

Low Carbon Societies Network



# Ambitionierte Klimaschutz Szenarien für Deutschland

Ein partizipatorischer Ansatz

Project: ENCI-LowCarb  
Engaging Civil Society in Low-carbon Scenarios



# Ambitionierte Klimaschutz Szenarien für Deutschland

Ein partizipatorischer Ansatz

Project: ENCI-LowCarb

Engaging Civil Society in Low-carbon Scenarios

**March 2012**

**Eva Schmid** (Potsdam Institute for Climate Impact Research) <sup>1</sup>

**Brigitte Knopf** (Potsdam Institute for Climate Impact Research)

**Jan Burck** (Germanwatch)

---

<sup>1</sup>Corresponding Author, E-mail: [eva.schmid@pik-potsdam.de](mailto:eva.schmid@pik-potsdam.de), Telephone: +[49] 331-2674,  
Fax: +[49] 331 299-2570, Mail: P.O. Box 60 12 03, 14412 Potsdam, Germany



**7th Framework Programme for Research and Technological Development**

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement N° 213106. *The contents of this report are the sole responsibility of the ENCI-Lowcarb project Consortium and can in no way be taken to reflect the views of the European Union.*

## Ambitionierte Klimaschutz Szenarien für Deutschland – Ein partizipatorischer Ansatz, ENCI-LowCarb Projektbericht

Eva Schmid, Brigitte Knopf und Jan Burck

### Zusammenfassung

Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „Engaging Civil Society in Low-Carbon Scenarios“ veröffentlichen das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und Germanwatch ambitionierte Klimaschutz-Szenarien für Deutschland. Das Projekt hatte das Ziel, Szenarien zu erstellen, die einerseits die Nichtüberschreitung des 2 Grad-Limits respektieren und andererseits möglichst viele Stakeholder in den Prozess der Szenarienerstellung einbinden. Ein Forschungsziel war es herauszufinden, welche Maßnahmen und Techniken von den wichtigen Stakeholdern akzeptiert werden können, um so Szenarien bilden zu können, welche eine hohe Akzeptanz aufweisen.

Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass eine Fortführung historischer Trends im Güterverkehr und im Elektrizitätssektor, die von den Stakeholdern unter den aktuellen Bedingungen als wahrscheinlich eingeschätzt wurden, zu einem carbon lock-in führt, der 2050 55% des gesamten CO<sub>2</sub>-Budgets einnimmt. Sollen die ehrgeizigen CO<sub>2</sub>-Reduktionen trotz diese carbon lock-ins erzwungen werden, führt dies zu einer niedrigeren Wirtschaftsleistung und führt zu größeren sozio-politische Auswirkungen. Diese Hindernisse machen ehrgeizige inländische Minderungsbemühung zu einer großen Herausforderung. Die Kosten könnten halbiert werden, wenn die Problematik des carbon lock-in gelöst würde. Gleichzeitig zeigen die Szenarien, dass die starke Steigerung von Energieeffizienz parallel zum Ausbau der Erneuerbarer Energien entscheidend ist. Technologien wie z.B. die CCS-Technik, könnten die Minderungskosten noch weiter verringern, jedoch nicht wesentlich. Um einen carbon lock-in zu verhindern sind wesentliche gesellschaftliche Veränderungen notwendig, die wiederum gezielte politische Maßnahmen sowie gesellschaftlichen Willen erfordern.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Methodik</b> .....	<b>4</b>
2.1. Partizipative Szenariendefinition.....	4
2.2. Das hybride energiewirtschaftlich-ökonomische Modell REMIND-D .....	5
2.3. Partizipative Szenarienevaluation .....	7
<b>3. Szenariendefinition</b> .....	<b>7</b>
<b>4. Szenarienergebnisse</b> .....	<b>11</b>
4.1. CO <sub>2</sub> Emissionen nach Sektor .....	11
4.2. Transportsektor .....	13
4.3. Stromsektor .....	14
4.4. Kosten der CO <sub>2</sub> -Reduktion.....	16
<b>5. Szenarienevaluation</b> .....	<b>17</b>
<b>6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b> .....	<b>18</b>
<b>7. Bibliographie</b> .....	<b>20</b>

## 1. Einleitung

Anspruchsvolle Bemühungen der Industrieländer, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern, sind nötig, um die Chance zu erhalten, die globale Erwärmung nicht über 2°C steigen zu lassen (UNEP, 2010). Die Europäische Union hat sich selbst dazu verpflichtet, CO<sub>2</sub>-Emissionen, gemessen an den Werten von 1990, bis zum Jahr 2020 um 20% zu reduzieren (European Parliament und European Council, 2009). Mitgliedsstaaten verteilen die Reduktionsanstrengungen je nach individuellen Fähigkeiten. Diese Entscheidung führte dazu, dass Deutschland bis 2020 eine 40%-ige Reduktion nationaler CO<sub>2</sub>-Emissionen anstrebt. Langfristig bekräftigt die deutsche Regierung das ambitionierte Ziel, CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 80-95% zu reduzieren, gemessen an 1990 (Bundesregierung, 2010).

Mehrere umfangreiche Szenario-Studien, die auf Energiesystemmodellen basieren, haben gezeigt, dass es technisch möglich ist, dieses langfristige Ziel zu erreichen (siehe z.B. Schlesinger et al., 2010; Nitsch und Wenzl, 2009; Nitsch et al., 2010; Kirchner et al., 2009). Die Modellergebnisse zeigen, dass sich dafür die besten zur Verfügung stehenden Technologien auf dem Markt flächendeckend durchsetzen müssen. Dafür sind umfangreiche politische Maßnahmen notwendig, die weitreichende Auswirkungen für die deutsche Gesellschaft haben werden.

In den existierenden Szenarien wurde bislang allerdings nicht gefragt, inwieweit die notwendigen Veränderungen und davon abgeleiteten energiepolitischen Vorschläge mit den Wünschen und Vorstellungen der Allgemeinheit korrespondieren. Sollte dies nicht der Fall

sein, könnte öffentliche Ablehnung die Einführung neuer Technologien verhindern und somit die Umsetzung der ehrgeizigen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele erschweren. Ein bekanntes Beispiel öffentlicher Ablehnung ist der lokale Widerstand gegen Windenergieparks, beispielsweise wegen befürchteten negativen Auswirkungen auf das Landschaftsbild (Meyerhoff et al., 2010). Aufgrund der starken Verzögerungen, die lokaler Widerstand und öffentliche Ablehnung beim Ausbau Erneuerbarer Energien haben kann, hat der Begriff der 'gesellschaftlichen Akzeptanz' im Feld der Energiepolitik eine Schlüsselrolle. Auch die von der Bundesregierung eingesetzte Ethikkommission für eine sichere Energieversorgung gibt an, dass sowohl Transparenz in den Entscheidungen von Parlament und Regierung als auch die Partizipation von sozialen Gruppen am Entscheidungsprozess eine Grundvoraussetzung darstellt (2011).

Reduktionsszenarien untersuchen, was technologisch machbar ist und informieren über den energiepolitischen Prozess. Daher müssen Transparenz und Partizipation zunehmend auch in deren Gestaltung und Entwicklung eine Rolle spielen. Heutzutage werden quantitative modellbasierte Szenarien im Allgemeinen von Experten entwickelt, deren Analyse ist weitgehend von wirtschaftlich-technischen Überlegungen bestimmt. Um nun Szenarien zu erstellen, die ebenso öffentliche Präferenzen bedenken, sind zunehmend partizipative Ansätze notwendig.

Ein wohlüberlegtes Abwägen verschiedener CO<sub>2</sub>-Reduktionsoptionen bedeutet, dass direkte und indirekte Implikationen ebendieser Reduktionsoptionen kollektiv durch die Gesamtheit betroffener Stakeholder betrachtet, diskutiert und reflektiert werden. Die Entwicklung und Analyse modellbasierter Reduktionsszenarien, die die Bewertungen und Präferenzen der Stakeholder berücksichtigen, kann das Verständnis für gesellschaftliche Herausforderungen hinsichtlich ehrgeiziger Reduktionsbestrebungen verbessern. Um solche Szenarien ableiten zu können, müssen die Bewertungen und Präferenzen der Stakeholder herauskristallisiert und in Modellparameter übersetzt werden. Die Modellergebnisse werden hierdurch relevant auf und erlauben stichhaltige Diskussionen über sozio-politische Auswirkungen technologiefokussierter Reduktionspfade. Dies kann jedoch nur über einen partizipativen Ansatz erreicht werden.

Beispiele für solche partizipativen Ansätze in modellbasierten CO<sub>2</sub>-Reduktionsszenarien sind bislang sehr rar. Für die Szenarien der 'Roadmap 2050 for a low carbon economy' der Europäischen Kommission wurden online Fragebögen zur Einschätzung der Auswirkung eingesetzt - in dem Fall also nur eine einseitige Methode, die keinen Dialog darüber ermöglichte. Die European Climate Foundation (ECF) hat sich mit einer ganzen Reihe von Stakeholdern während der Vorbereitung der CO<sub>2</sub>-Reduktionsszenarien zur 'Roadmap 2050' beraten. Das konkrete Vorgehen wurde jedoch nicht dokumentiert. Für Deutschland sind bislang noch keine partizipativen Ansätze zur Entwicklung von ambitionierten Klimaschutz-Szenarien bekannt.

Ziel dieses Projektes war es, die o.g. Lücke zu füllen. Hiefür wurden mehrere modellbasierte, langfristige Reduktionsszenarien für Deutschland vorgestellt und die innerhalb eines partizipativen Prozesses mit Stakeholdern zivilgesellschaftlicher Organisationen und aus der Industrie aus dem Transport- und dem Elektrizitätssektor diskutiert.

Die empirische Studie wurde als Teil des EU-Projekts ENCI Low Carb (Engaging Civil Society in Low Carbon Scenarios) durchgeführt. In eigens dafür veranstalteten Stakeholder-Dialogen

diskutierten Vertreter der Zivilgesellschaft und Industrie vorhandene Reduktionsmöglichkeiten für den Transport- und Elektrizitätssektor. Ihre Bewertungen und Präferenzen bildeten die Grundlage für die Definition der Szenarien und damit die Beschaffenheit der Parameter für das hybride energiewirtschaftliche-ökonomische Modell REMIND-D (Schmid et al., 2012). REMIND-D basiert auf den strukturalen Gleichungen des aktuellsten globalen Integrated Assessment Model (IAM) REMIND-R (Leimbach et al., 2010). Die Hybridität des Modells REMIND-D, das ein detailliertes bottom-up Energiesystemmodul in eine top-down Repräsentation des makroökonomischen Modells integriert, erlaubt es, die Szenarien sowohl auf ihre technologische als auch auf ihre wirtschaftliche Realisierbarkeit hin zu analysieren. In einer zweiten Dialogrunde bewerteten Stakeholder die Glaubwürdigkeit der Szenarien und identifizierten sozio-politische Externatlitäten der modellbasierten Reduktionsszenarien.

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 legt die Methodik dar. Kapitel 3 erörtert die Ergebnisse des Definitionsprozesses des partizipativen Szenarios. Kapitel 4 zeigt die Ergebnisse der Szenarien auf, die mit REMIND-D gewonnen wurden, wobei der Fokus auf strukturelle Trends bei der Entstehung von CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Sektor sowie auf die Modal-Splits im Güter- und Personentransportsektor und auf den Mix der Elektrizitätserzeugung gelegt wurde. Reduktionskosten und einer Analyse, die die Abhängigkeit dieser Kosten von den Reduktionszielen bestimmen soll, werden in Kapitel 4.4 dargelegt. Kapitel 5 gibt die Bewertungen der Stakeholder hinsichtlich der Reduktionsszenarien wieder. In Kapitel 6 wird der Bericht zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

## 2. Methodik

Das Ziel dieser Studie war die Entwicklung von ehrgeizigen Klimaschutz-Szenarien für Deutschland, die sowohl wirtschaftlich-technische als auch sozio-politische Dimensionen berücksichtigen. Um dies zu erreichen wurde unter Einbeziehung von zentralen Stakeholdern des Verkehrs- und Elektrizitätssektors Szenarien erstellt und evaluiert. Eine Kurzdarstellung des organisatorischen Ablaufs findet sich in Schmid et al. (2011).

### 2.1. Partizipative Szenariendefinition

In Zusammenarbeit mit den Stakeholdern wurden während zwei Stakeholder-Dialogen mehrere Visionen für die zukünftige Entwicklung im Transport- und Elektrizitätssektor erarbeitet. Die elf Teilnehmer kamen aus Umwelt-NROs, Verbraucherschutzorganisationen, der Stadtplanung, Gewerkschaften, Betreiberfirmen von Übertragungsnetzen, der Energieerzeugungs- und Automobilindustrie bis hin zu Betreiberfirmen erneuerbarer Energien. Während der Dialoge wurden Reduktionsmöglichkeiten und zukünftige Schlüsselentwicklungen diskutiert. Ein Fragebogen sicherte zusätzlich die Ergebnisse der Diskussion.

Der Fragebogen fragte nach den Bewertungen und Präferenzen der Stakeholder zu möglichen künftigen Entwicklungen von Schlüsselvariablen des Transport- und Elektrizitätssektors. Es wurde weiterhin gefragt, ob die mögliche Entwicklung a) wünschenswert und b) realistisch eingeschätzt werden. Aufgrund der kleinen Stichprobe

sind die Daten für ökonometrische Analysen nicht geeignet. Anstelle dessen werden deskriptive Lagemaßzahlen aus der Statistik angewendet. Arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung und Dichte geben Hinweise darauf, ob die Vorstellung wahrscheinlicher und wünschenswerter Entwicklungen divergiert und ob Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Stakeholdergruppen gefunden werden können. Anhand dieser qualitativen Informationen und Expertenmeinungen aus der Fachliteratur wurden Bausteine für die Szenarien entwickelt. Danach übersetzten die Modellierer diese Daten für das REMIND-D Modell.

## **2.2. Das hybride energiewirtschaftlich-ökonomische Modell REMIND-D**

REMIND-D ist ein hybrides Wachstumsmodell, welches ein detailliertes „bottom-up“ Energiesystemmodul in ein „top-down“ Ramsey-Modell integriert. Die beiden Module sind fest miteinander gekoppelt. Diese Modellstruktur ermöglicht eine integrierte Analyse des optimalen langfristigen Zusammenspiels von technologischen CO<sub>2</sub> Minderungsoptionen in den verschiedenen Sektoren des deutschen Energiesystems, sowie der allgemeinen makroökonomischen Dynamik. Eine ausführliche Dokumentation des Modells REMIND-D ist in Schmid (2012) zu finden.

Alle Modelle, ob nun Klimamodelle, Energiesystemmodelle oder ökonomische Modelle, zeichnen sich generell dadurch aus, dass sie die Komplexität der realen Welt stark reduzieren. Es sind stilisierte Abbildungen der wichtigsten Wirkmechanismen, welche in der Realität beobachtet werden. Um ein mathematisches Modell numerisch lösen zu können, ist dies unvermeidbar. Die zugrunde gelegten Annahmen, die hier im Falle eines gekoppelten Makroökonomie- Energiesystemmodells getroffen wurden, um die Komplexität zu reduzieren, sollen im Folgenden kurz umrissen werden. Sie sind in der makroökonomischen Modellierung gängige Praxis. Trotz der teils stark vereinfachenden Annahmen können mit Modellen komplexe Gedankenexperimente analysiert werden, deren Ergebnisse in der Realität von Relevanz sind. Je nach Modelltyp variieren die Beschränkungen und Stärken, sowie die Fragestellungen, welche damit beantwortet werden können.

Die makroökonomische Produktionsfunktion von REMIND-D nimmt grundsätzlich an, dass Deutschland eine geschlossene Ökonomie ist. Zugleich betrachtet sie das System auf einer Aggregationsebene, bei der keine einzelnen Akteure vorkommen, die Güter nachfragen oder produzieren. Aus den drei Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit und Energie wird das Bruttosozialprodukt produziert, welches die Kosten des Energiesystems und die Investitionen in den makroökonomischen Kapitalstock decken muss. Der Rest bleibt zur Steigerung der Wohlfahrt. Optimiert, d.h. maximiert, wird die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt und nicht das Bruttosozialprodukt. Es gibt einen repräsentativen Haushalt, außerdem wird Vollbeschäftigung angenommen. Beschränkungen, die sich hieraus ergeben, sind insbesondere die Tatsache, dass mit REMIND-D weder Arbeitsplatzeffekte von Klimaschutzmaßnahmen analysiert werden können, noch die Rolle einzelner Akteure (Firmen oder Haushalte) oder die Verteilungsfrage. Außerdem führt der Optimierungsalgorithmus per se zu Klimaschutzkosten in ambitionierten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsszenarien im Vergleich zu wenig ambitionierten Szenarien. Die Möglichkeit von optimaleren Gleichgewichtszuständen wird nicht reflektiert.

Stärken, die das Modell REMIND-D im Vergleich zu anderen Makroökonomie/Energiesystemmodellen aufweist, beziehen sich vor allem auf den Optimierungsmechanismus und weiterhin auf die endogene Repräsentation der Sektoren im Energiesystem und der Makroökonomie. Hier sind viele Feedbackmechanismen mitbetrachtet, die in anderen Modellen nicht abgebildet sind. Weiterhin erlaubt das Modell die Analyse langfristiger Effekte von Investitionsentscheidungen. Die Modellergebnisse von REMIND-D geben damit einen Bezugswert an, wie eine Transformation im optimalen Fall aussehen könnte, die eine optimale (maximale) gesellschaftliche Wohlfahrt generiert. Sie sind daher keine Prognosen, sondern Projektionen, die abhängig von bestimmten Annahmen sind. In Bezug auf deutsche Klimaschutzbemühungen sind solche Befunde konzeptionell hilfreich. Es können Aussagen darüber getroffen werden, wie sich verschiedene Rahmenbedingungen in unterschiedlichen Szenarien auf die Aufteilung der Emissionsminderungen in den Sektoren des Energiesystems auswirken. Des Weiteren kann aufgezeigt werden welche Technologien zur Emissionsreduktion beitragen können und wie die Transformation wohlfahrtsoptimierend (im Rahmen des aktuellen Gleichgewichts) aussehen könnte.

Ein striktes CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget von 16 Gt CO<sub>2</sub> über den analysierten Zeithorizont, 2005-2050, führt zur Minderung von jährlichen CO<sub>2</sub> Emissionen im Modell. Hierbei werden 85% CO<sub>2</sub> Emissionsreduktion in 2050 gegenüber 1990 erreicht. Die Wahl des Budgetansatzes im Modell ist inspiriert durch die Arbeit von Meinshausen (2009). Durch die Budgetierung der Emissionen kann das Modell jährliche Emissionen selbständig entscheiden, was entscheidend zur Flexibilität in Bezug auf die Wahl der technischen Minderungsoptionen beiträgt. Aufgrund der für Wachstumsmodelle typischen perfekten Voraussicht antizipiert REMIND-D die zukünftige Knappheit von Energieträgern sowie verfügbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Schattenpreise. Optimale jährliche Minderungsleistungen in den verschiedenen Sektoren, sowie die Verbreitung bestimmter Technologien sind daher ein Resultat des Modells. Die verfügbaren CO<sub>2</sub> Minderungsoptionen lassen sich in vier Kategorien einteilen: (i) Verwendung von alternativen, CO<sub>2</sub>-Emissionsarmen Technologien, (ii) Substitution in der Nachfrage von emissionsintensiver Endenergie und Energiedienstleistungen, (iii) Verbesserung der Energieeffizienz, und (iv) Nachfragereduktion. Die letzte Option wird vom Modell generell gemieden, da sie zu Reduktionen im Wirtschaftswachstum führt.

Das Energiesystemmodul von REMIND-D ist mit einer Vielfalt von alternativen Technologien ausgestattet, aus welchen das Modell selbstständig auswählen kann. Der endogene Kapazitätszubau unterliegt jedoch Potenzial- und Ressourcenrestriktionen für erneuerbare Primärenergiequellen und Brennstoffkosten für fossile Primärenergieträgern. Steinkohle, Erdgas und Rohöl werden zu exogenen Preisen importiert (Preisfad B, Nitsch 2009). Inländische Braunkohleressourcen werden durch einen Extraktionskostenansatz im Modell repräsentiert. REMIND-D stehen ca. 70 Konversionstechnologien zur Verfügung, sowie 20 Verteiltechnologien und 40 Transporttechnologien. Konversionstechnologien produzieren die Sekundärenergieträger Strom, Fernwärme, lokale Wärme, Wasserstoff, Gas, Benzin, Diesel, Kerosin und Heizöl. Verteiltechnologien transformieren die Sekundärenergieträger in Endenergieträger, welche von den Sektoren Industrie und Haushalte/Gewerbe/Dienstleistungen nachgefragt werden. Transporttechnologien stellen Energiedienstleistungen für den Frachtverkehr sowie den Personenverkehr zu Verfügung. Die „Carbon Capture and Sequestration“ (CCS) Technologie ist im Modell abgebildet, in



Kombination mit der Verstromung oder Verflüssigung von Steinkohle, Braunkohle und Biomasse. Auf Grund der Entscheidung des deutschen Bundestages ist der Ausstieg aus der Atomenergie bis 2022 dem Modell vorgeschrieben. In REMIND-D sind die inländischen erneuerbaren Primärenergiepotenziale von Lignozellulose, öliger und stärkehaltiger Biomasse, tiefe und oberflächennahe Geothermie, Wasserkraft, Wind onshore, Wind offshore und solare Strahlung abgebildet. Das Modell berücksichtigt explizit die kurzfristigen Fluktuation von erneuerbaren Energiequellen, z.B. von Wind und solarer Strahlung. Dies geschieht mit Hilfe eines Residuallast-Ansatzes (Ueckerdt 2011).

### **2.3. Partizipative Szenarienevaluation**

In der zweiten Runde der Stakeholder-Dialoge bewerteten dieselben Stakeholder die Szenarioergebnisse, die mit REMIND-D erzielt wurden: Einerseits beurteilten sie ihre Plausibilität, andererseits identifizierten sie Bereiche, in denen die vorausgesagten Entwicklungen zu Problemen der sozialen Akzeptanz führen. Das Ziel war, die bedenklichen sozio-politischen Wirkungen von technologie-basierten CO<sub>2</sub>-Reduktionspfaden herauszuarbeiten. Ein besseres Verständnis davon, wie Fragen des Klimaschutzes und der Energiesicherheit denjenigen einer bezahlbaren Energieversorgung widersprechen und wie diese Probleme angegangen werden können, ist eine wesentliche Voraussetzung für eine klimafreundliche Zukunft in Deutschland.

## **3. Szenariendefinition**

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, bildet die Erarbeitung von Szenarien-Bausteinen die Grundlage der Szenarientwicklung. Sie bestehen aus Informationen zu antizipierten Entwicklungen in Schlüsselsektoren und quantitativen Prognosen der Rahmenbedingungen. Daraus ließen sich drei Szenarien entwerfen: Das 'continuation' Szenario basiert auf Entwicklungen im Verkehrs- und Stromsektor, die Stakeholdern für wahrscheinlich halten. Das 'paradigm shift' Szenario repräsentiert Entwicklungen, die die Mehrheit der Stakeholder für wünschenswert hält. Zusätzlich dazu finden im dritten Szenario 'paradigm shift +' einige CO<sub>2</sub>-Minderungstechnologien Anwendung, die die Stakeholder nicht befürwortet haben, bzw. kontrovers diskutiert haben.

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse des Fragebogens (Likert-Skala) für den Stakeholder-Dialog des Verkehrssektors. Alle Aussagen beziehen sich auf den Zeithorizont bis 2050. 1 bedeutet Ablehnung, 4 ist Indifferenz und 7 Zustimmung. STABW = Standardabweichung, MS = Modal Split, ÖV = Öffentlicher Verkehr, H2 = Wasserstoff.

zukünftige Entwicklung	Wahrscheinlich			Erwünscht		
	Mittelwert	STABW	Modalwert	Mittelwert	STABW	Modalwert
Jahreszuwachs an LKW T-km	6,55	0,69	7	3,09	2,25	1
Wechsel von Straße zu Schiene in T-km	3,73	1,74	3	6,09	1,38	7
Entkopplung Güter&BIP Wachstum	4,09	1,3	3/4	5,90	1,87	7
<b>VT MIV Reduktion = 50%</b>	3,91	1,64	3/5	4,73	2,28	7
signifikante Zunahme im <b>VT ÖV</b>	3,64	1,75	5	5,64	1,63	7
<b>VT Radfahren&amp;laufen steigt an</b>	4,55	2,07	2/7	5,64	1,97	7
Bioethanol = 50% Anteil	3,33	1,55	2	3,33	2,33	1
Biodiesel = 50% Anteil	3,33	1,79	3/5	3,33	2,33	1
<b>H2O dominierender Kraftstoff</b>	3,55	1,92	3	3,64	1,45	3

Ist ein Wachstum der jährlichen Fahrleistung im Frachtverkehr unvermeidlich? Historisch gesehen korrelieren Transport- und Wirtschaftswachstum, allerdings ist nicht eindeutig, was Ursache und was Wirkung ist (Feige 2007). Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, halten es die Stakeholder für eine wünschenswerte Option, Transport- und Wirtschaftswachstum zu entkoppeln, indem die die LKW Tonnen-km (t-km) reduziert werden und Frachtverkehr auf die Schiene verlagert wird. Gleichzeitig gehen sie davon aus, dass die jährlichen t-km von LKW mit fossilen Kraftstoffen bis 2050 stark steigen. Experten bestätigen eine solche Entwicklung: Lenz et al. (2010) z. B. prognostizieren eine enorme Steigerung der Fahrleistung von LKW, sie soll bis 2030 auf 787 Mrd. t-km steigen (2005: 466 Mrd. t-km), was zu einem ernsthaften carbon lock-in führen würde. Im 'continuation' Szenario ist dieser Trend abgebildet durch die exogene Vorgabe, dass der LKW Verkehr bis 2050 linear auf 787 Mrd. t-km steigt, was den konservativen Einschätzungen entspricht. Dennoch befürworten die Stakeholder stark politische Bestrebungen, die darauf abzielen, die Gesamtfahrleistung des Güterverkehrs zu verringern und Güterverkehr von der Straße auf die Schiene zu bringen. Sie behaupten, dass machbare Lösungen existieren, sie aber aufgrund von mangelndem politischen Willen nicht umgesetzt werden. Holzhey (2010) kommt zu dem Ergebnis, dass eine Verdopplung des Schienengüterverkehrs in Deutschland bis 2030 technisch machbar ist, wenn auch gezielte Investitionen nötig sind. Daher gehen die beiden 'paradigm shift' Szenarien davon aus, dass der Güterverkehr und BIP-Wachstum in Zukunft entkoppelt werden können.

Ist multi-Modalität eine sinnvolle Option, um den Personenverkehr zu dekarbonisieren? Der Modal-Split im Personenverkehr ist stark auf den motorisierten Individualverkehr (MIV) ausgerichtet, der für ca. 80% der jährlich zurückgelegten Personenkilometer (p-km) verantwortlich ist (BMVBS 2008). Viele Stakeholder meinen, dass der MIV auch in Zukunft dominant bleiben wird. Daher ist im 'continuation' Szenario festgelegt, dass der MIV jährlich nicht unter einen Anteil von 80% sinken darf. Allerdings halten die Stakeholder strukturelle Veränderungen im Modal-Split für wünschenswert. Sie sehen einiges Potential im

öffentlichen Verkehr (ÖV) und in nicht-motorisiertem Verkehr auf kurzen Distanzen, beispielsweise durch ein Netz von Fahrradschnellwegen. Investitionen in Infrastruktur für ÖV halten die Stakeholder für besonders wichtig, um multi-modale Verkehrsabwicklung zu fördern. Sie unterstützen damit die Vorschläge, die im EU-Weißbuch Verkehr vorgebracht werden (EC, 2011). In den beiden 'paradigm shift' Szenarios sind solche Entwicklungen aufgenommen, indem dem ÖV ein größerer Anteil im Modal-Split auf kurzen und langen Distanzen vorgeschrieben wird.

Welcher alternative Kraftstoff mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoß wird sich in der Zukunft durchsetzen? Parallel zu Veränderungen in der Verkehrsabwicklung stellen Kraftstoffe mit niedrigerem CO<sub>2</sub>-Ausstoß für konventionelle Fahrzeuge eine Möglichkeit dar, die Produktion von Klimagasen zu senken. Die Stakeholder waren geteilter Meinung, ob Bio-Kraftstoffe der ersten Generation wünschenswert sind und ob Kraftstoffe der zweiten Generation in der benötigten Menge verfügbar sind. Zudem stellten sie die Machbarkeit einer stärkeren Nutzung von Wasserstoff in Frage (z.B. Fishedick et al., 2005), der durch Elektrolyse in Zeiten der Überproduktion von EE hergestellt wird. Da diese technologischen Optionen nicht eindeutig erwünscht werden, sind sie im Modell nur im 'paradigm shift+' Szenario verfügbar.

Können Landschaftsveränderungen durch Erneuerbaren Energien und neue Stromleitungen zu einem Problem werden und wie lässt sich dieses Thema möglicherweise angehen? Eine Begleiterscheinung von flächendeckender Anwendung von Erneuerbarer Energien und Ausbau der Übertragungskapazitäten wird von viel als eine Technologisierung der Landschaft empfunden. Gerade in Bezug auf die soziale Akzeptanz von Erneuerbaren Energien wurden diese Landschaftsveränderungen als problematisch angesehen. Insbesondere die Produktion von Biogas, die mit umfangreichem Maisanbau in Monokultur einhergeht, beurteilten die Stakeholder negativ (Tabelle 2). Die Stakeholder halten es zudem für möglich, dass der substantielle Ausbau von Stromnetzen, nötig um die fluktuierende Einspeisung von Erneuerbaren Energien zu verteilen, am Widerstand der lokalen Bevölkerung scheitert. Allerdings sprechen sie sich dafür aus, dass lokale Konflikte beigelegt werden müssen und dass Erneuerbare Energien, mit Ausnahme von Biogas, einen großen Anteil am Energiemix einnehmen sollen. Möglichkeiten die soziale Akzeptanz zu erhöhen sind Verfahrensgerechtigkeit, Beteiligungsmöglichkeiten im Planungs- und Umsetzungsprozess und Eigentum durch die lokale Bevölkerung (Musall und Kuik, 2011; Zoellner et al., 2008). Um eine mögliche gesellschaftliche Ablehnung von EE-Ausbau im großen Maßstab und der Aufstellung von Stromnetzen in REMIND-D zu integrieren, sind die Erneuerbare Energien-Potentiale im 'continuation' Szenario geringer als in den beiden 'paradigm shift' Szenarios.

Tabelle 2: Ausgewählte Ergebnisse des Fragebogens (Likert-Skala) für den Stakeholder-Dialog des Stromsektors. Alle Aussagen beziehen sich auf den Zeithorizont bis 2050. 1 bedeutet Ablehnung, 4 ist Indifferenz und 7 Zustimmung. WK = Windkraftanlage, HH = Haushalte, KW = Kraftwerk, CCS = Carbon Capture and Sequestration.

zukünftige Entwicklung	Wahrscheinlich			Erwünscht		
	Mittelwert	STABW	Modalwert	Mittelwert	STABW	Modalwert
lokaler Widerstand behindert Netzausbau	3,57	1,40	2/3/5	1,46	0,66	1
Großeinsatz von Off-Shore-WK	5,64	1,34	5	4,92	1,89	7
Großeinsatz von Biogasanlagen	4,21	1,25	5	3	1,63	2
Strombedarf der Industrie sinkt	4,71	1,86	6	4,77	1,94	4/6/7
Strombedarf der HH sinkt	4,07	1,90	3	5,07	2,10	7
Rebound-Effekt wird kompensiert	5,14	1,35	5	2,92	1,55	1/3/4
Zunahme von Gas-KW nächste Dekade	5,43	1,16	5	5,54	2,03	6
Stilllegung existierender Kohle-KW	4,36	1,55	5	5,23	2,24	7
Umfangreiche Verfügbarkeit von CCS	3,54	1,94	1/4	3,58	2,35	1

Wie viel Energieeffizienzsteigerung ist möglich und welche Rolle spielt der Rebound-Effekt? Es besteht ein breiter Konsens darüber, dass die Weiterentwicklung von Energieeffizienz in Deutschland eine wichtige Strategie darstellt, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern. Dennoch erwarten die Stakeholder, dass die Stromnachfrage in Zukunft konstant bleibt oder steigt, obwohl sie eine Steigerung der Energieeffizienz für wünschenswert halten. Der Rebound-Effekt kann hier ein wesentliches Hindernis darstellen. Dieser besteht darin, dass trotz effizienterer Stromnutzung in der Anwendung die Gesamtnachfrage steigt, weil die Anzahl der Anwendungen steigt (z.B. Sorrell et al., 2009). Um diese Einschätzungen zu berücksichtigen, setzten die Effizienzsteigerungen in Bezug auf den Endenergiebedarf im 'continuation' Szenario den historischen Trend von 0,5% pro Jahr fort. In den beiden 'paradigm shift' Szenarien steigt die Energieeffizienz durchschnittlich 2,3% pro Jahr.

Tabelle 3: Überblick über die zentralen Rahmenbedingungen der Szenarien die in dem partizipativen Prozess entstanden sind. GV = Güterverkehr, MS = Modal Split, EE = Erneuerbare Energien, KW = Kraftwerk.

Modell Randbedingung	Continuation	Paradigm Shift	Paradigm Shift+
Entkopplung GV&BIP	Nein	Ja	Ja
ÖV Anteil am MS	konstant	steigend	steigend
Potential EE	mittel	hoch	hoch
Energie Effizienz	mittel	hoch	hoch
Stilllegung Kohle KW	Nein	Ja	Ja
CCS ab 2025	Nein	Ja	Ja
Biokraftstoff Potential	niedrig	niedrig	hoch

Wie viel konventionelle Stromproduktion ist akzeptabel in den nächsten Dekaden? Der Ausstieg aus der Atomkraft bis 2022 verlangt, dass diese Kapazitäten in den nächsten zehn Jahren ersetzt werden.

Die meisten Stakeholder sprechen sich gegen den Neubau von CO<sub>2</sub>-intensiven Kohlekraftwerken aus. Dagegen halten sie den Neubau von Gaskraftwerken für wünschenswert und realistisch, die einerseits weniger CO<sub>2</sub>-intensiv sind, andererseits in der Lage fluktuierende Einspeisekapazitäten auszugleichen (dena, 2010). 47% der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahre 2010 stammen aus Braun- und Steinkohlekraftwerken. Diese vor dem Ende ihrer technischen und ökonomischen Laufzeit stillzulegen und durch Erneuerbare Energien zu substituieren, stellt eine effektive CO<sub>2</sub>-Minderungsoption dar, die allerdings nur wenig diskutiert wird. Obwohl die Stakeholder eine solche Möglichkeit für befürworten, halten sie sie für mäßig realistisch. Im 'continuation' Szenario gibt es daher die Vorgabe, dass die existierenden Kohlekraftwerke nicht vor Ende ihrer technischen Lebensdauer vom Netz genommen werden. Eine breite Anwendung der CCS-Technologie wurde weder als besonders realistisch noch als wünschenswert beurteilt. Sie ist daher im Modell nur im 'paradigm shift+' Szenario ab 2025 verfügbar.

Modell Randbedingung	Continuation	Paradigm Shift	Paradigm Shift+
Entkopplung GV&BIP	Nein	Ja	Ja
ÖV Anteil am MS	konstant	steigend	steigend
Potential EE	mittel	hoch	hoch
Energie Effizienz	mittel	hoch	hoch
Stilllegung Kohle KW	Nein	Ja	Ja
CCS ab 2025	Nein	Ja	Ja
Biokraftstoff Potential	niedrig	niedrig	hoch

Tabelle 3: Überblick über die zentralen Rahmenbedingungen der Szenarien die in dem partizipativen Prozess entstanden sind. GV = Güterverkehr, MS = Modal Split, EE = Erneuerbare Energien, KW = Kraftwerk.

## 4. Szenarienergebnisse

Das Modell REMIND-D sucht nach einer optimalen Lösung innerhalb der jeweiligen Rahmenbedingungen der Szenarien und hält gleichzeitig ein Emissionsbudget von 16 Gt CO<sub>2</sub> ein. Alle Szenarien erreichen eine 85% CO<sub>2</sub> Emissionsreduktion bis 2050 im Vergleich zu 1990 und bestätigen damit, dass ambitionierte nationale Klimaschutzziele in Deutschland technisch machbar sind. Dennoch zeigen die im Folgenden dargestellten Ergebnisse der Szenarien, dass diese Ziele durch einen carbon lock-in gefährdet sind, wenn sich die historischen Entwicklungen im Fracht- und Stromsektor fortsetzen, was von den Stakeholdern unter gegebenen Umständen als realistisch angesehen wird.

### 4.1. CO<sub>2</sub> Emissionen nach Sektor

Die drei Sektoren Transport, Strom und Wärme tragen unterschiedlich stark zur Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoß' in den drei Szenarien bei, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die y-Achse zeigt den jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Mt CO<sub>2</sub> an, auf der x-Achse sind die drei Sektoren in den

jeweiligen Szenarien aufgetragen. Unterschiedliche Jahre sind farblich markiert. Erstens lässt sich aus Abbildung 1 ablesen, in welchem Verhältnis die Sektoren in einem Szenario stehen, hervorgehoben durch die Verbindungslinien für 2005, 2020 und 2050. Zweitens kann die Entwicklung der Sektoren in unterschiedlichen Szenarios im Zeitverlauf verglichen werden. Und drittens wird die Geschwindigkeit der Veränderung angezeigt: Umso größer die weißen Abschnitte in den Balken sind, desto schneller ist die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion in dem Zeitabschnitt. Die Emissionsreduktion zwischen 2005 und 2015 verläuft in allen Szenarien ähnlich – eine schnelle Senkung der Emissionen von 29-32% im Stromsektor, ebenfalls 29-32% im Wärmesektor bei Industrie, privaten Haushalten und Gewerbe sowie 4-9% Emissionsreduktion im Transportsektor. Ab 2015 gibt es strukturelle Unterschiede zwischen dem 'continuation' Szenario und den beiden 'paradigm shift' Szenarien. Die Geschwindigkeit der Emissionsreduktion im Stromsektor stagniert im 'continuation' Szenario aufgrund der Laufverpflichtung für existierende Braun- und Steinkohlekraftwerke. Zusätzliche sogenannte 'committed emissions', die aus den Szenariovorgaben hervorgehen, entstehen im 'continuation' Szenario durch das festgesetzte Wachstum des LKW-Verkehrs.

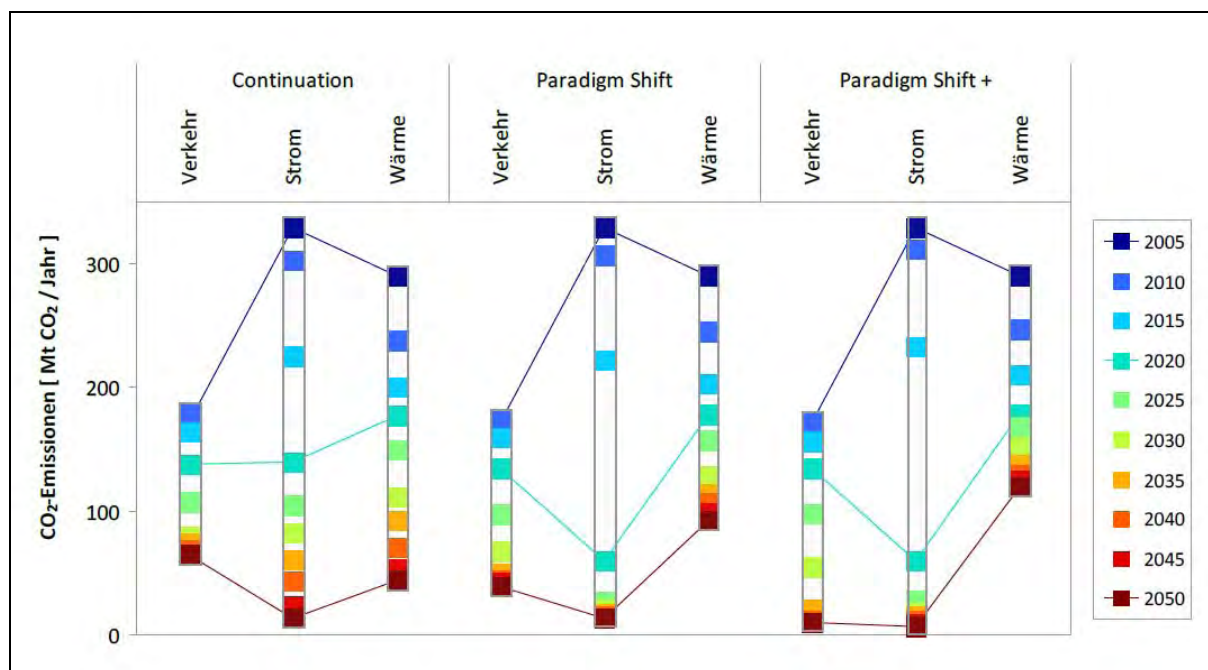


Abbildung 1: Jährliche energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland von 2005-2050 in Mt pro Jahr, nach Szenarien und Sektoren. Diese Modellergebnisse wurden mit REMIND-D gewonnen.

Der gesamte carbon lock-in im Untersuchungszeitraum von 2005 bis 2050 beträgt 6,15 Gt CO<sub>2</sub> infolge von Kohleverstromung und 2,67 Gt CO<sub>2</sub> durch Frachtverkehr auf Basis von fossilen Kraftstoffen. Gemeinsam verbrauchen diese 8,8 Gt CO<sub>2</sub> 55% des gesamten Emissionsbudgets. Daraus folgt, dass der Wärmesektor im 'continuation' Szenario einen wesentlich höheren Anteil zur CO<sub>2</sub> Emissionsreduktion beitragen muss, um das Emissionsbudget einzuhalten, als dies in den beiden 'paradigm shift' Szenarien der Fall ist. In diesen sinken die CO<sub>2</sub>-Emission im Stromsektor wesentlich schneller: 80% zwischen 2005 und 2020. Deshalb können mehr Emissionen im Wärmesektor anfallen, die durch die Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie und für Haushalte entstehen. Dieser strukturelle Effekt zeigt sich besonders stark im 'paradigm shift+' Szenario: Hier führt die Verfügbarkeit von neuen Emissionsarmen Technologien zu einer nahezu vollständigen

Dekarbonisierung des Strom- und Frachtsektors bis 2035. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Vorteile eines integrierten Ansatzes bei der Modellierung von CO<sub>2</sub>-Minderung, der es ermöglicht die Wechselwirkung von unterschiedlichen Sektoren zu analysieren.

## 4.2. Transportsektor

Im 'continuation' Szenario verringern sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Transportsektors bis 2050 um 47% im Vergleich zu 2005, im 'paradigm shift' Szenario um 73% und im 'paradigm shift+' um 93%. Der Großteil der jährlichen Minderungen geschieht in den nächsten zwei Dekaden, allerdings unterschieden sich Einflussfaktoren in den Szenarien. In den beiden 'paradigm shift' Szenarien kommt es zu strukturellen Veränderungen des Modal-Splits.

In allen Szenarien bleibt der Binnenschiffsverkehr konstant, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Im 'continuation' Szenario bleibt auch der Schienengüterverkehr auf dem heutigen Niveau, während der LKW Verkehr kontinuierlich steigt, entsprechend der Modellvorgaben, die eine Kopplung von BIP und Frachtverkehrswachstum abbilden. In der Konsequenz verbleiben die Emissionen bei 60-70 Mio. t CO<sub>2</sub>, da CO<sub>2</sub>-ärmere Kraftstoffe in diesem Szenario ebenfalls kaum verfügbar sind. Diese 'committed emissions' werden in den beiden 'paradigm shift' Szenarien vermieden. Die Fahrleistung des Frachtverkehrs bleibt auf heutigem Niveau, weil die es zu einem Strukturwandel hinzu weniger Transport-intensiven Wertschöpfungsketten kommt. Zudem wird die CO<sub>2</sub>-Minderung vorangetrieben durch einen massiven Ausbau der Schieneninfrastruktur, sodass sich die Zugfahrleistung bis 2030 verdreifacht kann. Im 'paradigm shift+' Szenario ist die Fahrleistung von LKW permanent höher als im 'paradigm shift' Szenario, weil alternative Kraftstoffe mit niedrigen Emissionen verfügbar sind, beispielsweise Biokraftstoffe der 2. Generation oder Verflüssigung von Braunkohle in Kombination mit CCS. Der Personenverkehr pro Kopf sinkt in den beiden 'paradigm shift' von 13000 km im Jahr 2005 auf 11000 km im Jahr 2050. Aus den Einschätzungen der Stakeholder geht hervor, dass ein Teil dieser Differenz durch nicht-motorisierte Verkehrsmittel, das heißt zu Fuß oder per Fahrrad, ausgeglichen wird. Im 'continuation' Szenario bewirkt der carbon lock-in im Güter- und Stromsektor, dass die p-km pro Kopf bis 2050 auf 9000 km sinken müssen.

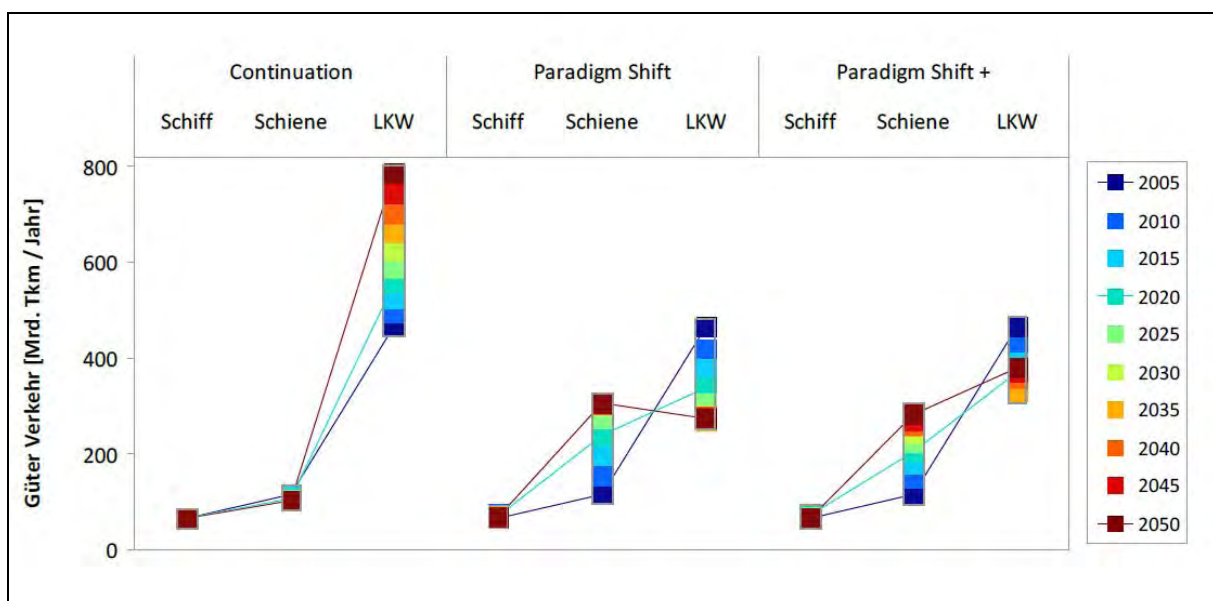


Abbildung 2: Jährliche Frachttransport Fahrleistung von 2005-2050 in Mrd. t-km pro Jahr, nach Szenario und Verkehrsträger. Diese Ergebnisse wurden mit REMIND-D gewonnen.

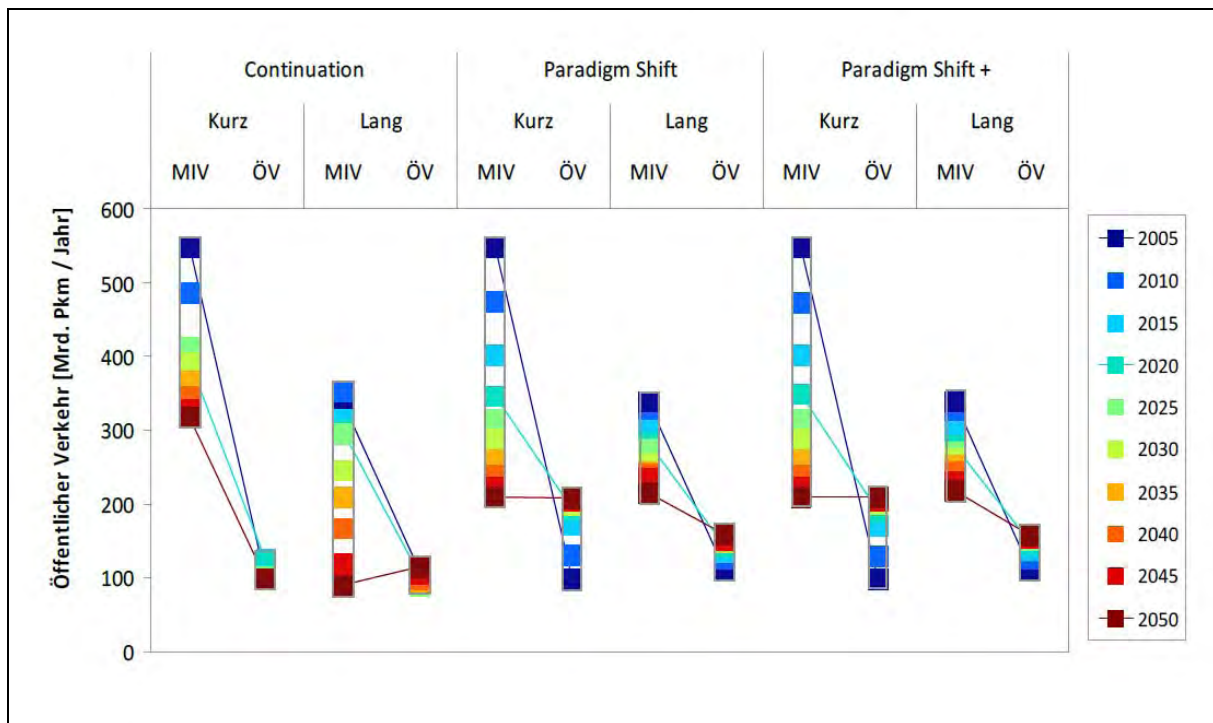


Abbildung 3: Jährliche Personenverkehrs Fahrleistung für 2005-2050 in Mrd. p-km pro Jahr, nach Szenario und Verkehrsträger. Diese Ergebnisse wurden mit REMIND-D erzielt.

Die Gesamtpersonenkilometer nach Verkehrsträger in jedem Szenario sind in Abbildung 3 dargestellt. Der Strukturwandel in den beiden 'paradigm shift' Szenarien wird hier offensichtlich: Der MIV nimmt bis 2050 ab, der ÖV steigt kontinuierlich bis 2020 und bleibt danach konstant. Hybridbusse, S-Bahnen und Regionalzüge werden auf kurzen Distanzen immer wichtiger. Zusammen tragen sie bis 2050 zu ca. 50% des Modal-Splits auf kurzen Entfernungen bei. Zusätzlicher ÖV auf weiten Strecken wird durch Züge (elektrisch) bereitgestellt. In allen Szenarien führen die Emissionsbudgetrestriktionen und der CO<sub>2</sub>-Preis dazu, dass der Einsatz von konventionell betriebenen Autos zu teuer wird. Sie werden bis 2030 komplett vom Markt genommen. Dieselaautos, die vor allem für lange Distanzen geeignet sind, werden in allen Szenarien zunächst durch Diesel-Hybride ausgetauscht, dann durch Gas-Hybrid-Autos. Benzinere werden durch Hybrid-plug-in Fahrzeuge mit zusätzlichem Benzinmotor substituiert, das heißt durch Elektroautos, in denen der Benzinmotor dazu dient, die Reichweite zu vergrößern. Im 'paradigm shift+' Szenario werden sie durch Hybride Wasserstoffautos ersetzt. Wasserstoff wird hier durch Lignocellulose mit CCS produziert, was de facto 'negative' Emissionen schafft, da CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnommen wird. In allen Szenarien gibt es den Trend, den Verkehrssektor zu elektrifizieren, was eine mehr als eine Verzehnfachung des Strombedarfs bis 2050 darstellt. Dennoch bleibt der Strombedarf des Verkehrssektors unter 15% der gesamten Stromproduktion.

### 4.3. Stromsektor

Abbildung 4 zeigt den aggregierten Technologiemiix des Stromsektors für die drei Szenarien. In den beiden 'paradigm shift' Szenarien gibt es die Option die bestehenden Stein- und



Braunkohlekraftwerke ab 2015 still zu legen. Bis 2020 sind diese Kapazitäten herunter gefahren. Zeitweise werden sie ersetzt durch Gasturbinen, hier werden Kapazitäten von ca. 25 GW zwischen 2015 und 2020 zugebaut. Ab 2030 stellen die EE ausreichend Kapazitäten bereit, sodass auch die Gasturbinen wieder vom Netz gehen. Im 'continuation' Szenario gibt es keinen temporären Zubau von Gasturbinen, da die existierenden Kohlekraftwerke weiterhin Strom produzieren. In allen Szenarien nimmt die erneuerbare Energieproduktion schnell zu und verdoppelt sich in den nächsten fünf Jahren.

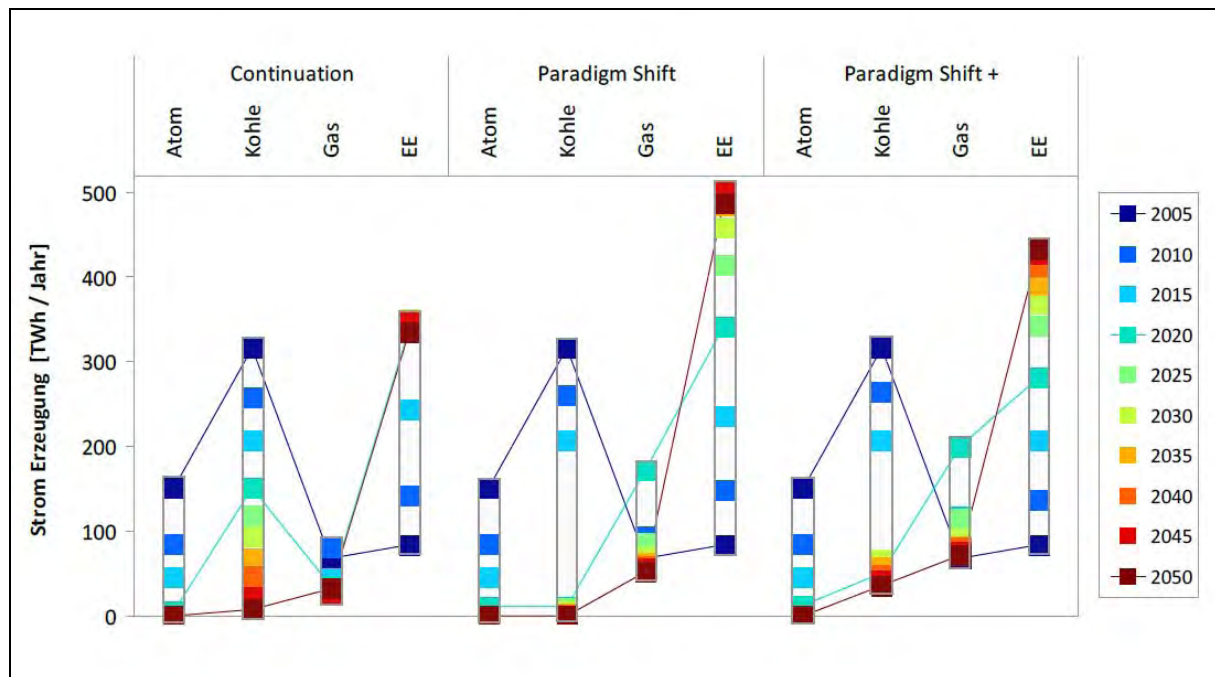


Abbildung 4: Jährliche Stromproduktion für 2005-2050 in MWh pro Jahr, nach Szenario und aggregierten Technologie.

Im 'continuation' Szenario stagnieren die EE-Kapazitäten ab 2020. Dies ist begründet in den geringen Potentialannahmen in der Szenariodefinition, die auf einer zurückhaltende öffentliche Meinung bzgl. des Zubaus von EE und Übertragungsleitungen basieren. Die Gesamtstromproduktion muss von 2005 bis 2050 von 620 MWh auf 375 MWh zurückgehen. Der carbon lock-in durch den Frachtverkehr und die Verstromung von Kohle führt dazu, dass das Modell kein weiteres CO<sub>2</sub> aus dem Emissionsbudget dem Stromsektor für den Betrieb von Gasturbinen zuteilen kann. Im 'continuation' Szenario werden aus diesem Grund die Potentiale von Solarenergie nicht vollständig genutzt, das es nicht möglich ist, Gasturbinen zu betreiben, die die fluktuierenden Kapazitäten des Solarstroms ausgleichen. Im Gegenzug entscheidet REMIND-D für die unattraktivste Form der CO<sub>2</sub>-Minderung: Es zwingt alle Sektoren dazu, ihren Strombedarf zu senken, inklusive der Industrie. Eine Konsequenz davon ist ein geringeres BIP-Wachstum.

In den beiden 'paradigm shift' Szenarien nehmen die Kapazitäten aus Erneuerbaren Energien kontinuierlich zu, insbesondere aus offshore Windanlagen. Die Stromproduktion stabilisiert sich zwischen 530 und 560 MWh. Die leicht gesunkene Nachfrage entsteht durch stark steigende Effizienzraten. 2050 erreichen onshore Windanlagen eine maximale Kapazität von 100 GW. Offshore Wind erreicht eine Kapazität von 150 GW im 'paradigm shift' Szenario und 180 GW im 'paradigm shift+' Szenario. Mit 20-35 GW installierter Kapazität spielt auch

geothermische Energie in allen Szenarien eine zentrale Rolle. Im 'continuation' Szenario werden bis 2050 Solaranlagen mit einer Kapazität von 110 GW installiert. In den beiden 'paradigm shift' Szenarien generieren kostengünstigere Technologien, z.B. Wind off- und onshore, hinreichend Elektrizität, sodass Solarenergie eine geringere Rolle spielt. Die Stromerzeugung aus Biomasse bleibt in allen Szenarien gering, da REMIND-D die verfügbare Biomasse zur Kraftstoffproduktion nutzt. Im 'paradigm shift+' Szenario werden Braunkohlekraftwerke mit Oxyfuel CCS Technologie in Höhe von 14 GW zugebaut sowie 25 GW aus Gas- und Dampfturbinenkraftwerken mit CCS. Im Vergleich zum 'paradigm shift' Szenario senken diese Kapazitäten den Bedarf für weitere EE-Kapazitäten.

#### 4.4. Kosten der CO<sub>2</sub>-Reduktion

Eine Kenngröße für die ökonomischen Kosten von CO<sub>2</sub>-Reduktion ist der kumulierte Unterschied von BIP-Verlusten, bei Szenarien, die dieselben Rahmenbedingungen außer dem CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget haben. Die makroökonomischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten in Form von kumulativen BIP-Verlusten für das 'continuation', das 'paradigm shift' und das 'paradigm shift+' Szenario betragen 3,5%, 1,4% und 0,8% zwischen 2005 und 2050. Das Referenzszenario mit einem größeren Emissionsbudget erreicht eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von 40-45% im Jahr 2050 im Vergleich zu 1990. Abbildung 5 zeigt, inwiefern unterschiedliche strikte Emissionsbudget zu unterschiedlich starken kumulativen BIP-Verlusten führen. Auf der x-Achse sind die 2050 erreichte CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion im Vergleich zu 1990 abgetragen. Für moderate Reduktionsziele bis zu 65%, bleiben die BIP-Verluste in allen Szenarios unter 0,5%. Kosten für die CO<sub>2</sub>-Minderung in dieser Größenordnung wurden auch von globalen Integrated Assessment Modellen errechnet (z.B. Edenhofer et al., 2010; Luderer et al., 2012).

Im Fall von ambitionierteren Reduktionszielen steigen die Minderungskosten im 'continuation' Szenario relativ schneller als in den beiden 'paradigm shift' Szenarien. Diese Abweichung beruht auf den unterschiedlichen Szenarioannahmen.

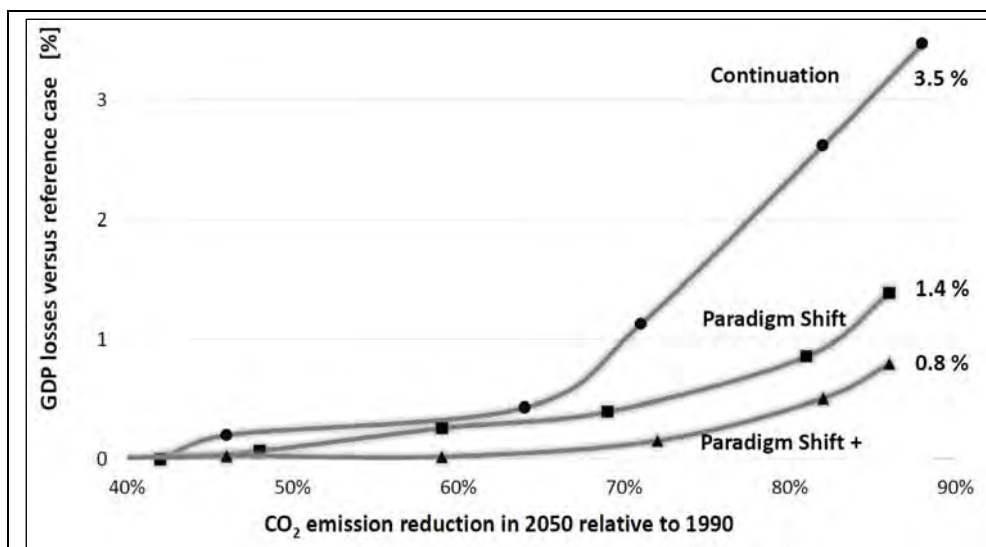


Figure 1:

Abbildung 5: Die Kosten von CO<sub>2</sub>-Reduktion, ausgedrückt in BIP-Verlusten im Vergleich zu einem Referenzszenario mit 40-45% Emissionsreduktion im Jahr 2050. Diese Modellergebnisse wurden mit REMIND-D gewonnen.

Die wesentliche Triebkräfte für steigende BIP-Verluste im 'continuation' Szenario sind die moderaten Effizienzsteigerungen und die endogenen bestimmten Nachfrageabnahmen durch den erwähnten carbon lock-in im Fracht- und Stromsektor. Die BIP-Verluste im 'paradigm shift' Szenario bleiben für alle Reduktionsziele signifikant geringer. Die Gründe dafür sind die höheren Effizienzsteigerungen in allen Sektoren, größeres EE-Potential und die Möglichkeit, den carbon lock-in zu vermeiden. Im Sinne einer sparsamen Erzählung bedeuten diese Ergebnisse, dass ambitionierte Emissionsreduktionsziele in Deutschland mit relativ geringeren Kosten zu erreichen sind, wenn strukturelle Änderungen im Modal-Split des Güter- und Personenverkehrs und eine schnelle Dekarbonisierung des Stromsektors forciert werden. Die Reduktionskosten im 'paradigm shift+' Szenario bleiben sind sogar noch geringer für alle Emissionsziele. Dies ist möglich durch die Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-Reduktionstechnologien wie CCS und einem größeren Bio-Kraftstoffpotential. Allerdings ist dieser zusätzliche Effekt nicht so entscheidend wie der Unterschied zwischen dem 'continuation' und dem 'paradigm shift' Szenario.

## 5. Szenarienevaluation

Die Stakeholder hielten drei angenommene Entwicklungen im 'continuation' Szenario für unrealistisch: Erstens legen die Modellergebnisse eine starke Abnahme des MIV nahe, der nicht durch mehr ÖV ausgeglichen wird. Für eine solche umfangreiche Verhaltensänderung würde ein enormes Eingreifen des Staates nötig, beispielsweise durch eine CO<sub>2</sub>-Preispolitik, die zu sehr hohen Transportkosten führt. In dieser Welt wäre individuelle Mobilität ein Luxusgut. Die Stakeholder bemerkten, dass eine solche Politik keine soziale Akzeptanz finden würde und betonten den Wert von individueller Mobilität in modernen Gesellschaften. Zweitens merkten sie an, dass die benötigte Reduktion der Nachfrage nach Strom und Wärme politisch nicht durchsetzbar wäre. Auch hierfür ist eine rigorose CO<sub>2</sub>-Preispolitik nötig, die den Preis von Strom und Wärme erhöht. Einige Stakeholder betonten die Gefahr einer mangelnden Energieversorgung, wenn CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen nicht durch effektive Verteilungssysteme gestützt werden. Drittens zweifeln die Stakeholder, dass die vorhergesehenen CO<sub>2</sub>-Reduktionen und Effizienzsteigerungen im Wärmesektor umgesetzt werden können. Hier gibt es zu viele institutionelle Hindernisse, beispielsweise den bekannten Streit um die Verantwortung zwischen Vermieter und Mieter. Zusammengefasst haben diese Faktoren dazu geführt, dass die Stakeholder das 'continuation' Szenario nicht für wünschenswert befunden haben, obwohl es die Emissionsrestriktionen einhält. Dennoch bestätigten sie seine Prognosen bezüglich der Entwicklung im Fracht- und Stromsektor, die zu einer Verfestigung des derzeitigen Verhaltens und einer CO<sub>2</sub>-intensiven Infrastruktur führt. Für den Fall, dass eine solche lock-in Situation tatsächlich eintritt, folgern sie, dass die ambitionierten Reduktionsziele nicht mehr erreicht werden können.

In den 'paradigm shift' Szenarien kommt es nicht zu einem carbon lock-in. Die Stakeholder bevorzugen das 'paradigm shift' Szenario gegenüber dem 'paradigm shift+' Szenario, weil sie öffentliche Proteste gegen die Anwendung von CCS-Technologie und Bio-Kraftstoffproduktion in großem Maßstab vorhersehen. Sie argumentieren, dass die sinkenden Reduktionskosten nicht die direkten und indirekten Kosten für öffentlichen Protest aufwiegen. Sie äußerten zugleich einige Zweifel an Richtlinien, die strukturelle Änderungen von historischen Trends hervorrufen wollen, wie es im 'paradigm shift' Szenario

vorgesehen ist. Die Qualität von ÖV muss sich sowohl in städtischen und ländlichen Regionen erheblich verbessern. Dies hieße unter anderem, Investitionen in Infrastruktur von der Straße zur Schiene umzuverteilen, was für die Stakeholder seit langen überfällig ist. Darüber hinaus äußerten sie Bedenken hinsichtlich der Stilllegung von existierenden Kohlekraftwerken, die in den strukturschwachen Kohleregionen zu steigender Arbeitslosigkeit führen könnte. Den schnellen Ausbau von EE-Kapazitäten und Übertragungsnetzen halten sie für sozial akzeptabel – wenn Verfahrensgerechtigkeit im gesamten Prozess garantiert ist. Diese bedeutet jedoch einen transparenten Planungs- und Bauprozess sowie institutionalisierte Partizipationsmöglichkeiten für die Menschen vor Ort. Um dies zu erreichen müssen verschiedene Politikbereiche mehr verflochten werden und ihre gegensätzlichen Ziele aufeinander abstimmen.

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Diese Studie stellt drei modellbasierte ambitionierte Klimaschutz-Szenarien für Deutschland dar. Alle drei Szenarien erreichen im Jahre 2050 85% weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990. Diese Szenarien wurden in einem partizipativen Prozess mit Stakeholdern aus zivilgesellschaftlichen Organisationen und Industrie der Bereiche Transport und Elektrizität definiert und bewertet. Während des Dialogs wurden ihre Präferenzen bezüglich zukünftiger Reduktionsoptionen diskutiert und herausgestellt. Zusammen mit Erkenntnissen aus der Literatur bildet der Beitrag der Stakeholder die Basis, um Szenarien Bausteine für mögliche zukünftige Ausrichtungen von Schlüsselvariablen im Transport- und Elektrizitätssektor zu erbringen.

Das 'continuation' Szenario wird durch eine Reihe von Entwicklungen bestimmt, die von allen Teilnehmern als eher wahrscheinlich aber nicht unbedingt als wünschenswert eingestuft wurden. Diese beinhalten beispielsweise die Dominanz des motorisierten Individualverkehrs (MIV), unverminderte Elektrizitätsproduktion mittels Kohle und nur moderate Erfolge bei der Energieeffizienz. Des Weiteren wird die in der Vergangenheit beobachtete Kopplung von BIP-Wachstum und Wachstum des Güterverkehrs fortgeführt. In diesem Szenario sorgen allein die Stromproduktion durch Kohlekraftwerke und der fossile Kraftstoffverbrauch des Güterverkehrs für 8,8 Gt CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050. Dies macht 55 Prozent des gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets aus, welches bis zum Jahr 2050 emittiert werden kann. Um das gesamte CO<sub>2</sub>-Budget nicht zu überschreiten, werden in Folge dessen nicht-technische Minderungsoptionen, wie zum Beispiel ein geringeres BIP-Wachstum, von REMIND-D genutzt. Auch müsste in Folge der hohen Emissionen des Frachtverkehrs und der Kohlekraftwerke eine signifikante Reduktion des Personenverkehrs stattfinden. Gleichzeitig muss der Bedarf an Wärmeenergie drastisch fallen; der Gebäudesektor muss also die Emissionen im Verkehrssektor kompensieren, damit das Gesamtziel noch erreicht werden kann. Hierdurch werden im 'continuation' Szenario die höchsten volkswirtschaftlichen Verluste produziert. Diese belaufen sich 3,5 Prozent weniger BIP im Vergleich zu einem Referenzfall, in welchem lediglich 40 Prozent CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion in 2050 im Vergleich zu 1990 erreicht werden.

Die beiden 'paradigm shift' Szenarien stellen zukünftige Entwicklungen dar, die von den teilnehmenden Stakeholdern als erstrebenswert angesehen wurden. Sie beinhalten eine Reduzierung des gesamten Kraftstoffverbrauchs im Güterverkehr und eine deutliche

Verschiebung des Güterverkehrs hin zur Schiene. Auch im Personenverkehr findet hier eine deutliche Zunahme von öffentlichem und nicht motorisiertem Verkehr statt. Der Anteil des MIV an der zu Lande erbrachten Personenverkehrsleistung nimmt hier von 80 Prozent im Jahr 2010 auf 50 Prozent im Jahr 2050 ab.

Im Stromsektor kommt es zu einem schnellen und umfangreichen Einsatz der Erneuerbaren Energien, und die konventionelle Stromerzeugung aus Kohle wird bis 2020 schrittweise abgebaut. Hierfür ist ein schneller Ausbau der Netzkapazitäten notwendig und angenommen. In den 'paradigm shift' Szenarien spielen Energieeffizienz-Steigerungen eine relevante Rolle. Das Model REMIND-D nutzt die vorhandenen Reduktionsoptionen und erreicht damit eine Kostenreduzierung um mehr als die Hälfte (1,4 Prozent des gesamten BIP) im Vergleich zum 'continuation' Szenario.

Im 'paradigm shift+' Szenario werden zusätzlich eine Nutzung von CCS und ein größeres Potential von Bioenergie zugelassen. Hierdurch reduzieren sich die Kosten auf 0,8 Prozent des BIP. Allerdings waren viele Stakeholder der Zivilgesellschaft skeptisch, ob diese beiden Technologien wünschenswert und akzeptiert sind.

Hieraus können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ✦ Die Modellergebnisse bestätigen, dass ein ambitioniertes deutsches CO<sub>2</sub>-Emissions Reduktionsziel von 85 Prozent im Jahr 2050 gegen 1990 technisch möglich ist. Klar wird jedoch auch, dass es ohne umfangreichen sozialen und politischen Wandel weitaus schwieriger wird, die ambitionierten Reduktionsziele zu erreichen.
- ✦ Die Stakeholder-Dialoge offenbarten große Unterschiede in der Einschätzung der möglichen und den erstrebenswerten Entwicklungen im Verkehrs- und Stromsektor. Es wurde als wahrscheinlich, wenn auch nicht gewünscht angesehen, dass Fracht verstärkt mit fossilen Brennstoffen transportiert wird und weiterhin Kohle verstromt wird. Dies könnte zu einem Lock-In Effekt führen, der 8,8 Gigatonnen CO<sub>2</sub> bis 2050 verursacht, und mit 55 Prozent den Großteil des Emissionsbudgets ausmacht.
- ✦ Die Modellergebnisse zeigen, dass das Durchsetzen von ambitionierten Reduktions-Zielen angesichts dieses 'lock-in' von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu einer Bremse für das wirtschaftliche Wachstum würde und erhebliche Kostensteigerungen mit sich bringen würde. Um dieses Dilemma zu verhindern, muss der 'lock-in' in CO<sub>2</sub>-intensive Technologien verhindert werden und gleichzeitig die Wachstumsraten von Energieeffizienz und Erneuerbare Energien stark steigen.
- ✦ Die teilnehmenden Stakeholder zeigen klar auf, dass bedeutende Paradigmenwechsel notwendig sind, um den 'lock-in' von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verhindern. Hierzu braucht es konzertierten politischen als auch gesellschaftlichen Willen.

## 7. Bibliographie

Bauer, N., Baumstark, L., Haller, M., Leimbach, M., Luderer, G., Lueken, M., Pietzcker, R., Streer, J., Ludig, S., Koerner, A., Giannousakis, A., Klein, D. (2011): REMIND: The equations. Tech. rep., Potsdam Institute for Climate Impact Research.

Bauer, N., Edenhofer, O., Kypreos, S. (2008): Linking energy system and macroeconomic growth models. *Journal of Computational Management Science* 5, 95-117.

BMVBS (Ed.) (2008): Verkehr in Zahlen 2008/2009. DVV Media Group.

Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Tech. rep.

dena (2010): dena Grid Study II - Integration of Renewable Energy Sources in the German Power Supply System from 2015 - 2020 with an Outlook to 2025. Tech. rep., Deutsche Energie-Agentur.

EC (2011): WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system. Tech. rep., European Commission.

ECF (2010): Roadmap 2050 A practical guide to a prosperous, low carbon Europe. Tech. rep., European Climate Foundation.

Edenhofer, O., Knopf, B., Barker, T., Baumstark, L., Bellevrat, E., Chateau, B., Criqui, P., Isaac, M., Kitous, A., Kypreos, S., Leimbach, M., Lessmann, K., Magné, B., Scriciu, S., Turton, H., van Vuuren, D. (2010): The Economics of Low Stabilization: Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs. *The Energy Journal* 31 (Special Issue 1).

Ethics Commission for a Safe Energy Supply (2011): Germany's energy transition - A collective project for the future. Tech. rep.

European Commission (2011): Impact Assessment accompanying document to 'A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050'. Tech. rep., Communication of the European Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.

European Parliament and the European Council (2009): Decision No 406/2009/EC of the European Parliament and of the Council.

Feige, I. (2007): Transport, Trade and Economic Growth - Coupled or Decoupled? Springer, Berlin Heidelberg.

Fischedick, M., Nitsch, J., Ramesohl, S. (2005): The role of hydrogen for the long term development of sustainable energy systems- a case study for Germany. *Solar Energy* 78 (5), 678-686.

Holzhey, M. (2010): Schienennetz 2025/2030; Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland. Tech. rep., Umweltbundesamt.

Kirchner, A., Matthes, F. C., Ziesing, H.-J. (2009): Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Tech. rep., Prognos AG & Öko-Institut.

- Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Moss, R. H., Lempert, R., Wilbanks, T. J. (2010): Socioeconomic Scenario Development for Climate Change Analysis. CIRED Working Paper Series No 2010-23.
- Leimbach, M., Bauer, N., Baumstark, L., Edenhofer, O. (2010): Mitigation Costs in a Globalized World: Climate Policy Analysis with REMIND-R. Environmental Modeling and Assessment 15, 155-173.
- Lenz, B., Lischke, A., Knitschky, G., Adolf, J., Ceng, F. B., Stöver, J., Leschus, L., Bräuninger, M. (2010): Shell Lkw-Studie - Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Tech. rep., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) and Shell Deutschland and Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI).
- Likert, R. (1932): A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology 140, 1-55.
- Luderer, G., Bosetti, V., Jakob, M., Leimbach, M., Steckel, J., Waisman, H., Edenhofer, O. (2012): The economics of decarbonizing the energy system - results and insights from the recipe model intercomparison. Climatic Change Online First, 1-29.
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S. C. B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D. J., Allen, M. R. (2009): Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. Nature 458 (7242), 1158-1162.
- Meyerhoff, J., Ohl, C., Hartje, V. (2010): Landscape externalities from onshore wind power. Energy Policy 38 (1), 82-92.
- Musall, F. D., Kuik, O. (2011): Local acceptance of renewable energy - A case study from southeast Germany. Energy Policy 39 (6), 3252-3260.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T., Kram, T., La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z. (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Sterner, M., Gerhardt, N., von Oehsen, A., Pape, C., Saint-Drenan, Y.-M., Wenzel, B. (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global 'Leitstudie 2010'. Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Nitsch, J., Wenzel, B. (2009): Leitszenario 2009 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland. Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Renn, O. (1999): A Model for an Analytic-Deliberative Process in Risk Management. Environmental Science & Technology 33 (18), 3049-3055.
- Renn, O., Bettzüge, M. O., Biermann, F., Böhm, M., Edenhofer, O., Erdmann, G., Grunwald, A., Jäger, C., Jungermann, H., Klepper, G., Leggewie, C., Messner, D., Nida-Rümelin, J., Radkau, J., Reh binder, E., Reisch, L., Schmidt-Aßmann, E., Schneider, J.-P., Schreurs, M., von Weizsäcker, C. C., Voß, A., Wicke, L., Zürn, M. (2011): Die Bedeutung der Gesellschafts- und

Kulturwissenschaften für eine integrierte und systemisch ausgerichtete Energieforschung. Tech. rep., German Academies of Science.

Schlesinger, M., Lindenberger, D., Lutz, C. (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesrepublik Deutschland. Projekt Nr. 10/12 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technik (BMWi). Tech. rep., Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (ewi) and Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (gws).

Schmid, E., Knopf, B., Bauer, N. (2011): REMIND-D: A Hybrid Energy- Economy Model of Germany. Submitted to FEEM Working Paper Series.

Schmid, E., Knopf, B., Fink, M., Branche, S. L. (2012): Social Acceptance in Quantitative Low Carbon Scenarios. In: Renn, O., Reichel, A., Bauer, J. (Eds.), Civil Society for Sustainability - A Guidebook for Connecting Science and Society. Europäischer Hochschulverlag, Bremen, estimated publishing date: 03/2012.

Schulz, T. F., Barreto, L., Kypreos, S., Stucki, S. (2007): Assessing wood-based synthetic natural gas technologies using the SWISS-MARKAL model. Energy 32 (10), 1948-1959.

Sorrell, S., Dimitropoulos, J., Sommerville, M. (2009): Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. Energy Policy 37 (4), 1356-1371.

Stern, P., Fineberg, V. (Eds.) (1996): Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society. National Academy Press.

Ueckerdt, F., Brecha, R., Luderer, G., Sullivan, P., Schmid, E., Bauer, N., Böttger, D. (2011): Variable renewable energy in modeling climate change mitigation scenarios. In: Proceedings of the 2011 International Energy Workshop in Standford, US.

UNEP (2010): The Emissions Gap Report. Are the Copenhagen Pledges Sufficient to Limit Global Warming below 2°C or 1.5°C? A preliminary assessment. Technical Summary. Tech. rep., United Nations Environment Programme.

Zoellner, J., Schweizer-Ries, P., Wemheuer, C. (2008): Public acceptance of renewable energies: Results from case studies in Germany. Energy Policy 36 (11), 4136-4141.



# Project Partners



[www.enci-lowcarb.eu](http://www.enci-lowcarb.eu)

