird, beobachten wir wesentlich mehr Unsicherheit in Form von größeren Konfidenzintervallen, die mit unseren Emissionsvorhersagen einhergehen, als wenn Vorhersagen auf Länderebene aggregiert werden.

Als Politikimplikationen können wir hieraus ableiten, dass dieselben Emissionsziele in Westeuropa wesentlich gravierendere ökonomische Folgen haben dürften, als in Osteuropa aufgrund des unterschiedlich starken wirtschaftlichen Wachstums. Betrachten wir in Abbildung die vergangene Reduktion der Energieintensität, so wird augenscheinlich, dass eine weitere jährliche Reduktion um 0,75% im Bereich des Möglichen liegen mag, auch ohne drastische Eingriffe seitens der Politik. Nicht zuletzt liegt es auch im Interesse der Industrie, möglichst energieeffizient zu wirtschaften um Kosten zu sparen. Eine weitere Reduktion der Emissionsintensität um jährlich

0,75% hingegen hängt ausschließlich vom Energiemix ab. Eine Substitution fossiler Energiequellen durch erneuerbare Energien um immerhin über 60% bis in das Jahr 2100 wird nur durch eine entsprechende Steuerung seitens der Politik möglich sein.

#### 2.4.5. Literatur

- Boden, T. A., Andres, R. J. und Marland, G. (2013): Global, Regional and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Bosetti, V., Massetti, E. und Tavoni, M. (2007): The WITCH Model. Structure, Baseline, Solutions. Nota di Lavoro.
- Bovenberg, A., Lans und Smulders, S. (1995): Environmental quality and pollutionaugmenting technological change in a two-sector endogenous growth model. *Journal of Public Economics*, 57, 369-391.
- Gerlagh, Reyer und van der Zwaan, B. (2003): Gross world product and consumption in a global warming model with endogenous technological change. *Resource and Energy Economics*, 25, 35-57.
- Jones, C. I. (1995): R&D-Based Models of Economic Growth. *Journal of Political Economy*, 103 No. 4, 759-784.
- Maddison, A. (2010): Historical Statistics. (URL: <http://www.ggd.net/MADDISON/oriindex.htm>)
- Nakicenovic et al. (2000): Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Popp, D. (2004): ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48 No. 1, 742-768.
- Romer, P. M. (1990): Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98 No. 5, 71-102.
- Smulders, S. (1995): Entropy, Environment, and Endogenous Economic Growth. *International Tax and Public Finance*, 2, 319-340.

## 2.5. Die Kalibrierung und Integration eines endogenen Wachstumsmodells in DICE

Spätestens seit den 90er Jahren hat die Bedeutung der Umwelt und Klimapolitik weltweit stark zugenommen. Es geht zum Beispiel um Emissionsobergrenzen, den Emissionshandel oder auch die Frage nach einem maximal tolerierbaren Temperaturanstieg der Atmosphäre. Der gemeinsame Nenner all dieser Themenkomplexe sollte die Frage sein, wie groß der Nutzen aus der Vermeidung von Treibhausgasemissionen ist und welchen Kosten er gegenüber gestellt werden muss (soweit diese quantifizierbar sind). Eben dieser Frage nähern sich sogenannte Integrierte Assessment Modelle, wie zum Beispiel das DICE Modell (Nordhaus 1992), an. Modelle dieser Art kombinieren sozio-ökonomische Faktoren wie das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum mit einem Klimamodell, welches die Treibhausgasemissionen mit den zu erwartenden Umweltschäden verknüpft. Ein wichtiges Merkmal von Integrierten Assessment Modellen ist, dass sie die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen der sozio-ökonomischen und der Klimakomponente in beiden Richtungen erfassen. Vereinfacht gesagt bilden sie sowohl wirtschaftliche Einflüsse auf das Klima ab, als auch Klimaschäden und ihre Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum. Die Klimakomponente in DICE ist stark reduziert. Sie umfasst Kohlenstoffemissionen und die damit einher gehende Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre und den Oberflächen und Tiefen der Ozeane. Daraus wird der zu erwartende Temperaturanstieg der Atmosphäre sowie Umwelt- und Wirtschaftsschäden abgeleitet. Die sozio-ökonomische Komponente basiert auf einem Ramsey Modell mit exogenem Wirtschaftswachstum. Das heißt, der Wachstumspfad der Volkswirtschaft wurde durch den Autor vorherbestimmt. Als Ergebnis lassen sich aus DICE ein optimaler Vermeidungspfad von CO<sub>2</sub> Emissionen bestimmen, die damit verbundenen Kosten für die Vermeidung von Emissionen und die Kosten verursacht durch Klimaschäden. Das Modell betrachtet vereinfachend die gesamte Welt als eine Region, es startet in 2010 und könnte theoretisch in 5-Jahresschritten alle Variablen bis ins unendliche projizieren.

Nun stellt sich die Frage, inwieweit die Ergebnisse aus DICE durch diesen exogenen Wachstumspfad getrieben werden. Um diese Frage stichhaltig beantworten zu können, gehen wir in drei Schritten vor. Zuerst vergleichen wir, wie sich ein endogener Wachstumspfad im Gegensatz zu einem exogenen Wachstumspfad auf die Modeller-

gebnisse in DICE auswirkt. Um diesen Vergleich sinnvoll führen zu können werden die Wachstumsraten beider Pfade zuvor isoliert von der Klimakomponente aneinander angepasst. Dieser Vergleich ist vor allem deshalb interessant, da Umweltschäden nicht nur die absolute Höhe des Einkommens der Haushalte beeinflussen, sondern auch seine Wachstumsrate. Dies findet in exogenen Wachstumsmodellen keine Beachtung. In endogenen Wachstumsmodellen resultiert das Wirtschaftswachstum aus einer endogenen Entscheidung der Haushalte, in Forschung und Entwicklung zu investieren. Klimaschäden vermindern die Rendite aus solchen Investitionen, wodurch der Motor der Wirtschaft, nämlich der technologische Fortschritt, geschwächt wird. In der Realität lassen sich hier viele Parallelen finden. Zum Beispiel würde man nicht in die agrarwirtschaftliche Nutzung von Gebieten investieren, die regelmäßig einem hohen Überflutungsrisiko ausgesetzt sind.

Zweitens kalibrieren wir das endogene Wachstumsmodell auf beobachtete Daten aus der Vergangenheit und integrieren es in DICE. In einem dritten Schritt nutzen wir die während der Kalibrierung des Wachstumsmodells gewonnenen Konfidenzintervalle einiger Parameterwerte, um zukünftige Klimaschäden und deren Ausmaß an Unsicherheit resultierend aus der Unsicherheit über das zukünftige Wirtschaftswachstum abzuleiten.

### 2.5.1. Daten

DICE baut auf einer sehr umfassenden Basis von kalibrierten Parameterwerten und Projektionen von Zeitreihen bis in das Jahr 2300 auf (siehe Nordhaus und Sztorc 2013). Abgesehen von den das Wirtschaftswachstum determinierenden Parametern, wurden diese Werte für dieses Projekt ohne Änderungen übernommen. Um die Vergleichbarkeit der Modelle zu wahren, trifft dies auch auf das Bevölkerungswachstum zu. Ergänzt wurde der Datensatz lediglich um einzelne Zeitreihen aus den Penn World Tabellen Version 8.1 (Feenstra, Inklaar und Timmer 2015), die zur Kalibrierung des Wachstumsmodells notwendig waren. Die Daten sind auf Länderebene verfügbar und umfassen die Jahre 1950 bis 2011. Für unsere Zwecke wurden jeweils die Zeitreihen über das BIP, den Konsum und den Kapitalstock zu einer einzigen Zeitreihe aggregiert. Das weltweite Bevölkerungswachstum aus den Jahren 1950 bis 2008 wurde aus dem Maddison Project (The Maddison Project 2013) entnommen.



### 2.5.2. Methoden

Bei der Wahl des endogenen Wachstumsmodells sind vor allem zwei Kriterien von besonderer Bedeutung. Da das Modell auf tatsächlich beobachtete Zeitreihen über das BIP, den Konsum, den Kapitalstock und die Bevölkerungsgröße kalibriert werden soll, dürfen die dem Modell inhärenten Eigenschaften nicht konträr zur Datenbasis stehen. Diese Bemerkung mag trivial klingen, ist sie in Bezug auf die theoretische Wachstumsliteratur allerdings leider nicht. Das Modell sollte erstens keine Skalenerträge aufweisen. Das heißt, die Wachstumsrate sollte nicht von der Größe einer Ökonomie abhängen. Und zweitens sollte ein positives Wirtschaftswachstum auch dann möglich sein, wenn das Bevölkerungswachstum auf null zurückgeht, denn genau das darf erwartet werden, wenn man den Bevölkerungsprognosen der Vereinten Nationen (UN Population Division 2015) Glauben schenkt. Diese zwei Kriterien schmälern die Auswahl an möglichen Modellen beträchtlich. Letzten Endes haben wir uns für das Wachstumsmodell von Aghion und Howitt (1997) entschieden. Es ist eine Modellvariante eines endogenen Wachstumsmodells in der Tradition von Schumpeter, in der Wachstum durch den Prozess der kreativen Zerstörung induziert wird. Genauer gesagt wird Wirtschaftswachstum durch einen fortlaufenden Strom von Innovationen hervorgerufen, die einzelne Produktvarianten verbessern und alte Varianten somit ablösen. Speziell ermöglicht dieses Modell sowohl horizontale, als auch vertikale Innovationen. Wirtschaftswachstum wird getrieben durch vertikale Produktinnovationen. Die Größe der Wirtschaft hat einen positiven Einfluss auf horizontale Innovationen, also das Entstehen neuer Produktvarianten, wodurch Skalenerträge vermieden werden, da sich nun Innovatoren auf immer mehr Projekte aufteilen müssen.

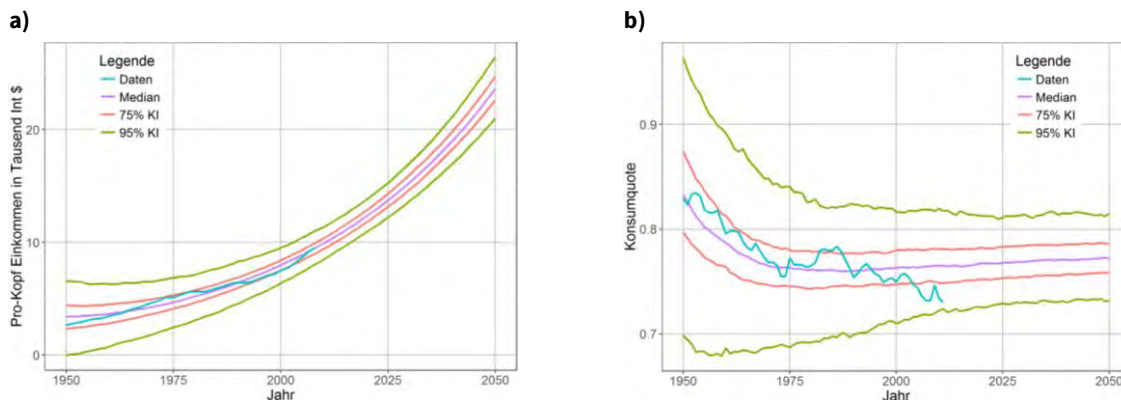
Zur Kalibrierung des Modells verwenden wir einen noch in den Kinderschuhen steckenden Bayesianischen Ansatz. Dieses Vorgehen ermöglicht es uns, nicht nur das Trendwachstum der zu kalibrierenden Zeitreihen abzubilden, sondern auch die statistischen Schwankungen um den Trend durch einen Autoregressiven Prozess zu erfassen. Durch dieses Vorgehen können wir die Verteilung der zu kalibrierenden Parameter schätzen und ein repräsentatives Sample aus Parameterwertkombinationen ziehen. Diese werden dann in einer Monte-Carlo Analyse in DICE dazu verwendet die Auswirkungen der einzelnen Wachstumspfade in Zusammenhang mit ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeit auf die Klimaveränderungen zu analysieren.

### 2.5.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse unserer Arbeit sind vielfältiger Natur. Im ersten Teil befassen wir uns mit dem theoretischen Vergleich eines endogenen und eines exogenen Wachstumsmodells in DICE. Hier wird deutlich, dass der zusätzliche Wirkungskanal der Klimaschäden auf das endogene Wirtschaftswachstum erhebliche Auswirkungen hat. Das heißt, im endogenen Wachstumsmodell kommt es zu weniger Wachstum und daher wird auch weniger emittiert und es kommt zu geringeren Umweltschäden. Die Überschätzung der zu erwartenden Klimaschäden im originalen DICE Modell beruht darauf, dass hier nur die Leveleffekte auf das Einkommen berücksichtigt werden und keine negativen Wachstumseffekte. So projiziert das originale DICE Modell zum Beispiel einen Temperaturanstieg von bis zu 3,4 °C, während wir anhand des endogenen Wachstumsmodells nur einen Anstieg von bis zu 2,9 °C erzielen.

Die Ergebnisse aus der Kalibrierung des endogenen Wachstumsmodells nach Aghion und Howitt (1997) sind hingegen eher angewandter Natur. Mit der Kalibrierung selbst wurde ein neuer Bayesianischen Ansatz erprobt, der einige methodische Einsichten über die Kalibrierung von Wachstumsmodellen im Allgemeinen ermöglicht hat. So konnten im Laufe der Analyse zum Beispiel verschiedene Verteilungsstrukturen der statistischen Schwankungen um das Trendwachstum unserer Zeitreihen miteinander verglichen werden. Abbildung 17 ist eine grafische Darstellung der kalibrierten Zeitreihe über das BIP und die Konsumquote mit jeweils zwei verschiedenen großen Konfidenzintervallen. Daraus geht hervor, dass wir im Mittel erwarten können, dass sich das Pro-Kopf Einkommen weltweit in den kommenden 40 Jahren verdoppeln wird. Diese Vorhersage ist äußerst optimistisch, da sie das verhältnismäßig hohe Wachstum seit den 1950er Jahren auffängt und exponentiell in die Zukunft projiziert. Allerdings ist es gerade Ziel und Inhalt dieser Arbeit, ein endogenes Wachstumsmodell so zu kalibrieren, dass nur die Funktionsweise des Wachstumsmodells an sich und in der Vergangenheit beobachtete Daten die Kalibrierung bestimmen. Es wurden keine das Wachstum treibende Annahmen von den Autoren gemacht, wie das sonst so oft üblich ist. Zudem sind diese Projektionen unter einer ceteris paribus Annahme zu verstehen (d.h. ohne Klimaschäden), die wir später, wenn wir das Modell in DICE integrieren, relativieren werden. Die Konsumquote wird laut unserer Kalibrierung in den nächsten Jahren bei einem Wert knapp unter 80% stagnieren.

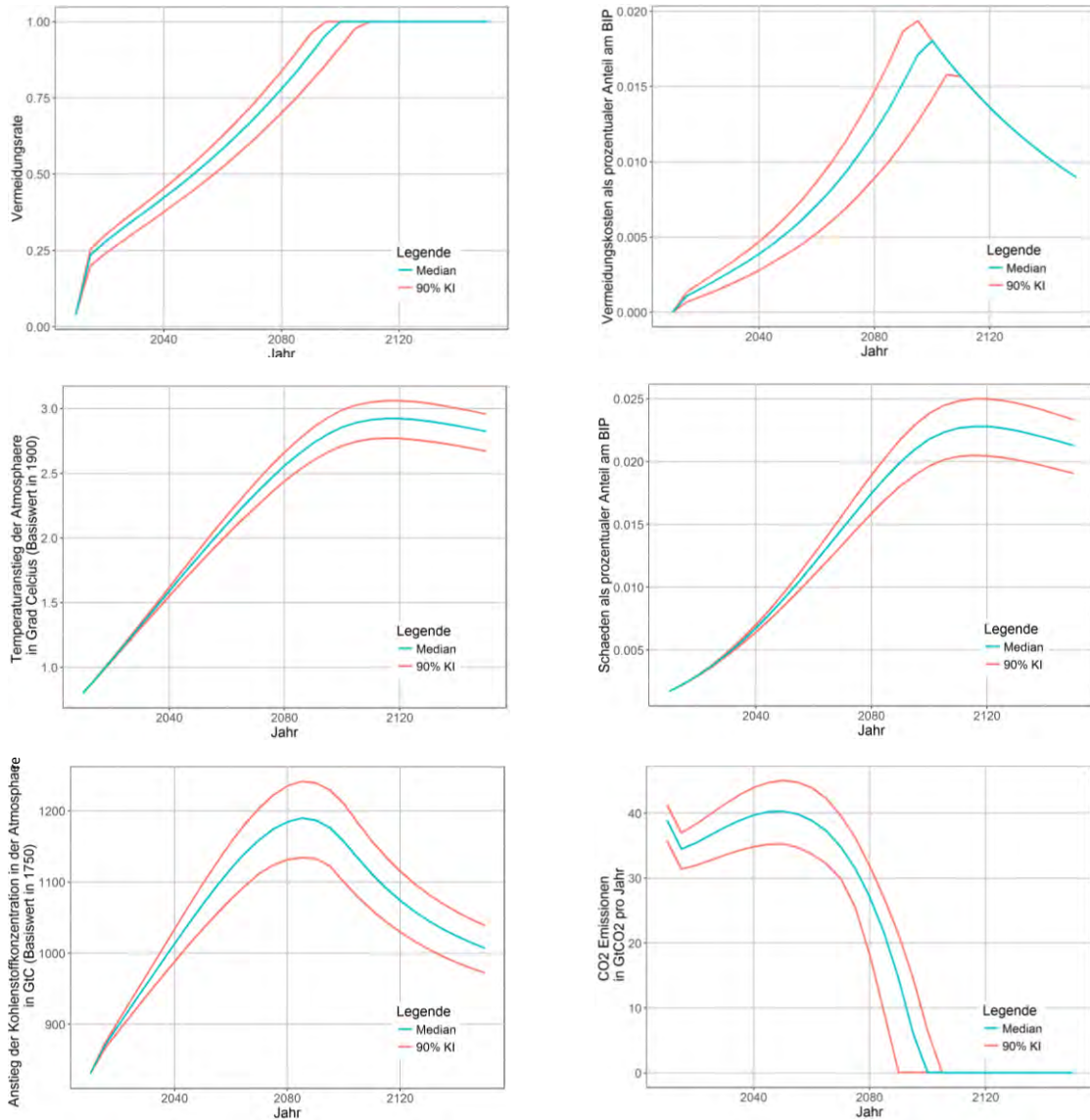
Abbildung 17: Das beobachtete Pro-Kopf Einkommen in Tausend Int \$



(a) bzw. die Konsumquote (b) zwischen 1950 und 2008 und die zugehörigen Kalibrierten Zeitreihen (Median, 75% Konfidenzintervall und 95% Konfidenzintervall) projiziert bis ins Jahr 2050.

Die Ergebnisse der Monte-Carlo Analyse in DICE mit einem endogenen Wachstumsmodell in Abbildung 18 sprechen für sich. Die optimale Vermeidungsrate der CO<sub>2</sub> Emissionen steigt bis zur Jahrhundertwende auf 100% an. Bis dahin werden die durch den Klimawandel verursachten Schäden im Mittel auf über 2% des BIP steigen und die Kosten der Emissionsvermeidung auf knapp unter 2%. Die jeweiligen Konfidenzintervalle, die die Unsicherheit über das zukünftig zu erwartende Wirtschaftswachstum widerspiegeln, fächern sich jeweils um ca. 0,5% auf.

Abbildung 18: Die Pfade einiger Klimavariablen in DICE nach Integration eines neu kalibrierten und endogenen Wachstumsmodells von 2010 bis 2150 mit dem jeweils zugehörigen 90% Konfidenzintervall.



Der durch den Menschen verursachte Anstieg der Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten wird bis zur Jahrhundertwende im Mittel um knapp 50% steigen, der optimale Pfad von CO<sub>2</sub> Emissionen wird in Einklang mit der Vermeidungsrate auf null absinken und der resultierende Temperaturanstieg der Atmosphäre beträgt um die Jahrhundertwende entsprechend im Mittel 2,9 °C.

Selbstverständlich sind derartige Prognosen mit Vorsicht zu genießen, da sie von zu vielen Unbekannten abhängen, bei denen wir nicht nur in Bezug auf ihren Erwartungswert im Dunkeln tappen, sondern auch in Bezug auf ihre Varianz. Allerdings ist genau hierin die Errungenschaft unserer Arbeit zu sehen. Wir nutzen erstmals statistische Schwankungen um das Trendwachstum des BIP als einen neben vielen anderen Einflussfaktoren um die Unsicherheit über das zukünftige Wirtschaftswachstum in eine Unsicherheit über den optimalen Vermeidungspfad, resultierende Klimaschäden und den Temperaturanstieg der Atmosphäre übersetzten zu können.

#### 2.5.4. Schlussfolgerungen

Aus dieser Arbeit lassen sich sowohl theoretische als auch methodische bzw. empirische Ergebnisse ableiten. Zum einen konnten wir zeigen, dass die Integration eines neu kalibrierten, endogenen Wachstumsmodells in DICE erhebliche Auswirkungen auf dessen Projektionen über die einzelnen Klimavariablen hat. Im Mittel scheint der exogene Wachstumspfad des originalen Modells die Klimaerwärmung und daraus resultierende Schäden deutlich zu überschätzen. Dies macht zum Beispiel in Bezug auf den Temperaturanstieg immerhin eine Differenz von 0,5 °C aus. Zum anderen konnten wir durch einen neuen Ansatz der Bayesianischen Datenanalyse Verteilungsfunktionen über einzelne das Wirtschaftswachstum determinierende Parameterwerte gewinnen. Neben dieser methodischen Errungenschaft, konnten wir dadurch ebenfalls zeigen wie stark die einzelnen Klimavariablen in der Zukunft von der Unsicherheit über das zu erwartende Wirtschaftswachstum beeinflusst werden. So errechnen wir zum Beispiel, dass der Temperaturanstieg der Atmosphäre um die Jahrhundertwende mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% zwischen 2,75 °C und 3,05 °C liegen wird. Das heißt, schon allein die Unsicherheit über das zukünftige Wirtschaftswachstum resultiert in einem 90% Konfidenzintervall von 0,3 °C. Entsprechend sollte die tatsächliche Unsicherheit unter Einbezug weiterer Einflussfaktoren erheblich größer sein.

### 2.5.5. Literatur

Aghion, P. und Howitt, P. (1992), Endogenous Growth Theory, MIT Press, Kapitel 12.2.

Feenstra, R. C., Inklaar, R. und M. P. Timmer (2015), "The Next Generation of the Penn World Table" American Economic Review, 105(10), 3150-3182, [www.ggd.net/pwt](http://www.ggd.net/pwt)

Maddison-Project, <http://www.ggd.net/maddison/maddison-project/home.htm>, Version 2013.

Nordhaus, W.D. (1992), "Rolling the 'DICE': an optimal transitioning path for controlling greenhouse gases" Resource and Energy Economics, 15(1), 27-50.

Nordhaus, W.D. und Sztorc, P. (2013), "DICE 2013R: Introduction and User's Manual, <http://aida.wss.yale.edu/~nordhaus/homepage/>

UN Population Division, <https://esa.un.org/unpd/wpp/>, Version 2015.

## 2.6. Carbon Leakage durch unilaterale Klimapolitiken

Eine zentrale Frage für das Design internationaler Klimaabkommen ist die nach der Effektivität von Emissionseinsparungen. Eine strengere Klimapolitik in einem Teil der Welt kann zu Verschiebungen der komparativen Vorteile führen und damit zur Verlagerung der Herstellung besonders CO<sub>2</sub>-intensiver Güter in Länder mit laxer Klimapolitik (vgl. z.B. Copeland und Taylor 2005). Emissionseinsparungen im restriktierten Land führen dann zu mehr Emissionen in anderen Ländern (»Carbon Leakage«). Somit ist die Klimawirksamkeit unilateraler Klimapolitik theoretisch unklar. Empirisch zeigen Aichele und Felbermayr (2012), dass durch die Ratifikation des Kyoto-Protokolls die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Kyoto-Ländern zwar sinken. Allerdings steigen die Carbon Footprints an, also die Emissionen, die durch Konsum und Investitionen irgendwo auf der Welt entstehen. Ein klares Anzeichen für Leakage. Zudem kann empirisch nachgewiesen werden, dass sowohl Handelsströme als auch der CO<sub>2</sub>-Gehalt von Handel aus nicht betroffenen Ländern durch eine Verschärfung der Klimapolitik zunimmt (Aldy und Pizer, 2015; Aichele und Felbermayr, 2015). Eine Aussage über das Ausmaß von Carbon Leakage ist mit solchen empirischen Arbeiten jedoch nicht möglich. Einige Studien verwenden daher computergestützte allgemeine Gleichgewichtsmodelle, um ex ante die Auswirkungen von Klimapolitikszenerarien zu simulieren (vgl. z.B. Elliott et al. 2010; Babiker 2005). Typischerweise bewegt sich das prognostizierte Leakage zwischen 4 und 20% der eingesparten Emissionen, teils werden allerdings Werte über 100% ermittelt. Das vorhergesagte Ausmaß von Carbon Leakage schwankt je nach Modellannahmen und Wahl der Modellparameter. Insbesondere die Modellparameter werden aus verschiedenen Studien zusammengetragen und sind nicht modell-konsistent mit Hilfe empirischer Außenhandelsdaten geschätzt.

### 2.6.1. Methoden

Daher wurde ein anderer Modellansatz gewählt, der Modellsimulationen eines allgemeinen Handelsgleichgewichtsmodells mit empirischen Schätzungen konsistent verknüpft um das Ausmaß von Carbon Leakage zu quantifizieren. Hierzu werden Handelsdaten benötigt, um zu ermitteln wie stark Handelsströme auf Preisänderungen reagieren. Diese Preisänderungen können z.B. durch Verteuerung von CO<sub>2</sub> in einzelnen Ländern ausgelöst werden.

Nach Ermittlung der Modellparameter erfolgt die Abschätzung von Leakage mit Hilfe einiger Szenarien, die an aktuelle Klimapolitik angelehnt sind. Die entscheidende politische Stellschraube ist dabei der Preis für CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Im ersten Szenario wird gefragt, wie viel teurer der CO<sub>2</sub>-Zertifikate-Preise der EU sein müsste, damit die EU (ausgehend vom Basisjahr 2007) ihre CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsverpflichtungen aus dem Kyoto-Protokoll erfüllen würde. Anschließend wird ermittelt, wie viel Verlagerung von Emissionen ins Nicht-EU Ausland stattfindet. Somit kann ermittelt werden, wie viel Prozent der Emissionseinsparungen ins Ausland verlagert werden. Ein weiteres Szenario orientiert sich in gleicher Weise an den Emissionsreduktionszielen, die für ein im Jahr 2012 diskutiertes Kyoto Nachfolgeprotokoll (Kyoto-II) versprochen wurden, um eine Abschätzung von Leakage für dieses PolitikszENARIO zu generieren.

### 2.6.2. Daten

Unsere Daten (Datenquellen u.a. Global Trade Analysis Project 8 und United Nations Comtrade Database) umfassen über 100 Länder für das Basisjahr 2007, d.h. knapp 10 000 bilaterale Handelsbeziehungen. Im Schnitt werden Waren im Wert von etwas mehr als 1 Mrd. USD zwischen den Länderpaaren gehandelt. Dabei ist eine durchschnittliche Distanz von etwa 7 000 km zu überbrücken. Die Länder unterscheiden sich stark hinsichtlich wichtiger wirtschaftlicher Kennzahlen wie Bruttoinlandsprodukt aber auch bezüglich Emissionen sowie Technologie. So schätzen wir eine durchschnittliche Gesamtfaktorproduktivität von 0,38; das bedeutet, dass das durchschnittliche Land nur etwa 40% der Produktivität des Referenzlandes USA erreicht. Die Werte gehen von 0,02 in Äthiopien bis 2,18 für Luxemburg. Die Kostenanteile von Brennstoffen belaufen sich im Schnitt auf etwa 12%, somit ist Energie kein zu vernachlässigender Produktionsfaktor. Durch flexible Annahmen über die Produktionsstruktur kann diesen länderspezifischen Differenzen im Modellrahmen Rechnung getragen werden.



Tabelle 2: Überblickstabelle Datenlage

|   | Schnitt | Std.-<br>Abw. | Min  | Max     |
|---|---------|---------------|------|---------|
| <b>Länderpaarspezifische Variablen</b>                      |         |               |      |         |
| Exporte, Mio USD  | 1.232   | 7.897         | 0    | 310.480 |
| Distanz, km   | 7.237   | 4.483         | 60   | 19.812  |
| Gemeinsame Grenze   | 0,03    | 0,17          | 0    | 1       |
| Gemeinsame Sprache  | 0,13    | 0,33          | 0    | 1       |
| Freihandelsabkommen   | 0,28    | 0,45          | 0    | 1       |
| <b>Länderspezifische Variablen</b>                          |         |               |      |         |
| BIP, Mrd. USD   | 522     | 1.556         | 4    | 14.062  |
| Emissionen, Mt CO <sub>2</sub>                              | 192     | 630           | 1    | 4.886   |
| Erwerbsbevölkerung, Tsd                                     | 27.086  | 88.607        | 172  | 771.079 |
| Physisches Kapital, Mrd. USD                                | 1.602   | 4.360         | 18   | 33.245  |
| Landgebiet, Tsd km <sup>2</sup>                             | 999     | 2.434         | 0    | 16.378  |
| Impliziter CO <sub>2</sub> Preis, USD pro t CO <sub>2</sub> | 322     | 177           | 62   | 1.010   |
| Implizite CO <sub>2</sub> Steuer, USD pro t CO <sub>2</sub> | 37      | 45            | -19  | 179     |
| <b>Technologische Parameter</b>                             |         |               |      |         |
| Gesamtfaktorproduktivität                                   | 0,38    | 0,36          | 0,02 | 2,18    |
| CO <sub>2</sub> -Intensität                                 | 0,12    | 0,07          | 0,02 | 0,47    |
| Kostenanteil Arbeit   | 0,44    | 0,12          | 0,15 | 1,21    |
| Kostenanteil Kapital  | 0,42    | 0,1           | 0,2  | 0,88    |
| Kostenanteil Land   | 0,02    | 0,02          | 0    | 0,09    |

Quelle: Aichele (2013).

Besonders wichtig in diesem Zusammenhang ist auch, dass die Variation der impliziten Preise für den Ausstoß einer Tonne (t) CO<sub>2</sub> groß ist. Der Durchschnittspreis beträgt 322 USD mit einer Standardabweichung von 177 USD. Mit unter 100 USD finden sich die kleinsten impliziten CO<sub>2</sub>-Preise in der Mongolei, Südafrika und Kasachstan, gefolgt von China mit 102 USD pro t CO<sub>2</sub>. Am anderen Ende des Spektrums stehen Länder wie die Niederlande, Schweden und Singapur, mit impliziten CO<sub>2</sub>-Preisen von über 800 USD. Der Entwicklungsstand einer Volkswirtschaft, das Vorkommen von natürlichen Ressourcen wie Kohle, Öl und Gas, sowie der Energiemix beeinflussen diese Preise, aber auch die Klimapolitik. So finden sich die höchsten CO<sub>2</sub>-Steuern in den Niederlanden und Schweden (mit 179 und 171 USD p t). Andere, insbesondere ölexportierende Länder wie Bahrain, Katar, die Vereinigte Arabische Emirate oder Saudi Arabien, subventionieren den CO<sub>2</sub>-Verbrauch hingegen.

### 2.6.3. Ergebnisse

Ausgehend von diesen beobachteten CO<sub>2</sub>-Preisen soll nun simuliert werden, was eine Verschärfung der Klimapolitik für das Welthandelsgefüge und folglich für die Emissionen weltweit bedeutet. Das Modell sagt voraus, dass eine Erhöhung des EU-Zertifikatepreises für CO<sub>2</sub>-Emissionen von 15 USD die EU ausgehend vom Basisjahr 2007 auf das Kyoto-Ziel gebracht hätte (in Szenario 1). In Reaktion auf diesen erhöhten Preis für CO<sub>2</sub>-Ausstoß würden EU-Länder ihre Emissionen im Schnitt um etwa 5% reduzieren, vgl. Tabelle 3. Dabei sind die länderspezifischen Reaktionen unterschiedlich. So sinken die Emissionen in den Mittel- und Osteuropäischen Ländern vergleichsweise stark ab, da hier Emissionseinsparungen auf Grund des niedrigen Ausgangspreises von CO<sub>2</sub> verhältnismäßig günstig sind. In Deutschland prognostiziert das Modell einen Emissionsrückgang von knapp 3,5%. In den Niederlanden und in Schweden sinken die Emissionen um nur knapp 2%, da hier Emissionseinsparungen wegen des hohen Ausgangspreises für CO<sub>2</sub> teuer sind.

Dieser Rückgang der Emissionen in den EU-Ländern lässt sich weiter zerlegen in einen Technikeffekt und einen Skaleneffekt. Der Technikeffekt zeigt den Teil des Emissionsrückgangs, der durch eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Intensität in der Produktion hervorgerufen wird. Der Skaleneffekt beschreibt den Teil, der durch die Reduktion der Produktionsaktivität zustande kommt. Ein Blick auf Tabelle 3 zeigt, dass sich der Rückgang der Emissionen in den EU-Ländern insbesondere auf eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Intensität der Produktion zurückführen lässt und nur zu einem geringen Teil auf Rückgänge in der Produktion.

Zudem steigen die Importe aus nicht-EU-Ländern an, im EU-Durchschnitt um etwa 0,1 Prozentpunkte. Dies bedeutet, dass der Anteil der CO<sub>2</sub>-Importe aus nicht-EU-Ländern, die mit Güterimporten zusammenhängen, gemessen am Gesamtemissionsausstoß deutlich ansteigt (vgl. Tabelle 3). Im EU-Schnitt um etwa 5 Prozentpunkte. Genauere Betrachtung der Handelsströme zeigt, dass v.a. Importe aus Ländern in der Nähe der EU ansteigen.

Neben einem Rückgang der Emissionen in EU-Ländern, sagt das Modell weiter voraus, dass die Emissionen in Nicht-EU Staaten ansteigen. Dies ist in Abbildung 19 veranschaulicht. Die Zuwachsraten liegen im Bereich von nicht ganz 0,1%. Rechnet man nun die Emissionseinsparungen in der EU mit dem Emissionsanstieg in nicht-EU Staaten auf, so zeigt sich, dass ca. 10% der Emissionen verlagert werden. D.h. etwa

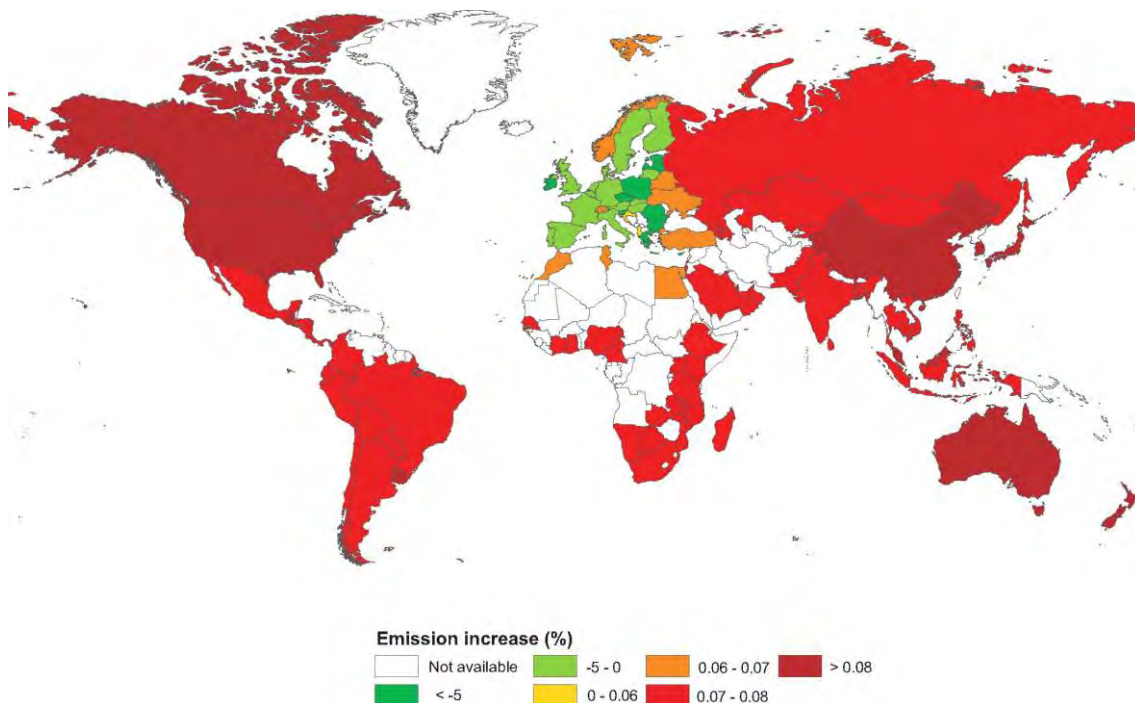
10% der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in der EU eingespart werden, werden als Reaktion – durch die Möglichkeit Handel zu treiben und Produktion ins Ausland zu verlagern – anderswo in der Welt emittiert. Unsere Ergebnisse zeigen somit Leakage von mittel-mäßigem Umfang auf. Auch das Kyoto-II Szenario liefert eine vergleichbare Carbon Leakage Rate von ca. 8%.

**Tabelle 3: Überblick über die Emissions-, Handels- und Einkommenseffekte in Szenario 1 für ausgewählte EU-Länder**

|                 | Veränderung der Emissionen |               |              | Veränderung der nicht-EU Handelsanteile |                                | Reales Einkommenswachstum |
|-----------------|----------------------------|---------------|--------------|---|--------------------------------|---------------------------|
|                 | Gesamt                     | Technikeffekt | Skaleneffekt | Güterimport per BIP                     | Emissionsimport per Emissionen |                           |
|                 | (in %)                     | (in %)        | (in %)       | (in %Punkten)                           | (in %Punkten)                  |                           |
| Estland         | -12,08                     | -10,87        | -1,28        | 0,04                                    | 12,43                          | -1,06                     |
| Polen           | -8,52                      | -7,69         | -0,87        | 0,22                                    | 8,55                           | -0,86                     |
| Tschechien      | -8,32                      | -7,49         | -0,86        | 0,27                                    | 8,41                           | -0,90                     |
| Slowenien       | -8,2                       | -7,81         | -0,41        | 0,16                                    | 9,06                           | -0,42                     |
| Bulgarien       | -7,79                      | -6,07         | -1,78        | 0,17                                    | 6,88                           | -1,57                     |
| Lettland        | -6,84                      | -6,38         | -0,47        | -0,01                                   | 7,02                           | -0,31                     |
| Zypern          | -6,41                      | -5,52         | -0,91        | 0,33                                    | 5,85                           | -1,02                     |
| Malta           | -6,13                      | -5,34         | -0,81        | 0,09                                    | 5,91                           | -0,69                     |
| Rumänien        | -5,68                      | -5,14         | -0,55        | 0,29                                    | 5,68                           | -0,67                     |
| Irland          | -5,58                      | -5,35         | -0,23        | -0,01                                   | 5,88                           | -0,11                     |
| Griechenland    | -5,32                      | -4,29         | -1,05        | 0,13                                    | 5,1                            | -0,9                      |
| Luxemburg       | -4,93                      | -4,62         | -0,32        | 0,08                                    | 5,29                           | -0,26                     |
| Dänemark        | -4,64                      | -4,34         | -0,3         | 0,03                                    | 4,74                           | -0,2                      |
| Spanien         | -4,1                       | -3,79         | -0,32        | 0,18                                    | 4,19                           | -0,36                     |
| Ungarn          | -3,69                      | -3,23         | -0,47        | -0,04                                   | 3,59                           | -0,26                     |
| Portugal        | -3,59                      | -3,24         | -0,36        | 0,1                                     | 3,53                           | -0,31                     |
| Slowakei        | -3,56                      | -3,07         | -0,5         | 0,19                                    | 3,29                           | -0,51                     |
| Deutschland     | -3,48                      | -3,22         | -0,25        | 0,1                                     | 3,52                           | -0,23                     |
| Finnland        | -3,35                      | -2,99         | -0,37        | 0,09                                    | 3,27                           | -0,32                     |
| Großbritannien  | -3,24                      | -3,04         | -0,2         | 0,07                                    | 3,38                           | -0,17                     |
| Italien         | -3,24                      | -2,99         | -0,25        | -0,06                                   | 3,26                           | -0,07                     |
| Frankreich      | -2,77                      | -2,6          | -0,18        | 0,27                                    | 2,9                            | -0,34                     |
| Österreich      | -2,75                      | -2,58         | -0,17        | 0,21                                    | 2,7                            | -0,26                     |
| Litauen         | -2,74                      | -2,3          | -0,44        | 0,13                                    | 2,55                           | -0,41                     |
| Belgien         | -2,32                      | -2,02         | -0,3         | 0,04                                    | 2,22                           | -0,21                     |
| Niederlande     | -1,96                      | -1,74         | -0,21        | 0,16                                    | 1,54                           | -0,26                     |
| Schweden        | -1,91                      | -1,78         | -0,13        | 0                                       | 1,81                           | -0,04                     |
| EU Durchschnitt | -4,93                      | -4,43         | -0,52        | 0,12                                    | 4,91                           | -0,47                     |

Quelle: Aichele (2013). Erklärungen: Technikeffekt bezeichnet den Teil des Emissionsrückgangs, der von einer Verringerung des Emissionsausstoßes pro produzierter Gütereinheit herrührt. Skaleneffekt bezeichnet den Teil des Emissionsrückgangs, der auf eine Reduktion der Produktion zurückzuführen ist.

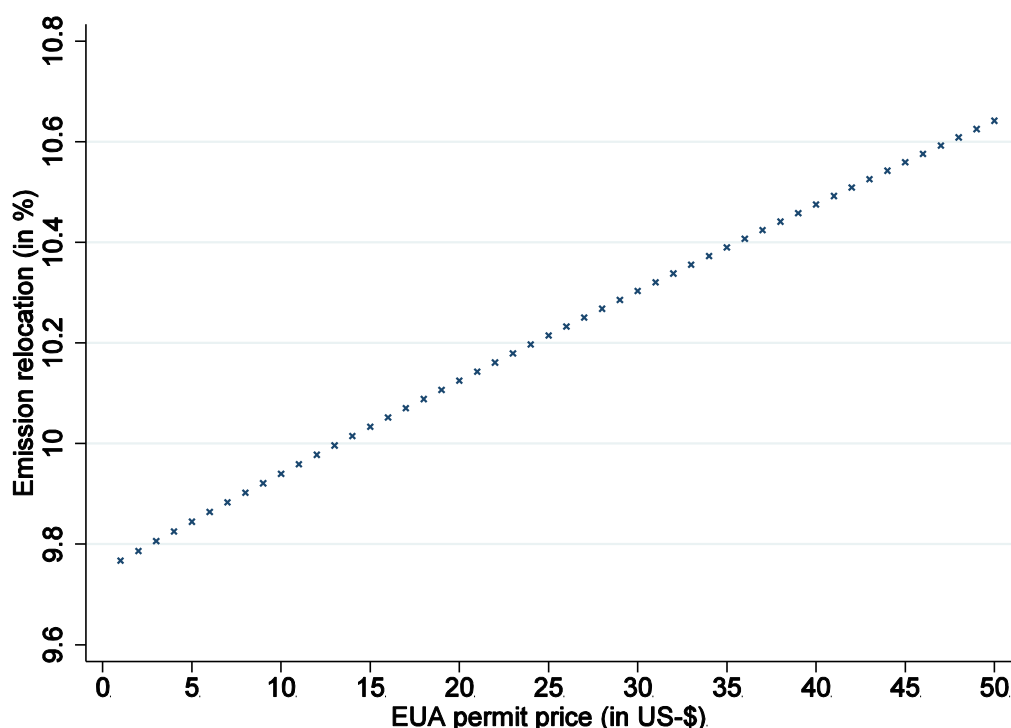
Abbildung 19: Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Zertifikatepreises der EU um 15 Dollar, ausgehend vom Basisjahr 2007.



Quelle: Aichele (2013).

Neben der Simulation spezifischer Szenarien wurde auch überprüft, wie der Zusammenhang zwischen Strenge der Klimapolitik und Ausmaß von Carbon Leakage ist. Hierzu wurden die Leakage-Raten für verschiedene Erhöhungen des Emissionszertifikatepreises in Szenario 1 ermittelt. Je stärker die Politikmaßnahme (d.h. je höher der Zertifikatepreis), desto höher das Ausmaß von Carbon Leakage, vgl. Abbildung 20. Verdoppelt man z.B. den Zertifikatepreis von 15 auf 30 USD, so erhöht sich die prognostizierte Leakage Rate um etwa 0,3 Prozentpunkte auf 10,3%. Für einen Zertifikatepreis von 50 USD würde sich die Leakage Rate um etwa 0,6 Prozentpunkte erhöhen. Carbon Leakage findet somit statt, sobald unilateral Klimapolitik betrieben wird. Allerdings verschlimmert sich das Leakage nicht wesentlich für den hier gezeigten Rahmen realistischer CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise.

Abbildung 20: Strenge der Klimapolitik und Ausmaß von Carbon Leakage



#### 2.6.4. Schlussfolgerungen

Carbon Leakage von rund 10% ist zwar nicht sehr hoch, allerdings auch nicht vernachlässigbar. Daraus folgt, dass internationale Klimapolitik, die nur in einigen Staaten oder Regionen durchgeführt wird, nicht effektiv ist und zur Verlagerung von Emissionen ins Ausland führt. Die Umweltwirkung teurer klimapolitischer Maßnahmen wird teils negiert.

Diese Erkenntnis impliziert, dass unilaterale Klimapolitik in einer globalisierten Welt nicht wirksam ist. Eine effektive Klimapolitik setzt voraus, dass alle Länder in ein globales Klimaabkommen eingebunden werden. Diese Option steht politisch derzeit nicht zur Verfügung. Unilaterale Klimapolitik könnte dennoch effektiv gestaltet werden, wenn die Klimapolitik statt der heimischen Emissionen den Carbon Footprint anvisieren würde. Dies würde Carbon Leakage verhindern. Zu diesem Zweck könnte der Emissionszertifikatehandel z.B. mit der Anforderung an Importeure kombiniert werden, Zertifikate für den CO<sub>2</sub>-Gehalt von Importen zu erwerben (vgl. Bastianoni et al., 2004 oder Peters, 2008).

### 2.6.5. Literatur

- Aichele, R. (2013): Carbon Leakage with Structural Gravity, Working Paper, mimeo
- Aichele, R. und G. Felbermayr (2012): Kyoto and the Carbon Footprint of Nations, in: *Journal of Environmental Economics and Management*, 63, 336-354.
- Aichele, R. und G. Felbermayr (2015): Kyoto and Carbon Leakage: An Empirical Analysis of the Carbon Content of Bilateral Trade, *Review of Economics and Statistics*, 97, 104-115.
- Aldy, J. und W. A. Pizer (2015): The Competitiveness Impacts of Climate Change Mitigation Policies, in: *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2, 565-595.
- Babiker, M. H. (2005): Climate change policy, market structure, and carbon leakage, in: *Journal of International Economics*, 65, 421-445.
- Bastianoni, S., F. M. Pulselli, und E. Tiezzi (2004): The problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions, in: *Ecological Economics*, 49, 253-257.
- Copeland, B., und M. S. Taylor (2005): Free trade and global warming: a trade theory view of the Kyoto protocol, in: *Journal of Environmental Economics and Management*, 49, 205 - 234.
- Elliott, J.; Foster, I.; Kortum, S.; Munson, T.; Cervantes, F. P. & Weisbach, D. (2010): Trade and Carbon Taxes, in: *American Economic Review: Papers and Proceedings*, 100, 465-469.
- Grether, J.-M., N. A. Mathys, und J. de Melo (2012): Unravelling the worldwide pollution haven effect, in: *The Journal of International Trade & Economic Development*, 21, 131-162.
- McAusland, C., und N. Najjar (2015): Carbon Footprint Taxes, in: *Environmental and Resource Economics*, 61, 37-70.
- Peters, Glen P. (2008): From production-based to consumption-based national emission inventories, in: *Ecological Economics*, 65, 13-23.

## 2.7. Wirkung nationaler klimapolitischer Maßnahmen auf die freiwillige Emissionsvermeidung von Unternehmen

In den letzten Jahren haben nationale Regierungen eine hohe Anzahl an Fördermaßnahmen eingeführt, die darauf zielen, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Wirtschaft zu reduzieren. Allerdings besteht die Sorge, dass die Anreize einzelner Länder, den Klimawandel zu bekämpfen, nicht groß genug sein könnten, um ambitionierte Programme zu implementieren, und aufgrund dessen manche Politikmaßnahmen nur Scheinanstrengungen darstellen könnten. Vor diesem Hintergrund untersuchen wir die Effektivität der in OECD und BRICS-Ländern (Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika) eingeführten Politikmaßnahmen hinsichtlich der Emissionsreduktion auf Unternehmensebene. Dabei werden alle Maßnahmen gleichzeitig analysiert, um zu vermeiden, dass der Effekt eines in der Analyse nicht berücksichtigten Maßnahmetyps einem anderen Maßnahmetyp zugeschrieben wird. Diese Multidimensionalität sowie unser länderübergreifender Fokus ermöglichen eine Aussage darüber, welche Art von Fördermaßnahmen im Allgemeinen bessere Ergebnisse herbeigeführt hat. So konnten wir einerseits „Finanzanreize oder gesetzliche Vorgaben für Energieaudits“ als Maßnahme identifizieren, die mit einer 10-prozentigen CO<sub>2</sub>-Reduktion besonders negative Auswirkungen auf den Ausstoß von Unternehmen hat. Andererseits deuten unsere Ergebnisse auf einen Anstieg der Emissionen von Stromerzeugungsunternehmen aufgrund der Einführung von Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Energiequellen.

In der Literatur gibt es Arbeiten, die sich mit den Effekte einzelner Maßnahmen auseinander setzen (siehe, z.B., Abrell, Ndoye Faye und Zachmann, 2011 und Martin, de Preux und Wagner, 2014) und andere, die versuchen Politikmaßnahmen zu vergleichen, indem Fallstudien einzelner Maßnahmen gegenübergestellt werden (siehe Harrington, Morgenstern und Sterner, 2004). Nach unserem Wissen gibt es jedoch keine Studien, die mehrere Klimapolitikmaßnahmen gleichzeitig untersuchen, noch welche, die sich mit der Frage der Effektivität auf mikroökonomischer, länderübergreifender Ebene beschäftigen.



### 2.7.1. Daten

Die von Niederlassungen der weltweit größten Unternehmen verursachten THG Emissionen wurden aus Antworten auf die vom „Carbon Disclosure Project, CDP“ durchgeführten Umfragen entnommen. Informationen über das Inkrafttreten von Klimapolitikmaßnahmen stammen von den Datenbanken der Internationalen Energieagentur. Um die Vergleichbarkeit zu erleichtern, wurden die einzelnen Maßnahmen nach Ziel und Mittel gruppiert. Tabelle 4 beschreibt die Maßnahmentypen, die in den einzelnen Gruppen klassifiziert werden.

**Tabelle 4: Gruppierung und Beschreibung der untersuchten Politikmaßnahmen**

| Variable        | Ziel  | Mittel   |
|-----------------|---|--|
| <b>resloans</b> | Nutzung erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung erhöhen         | Kredite zu marktüblichen oder vergünstigten Zinsen |
| <b>ressubs</b>  | Nutzung erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung erhöhen         | Zuschüsse, Subventionen und Steuerentlastungen     |
| <b>resfit</b>   | Nutzung erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung erhöhen         | Einspeisevergütung                                 |
| <b>chp</b>      | Ausbreitung der Erzeugung mittels Kraft-Wärme-Kopplung-Technologien | Zuschüsse, Subventionen und Steuerentlastungen     |
| <b>aud</b>      | Energieaudits   | Finanzanreize oder gesetzliche Vorgaben            |
| <b>eeloans</b>  | Erhöhung der Energieeffizienz                                       | Kredite zu marktüblichen oder vergünstigten Zinsen |
| <b>eesubs</b>   | Erhöhung der Energieeffizienz                                       | Zuschüsse, Subventionen und Steuerentlastungen     |

Weitere Einflussfaktoren auf die Emissionen von Unternehmen werden als Kontrollvariablen genutzt. Dazu zählen der Umsatz als Indikator der Produktionsmenge, die Größe des Unternehmens, der Industriesektor und das Land in denen die Niederlassung tätig ist, das Unternehmensherkunftsland sowie Informationen, ob die Filialen bzw. die Tochterunternehmen vom EU-Emissionshandelssystem erfasst werden. Die

Daten stammen aus verschiedenen Quellen, wie z.B. die Datenbanken der Firmeninformationsanbietern Thomson Reuters und Bureau van Dijk, das „Ownership Links and Enhanced EUTL Dataset“ von Jaraite et al. (2013) und die CDP Datensätze selbst. Der resultierende Datensatz umfasst die jährlichen Emissionen von nahezu 3.000 Unternehmensniederlassungen im Zeitraum 2007 bis 2012.

### 2.7.2. Methode

Anhand ökonometrischer Schätzungen untersuchen wir die Auswirkungen von den in der Tabelle aufgeführten Förderprogrammtypen auf die THG-Emissionen von Unternehmen. Dazu schätzen wir die Beziehung zwischen der jährlichen Veränderung der Emissionen und der Anzahl der Maßnahmen, die im jeweiligen Land in Kraft getreten sind. Wie oben bereits erwähnt werden Umsatz, Größe des Unternehmens, Tätigkeitsland, Herkunftsland, Jahr und Sektor als Kontrollvariablen berücksichtigt. Da manche Politikmaßnahmen darauf zielen, eine neue Technologiestruktur in der Stromerzeugung zu schaffen, ist es denkbar, dass Energieversorger stärker als Unternehmen in anderen Sektoren von den Maßnahmen betroffen sind. Aus diesem Grund werden in der Schätzung Interaktionsterme eingeführt, sodass unterschiedliche Effekte auf Energieversorgungsunternehmen und auf Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes (ohne Energieversorgung und mit Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden) ermittelt werden können.

Die Nutzung von CDP-Umfragen als Datenquelle stellt uns vor die Frage, ob wir die teilnehmenden Unternehmen als repräsentativ für alle Unternehmen betrachten können oder nicht. Es besteht der Verdacht, dass die Unternehmen sich selbst in Abhängigkeit von ihren Emissionen in Teilnehmer und Nicht-Teilnehmer selektieren, sodass diejenigen, die ihre Emissionen preisgeben und deswegen in unserem Datensatz auftauchen, sich grundsätzlich von den Unternehmen außerhalb des Datensatzes unterscheiden. Wenn das der Fall ist, würde die Kleinste-Quadrate-Methode eine verzerrte Schätzung der Auswirkungen von Politikmaßnahmen auf die Emissionen liefern. Um diesem Verdacht Rechnung zu tragen, schätzen wir die beschriebene Beziehung auch unter Anwendung der Heckman-Methode. Dabei geht es darum, in einem ersten Schritt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Unternehmen seine Emissionen preisgibt, zu schätzen und diese Wahrscheinlichkeit in der Schätzung der für uns interessanten Beziehung einfließen zu lassen.

### 2.7.3. Ergebnisse

Nachdem wir die Beziehung zwischen Emissionsänderungen und Politikmaßnahmen mit beiden Methoden geschätzt haben, konnten wir keinen Unterschied zwischen den Ergebnissen der Kleinste-Quadrate-Methode und den Ergebnissen der Heckman-Methode feststellen. Dies lässt auch darauf schließen, dass keine Selbstselektion stattfindet. Unsere Ergebnisse zeigen, dass vier von den sieben untersuchten Förderarten einen Einfluss auf die Emissionen von Unternehmen haben. Eine Maßnahme des Typs *ressubs* senkt die Emissionen von Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes (ohne Energieversorgung und mit Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden) um durchschnittlich 1,4% und hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Emissionen von Energieversorgungsunternehmen. Darüber hinaus finden wir, dass Einspeisevergütungen für Erneuerbaren Strom eine Emissionserhöhung in Höhe von 4% seitens der Energieversorgungsunternehmen verursachen, was vordergründig unplausibel scheinen mag. Wenn man sich jedoch die Situation in Deutschland vor Augen führt, gewinnen die Ergebnisse an Plausibilität. Hier nahm die CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung zwischen 2010 und 2012 zu, obwohl bedeutsame Erfolge bei der Beschleunigung des Zubaus erneuerbarer Energiequellen aufgrund fester Einspeisevergütungen verzeichnet werden konnten.

Finanzanreize oder gesetzliche Vorgaben für Energieaudits haben im Durchschnitt eine 10 prozentige Emissionsreduktion bei den Unternehmen verursacht, während Zuschüsse, Subventionen und Steuerentlastungen zur Ausbreitung der Erzeugung mit KWK-Technologien ein gemischtes Bild liefern. Einerseits senkt die Förderung von KWK-Anlagen die Emissionen von Energieversorger, andererseits stoßen Unternehmen in anderen Sektoren 3,6% mehr CO<sub>2</sub> aus. Eine mögliche Erklärung für die positive Veränderung der Emissionen in Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes (ohne Energieversorgung und mit Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden) ist, dass die Förderung von KWK-Anlagen bei den Unternehmen den Anreiz schafft, Strom und Wärme für den Eigenverbrauch zu erzeugen, weil sie sich dadurch niedrigere Energiekosten als beim Zukauf der Energie versprechen. Die neue Produktion verursacht einen erhöhten CO<sub>2</sub>-Austoß, spiegelt sich jedoch nicht in den Umsätzen wider. Für die restlichen drei Politikmaßnahmen finden wir keinen signifikanten Effekt auf die Firmen-Emissionen.

#### 2.7.4. Schlussfolgerungen

Unsere Analyse ermöglicht Aussagen über die allgemeine Effektivität einzelner Politikmaßnahmentypen auf der Mikroebene. Für Maßnahmen, die die Stromerzeugung betreffen, unterscheiden sich die Auswirkungen auf die Emissionen von Energieversorgungsunternehmen von den Auswirkungen auf Unternehmen in den anderen Sektoren. Im Gegensatz zu den erwarteten Unterschieden wonach Nicht-Energiesektoren von solchen Maßnahmen nicht betroffen sein sollten, haben manche dieser Politikmaßnahmen einen signifikanten Einfluss auf die Emissionen von Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe. Wenn das der Fall ist, dann wirken die Politikmaßnahmen auf den Unternehmensausstoß der beiden Sektorengruppen in entgegengesetzte Richtungen. So kann eine Maßnahme die Emissionen von Energieversorgern senken, jedoch den Ausstoß von Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes erhöhen oder umgekehrt. Eine Aussage über den Nettoeffekt ist nach unserer Analyse nicht möglich, dennoch können wir feststellen, wie wichtig es ist, mögliche Wechselwirkungen zwischen den Sektoren sowohl in der Effektivitätsanalyse als auch in der Politikkonzipierungsphase zu berücksichtigen.

Darüber hinaus zeigt unsere Untersuchung, dass manche Politikmaßnahmen, in der spezifische Art und Weise, wie sie implementiert worden sind, einen unerwünschten Effekt haben können, wenn sie mit anderen Maßnahmen interagieren.

#### 2.7.5. Literatur

- Abrell, J., A. Ndoye Faye and G. Zachmann (2011), *Assessing the Impact of the EU ETS Using Firm Level Data*, Bruegel Working Paper 2011/08, Brussels, Belgium.
- Jaraite, J., T. Jong, A. Kažukauskas, A. Zaklan, and A. Zeitzberger, (2013). *Ownership Links and Enhanced EUTL Dataset*. European University Institute, Florenz.  
<http://fsr.eui.eu/CPRU/EUTLTransactionData.aspx>
- Harrington W, R.D. Morgenstern, T. Sterner (2004), *Choosing Environmental Policy: Comparing Instruments and Outcomes in the United States and Europe*, Resources for the Future, Washington, DC.
- Martin, R, L.B. de Preux and U.J. Wagner (2014), *The Impacts of the Climate Change Levy on Manufacturing: Evidence from Microdata*, *Journal of Public Economics* 117: 1-14.

### 3. Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Innerhalb der Projektlaufzeit gab es insbesondere im Bereich der Integrated Assessment Modelle große Fortschritte. Schwerpunkte bildeten dabei die Vertiefung bestimmter Sektoren (beispielsweise der Kohlektor im REMIND Modell), die stärkere Berücksichtigung von Unsicherheit (beispielsweise über den Eintritt von Klimaereignissen in MERGE) oder die stärkere regionale Untergliederung (beispielsweise in FUND). Außerdem zeichnet sich in letzter Zeit ein Prozess des verstärkten Austausches und des gegenseitigen Vergleichs sowie der gegenseitigen Validierung der unterschiedlichen Integrated Assessment Modelle ab. Diese Entwicklungen haben auch Rückwirkungen auf die Ausrichtung des Projekts gehabt. So differenzieren andere Modelle wie MERGE (Blanford, Manne, Richels, Rutherford) und WITCH (Bosetti, Tavoni) erfolgreich zwischen Energieträgern und leiten daraus bereits Politikempfehlungen ab. Im Rahmen des Projekts wurde daher ein größerer Mehrwert durch eine weitere Vertiefung der regionalen Gliederung identifiziert und umgesetzt.

Weiterhin hat es große Fortschritte im Bereich der Klimapolitikindex gegeben. Hier sind insbesondere der OECD Environmental Policy Stringency Index sowie aktuellen Forschungsarbeiten von Prof. Wilhelm Althammer und Erik Hille (Measuring climate policy stringency: A shadow price approach, ITAX im erscheinen) zu nennen. Die beide genannten Ansätze und der im IACCP Projekt entwickelte Index fokussieren auf unterschiedliche Teilaspekte der Klima- und Umweltpolitik, so dass eine Weiterentwicklung durch eine Zusammenführung der drei Ansätze in einem Metaindex denkbar wäre.

## 4. Erfolgte und geplante Konferenzbeiträge und Veröffentlichungen

Vorträge und Teilnahme an international anerkannten Konferenzen und Workshops mit Auswahlverfahren:

- COP21 - Partnerships for financing equitable & effective climate action, Französisches Außenministerium, ORF, Paris, 15.-16. Juli 2015. Eingeladener Vortrag mit Kostenübernahme.
- Science and Technology (STS) Forum 2015, Kyoto, Japan, 4.-6. Oktober 2015. Eingeladener Vortrag mit Kostenübernahme.
- Economics Seminar, Universität Innsbruck, Österreich, 5.6.2013. Eingeladener Vortrag mit Kostenübernahme.
- Workshop Internationale Wirtschaftsbeziehungen, Göttingen. Eingeladener Vortrag mit Kostenübernahme.
- 38<sup>th</sup> International Conference of the International Association for Energy Economics (IAEE), Antalya, Türkei, 25.-27. Mai 2015
- 33<sup>rd</sup> North American Conference of the International Association for Energy Economics (IAEE), Pittsburgh, USA, 25.-28. Oktober 2015
- Annual Meeting European Trade Study Group (ETSG), Leuven, Belgien, 13.-15.9.2012
- Rocky Mountain Empirical Trade Conference, Banff, Kanada, 17.5.2013
- Annual Meeting European Association of Environmental and Resource Economists (EAERE), Toulouse, Frankreich, 27.6.2013
- Jahrestagung Verein für Socialpolitik (VfS), Düsseldorf, 5.-9.9.2013
- CESifo Area Conference on Energy and Climate Economics, München, 11.-12.10. 2013
- 37th IAEE International Conference “Energy & the Economy”, New York City, USA, June 15-18, 2014
- 32nd USAEE/IAEE North American Conference “Industry meets Government: Impact on Energy Use & Development”, Anchorage/AK, USA, July 28-31, 2013
- 14th International Meeting of the Association for Public Economic Theory, Lisbon, Portugal, July 5-7, 2013
- 31st USAEE/IAEE North American Conference: Transition to a Sustainable Energy Era, Austin/TX, USA, November 4-7, 2012

Veröffentlichungen:

- Aichele, R. (2013a), Carbon Leakage with Structural Gravity, Working Paper.
- Aichele, R. (2013b), Trade, Climate Policy and Carbon Leakage - Theory and Empirical Evidence, ifo Beiträge zur Wirtschaftsforschung 49, ifo Institut.
- Aichele, R., Felbermayr, G. & Heiland, I. (2014), "EEG und internationaler Wettbewerb: Ist die besondere Ausgleichsregelung haltbar? ", ifo Schnelldienst 67 (02), 23-29.
- Ciesielski, A. (2015), "Carbon emissions scenarios in Europe based on an endogenous growth model", Working Paper, eingereicht.
- Dieler, J. & Lippelt, J., (2012a), "Kurz zum Klima: Die grüne Förderlandschaft Europa", ifo Schnelldienst 65 (06), 34-37.
- Dieler, J. & Lippelt, J., (2012b) "Kurz zum Klima: Umweltsteuern – Steuern für die Umwelt oder für die Staatskasse?", ifo Schnelldienst 65 (13), 80-82.
- Dieler, J., (2013), "Evolution of Oil Taxes: an International Perspective ", CESifo DICE Report 11 (2), 53-54.
- Dieler, J., Schmied, C. & Lippelt, J., (2014) "Kurz zum Klima: Klimaschutz in Städten", ifo Schnelldienst 67 (17), 59-62.
- Dieler, J., Jus, D. & Zimmer, M. (2015), „Anticipation and Inventory Effects on Fuel Demand: An Analysis of Prices and Taxes in Europe“, Working Paper, eingereicht.
- Dieler, J., (2016), „Effectiveness of Climate Policies: Empirical Methods and Evidence“, ifo Beiträge zur Wirtschaftsforschung (forthcoming).
- Gröschl, J. & Lippelt, J. (2013), "Kurz zum Klima: Extreme Wetterlage oder Klimawandel? Daten und Fakten zu Temperaturen, Niederschlägen und Hurrikanen", ifo Schnelldienst 66 (06), 43-47.
- Gröschl, J. K. (2013), Gravity Model Applications and Macroeconomic Perspectives, ifo Beiträge zur Wirtschaftsforschung 48, ifo Institut.
- Lippelt, J., Schmitt, A., Elting, J. & Marz, W. (2014), "Kurz zum Klima: Gaining Steam – der Stand der Klimapolitik in den USA", ifo Schnelldienst 67 (24), 82-86.
- Montoya Gómez, A. M. & Zimmer, M. (2015), „Assessing the Effects of Climate Policy on Firms’ Greenhouse Gas Emissions“, Working Paper, eingereicht.
- Montoya Gómez, A. M., Bohland, M., Lippelt, J., Ruppert, Th. & von Schickfus, M. T. (2015), "Kurz zum Klima: Im Vorfeld der Weltklimakonferenz in Paris", ifo Schnelldienst 68 (22), 56-63.
- Rave, T. und Goetzke, F. (2013), Climate-friendly Technologies in the Mobile Air-conditioning Sector: A Patent Citation Analysis, Environmental Economics and Policy Studies 15 (4), 389–422.
- Rave, T. (2013), Innovationsindikatoren zum globalen Klimaschutz – FuE-Ausgaben und Patente, ifo Schnelldienst 66 (15), 34-41.
- Röpke, L. & Lippelt, J. (2012), "Kurz zum Klima: Bis zum letzten Tropfen," ifo Schnelldienst, 65(24), 66-68.

## 5. Bearbeiter der Studie

Dr. Markus Zimmer (Projektleiter)

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im ifo Zentrum für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen, München.

Dr. Rahel Aichele

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im ifo Zentrum für Außenwirtschaft, München.

Dipl. Vw. Anna Sophia Ciesielski

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im ifo Zentrum für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen, München.

Dr. Julian Dieler

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im ifo Zentrum für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen, München.

Ana Maria Montoya Gómez, MSc in Economics

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im ifo Zentrum für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen, München.

Dr. Tilmann Rave

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im ifo Zentrum für Energie, Klima und erschöpfbare Ressourcen, München.