

Felix Creutzig / Ottmar Edenhofer

# Mobilität im Wandel

Wie der Klimaschutz den Transportsektor vor neue Herausforderungen stellt

**Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** empfiehlt eine weltweite Reduktion der Treibhausgasemission von mindestens 50 % bis 2050, um gefährlichen Klimawandel zu vermeiden. Von einer nachhaltigen Senkung der Emissionen ist die Weltwirtschaft jedoch trotz der Finanzkrise noch weit entfernt. Derzeit steigen die Emissionen nämlich weltweit – im Transportsektor sogar schneller als in anderen Sektoren. Eine Vermeidung gefährlichen Klimawandels wird daher nur möglich sein, wenn die Emissionen im Transportsektor weit unter das heutige Niveau abgesenkt werden.

## 1 Einleitung

Ungebremster Klimawandel stellt eine ernsthafte Bedrohung für große Teile der Menschheit dar. Er ist hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger und durch Landnutzungsänderungen verursacht [1]. Neuere Literatur verweist darauf, dass die Herausforderung noch größer ist als 2007 vom IPCC eingeschätzt. So hat etwa die Zuwachsrate an CO<sub>2</sub>-Emissionen im letzten Jahrzehnt bedeutend zugenommen (zu drei Vierteln sind dafür Nicht-OECD-Länder verantwortlich, im Besonderen China) [2] und ist damit höher als von den pessimistischsten IPCC-Szenarien angenommen. Auch dürfte der Anstieg der globalen Mitteltemperatur durch den IPCC unterschätzt worden sein, weil die Erfolge bei der Verringerung der Luftverschmutzung unterschätzt wurden [3]. Eine verminderte Luftverschmutzung reduziert die Aerosole und damit wird dämpfende Wirkung auf die globale Mitteltemperatur zunehmend außer Kraft gesetzt. Darüber hinaus weisen Forschungsergebnisse darauf hin, dass die Aufnahmeeffizienz von CO<sub>2</sub>-Senken, wie etwa den Ozeanen, mittlerweile abnimmt [4]. Schließlich gibt es Hinweise, dass schon eine geringere Temperaturänderung, als sie in den IPCC-Berichten angenommen wurde zu schwerwiegenden globalen Schäden führen kann [5].

Um gefährlichen Klimawandel zu vermeiden, sollte die Temperatur um nicht mehr als 2°C steigen [6]. Wenn sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei 450 ppm stabilisiert, liegt die Chance einer Erwärmung über 2°C hinaus über 50 % [6]. Der derzeitige Entwicklungspfad geht in Richtung 730 bis 840 ppm und bedeutet eine Erwärmung von 3-7 °C [7].

Aus diesen Zahlen wird deutlich, dass eine Abschwächung des Klimawandels nur durch dramatische Emissionsminderungen erzielt werden kann und dass diese möglichst bald und weltweit realisiert werden müssen.

### Die Autoren

Dr. **Felix Creutzig**, felix.creutzig@tu-berlin.de; Prof. **Ottmar Edenhofer**, ottmar.edenhofer@pik-potsdam.de; TU Berlin, ILAUP, EB 4-1, Straße des 17. Juni 145, 10623 Berlin

Daher ist eine genaue Analyse der Ursachen des Emissionsanstiegs ebenso notwendig wie eine Abschätzung der Effizienz von Politikmaßnahmen.

In diesem Artikel wird zunächst die Entwicklung der Treibhausgasemission, im Speziellen die des Transportsektors genauer untersucht. Ebenso werden Vermeidungsszenarien im Transportsektor aufgezeigt, die bestimmten Stabilisierungszielen entsprechen. Schließlich werden mögliche Politikinstrumente zur Steuerung dieser

Emissionen diskutiert. Ein Fließdiagramm dieses Artikels ist in *Abbildung 1* dargestellt.

## 2 Emissionen im Verkehrssektor

Welche Rolle spielt nun der Transportsektor? Der vierte Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 2007 hat festgestellt, dass der Transportsektor 23 % aller energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen produziert; davon entstehen 74 % aller CO<sub>2</sub>-Emission im Straßenverkehr [8]. Es besteht kein Zweifel, dass Emissionen im Transportsektor in der letzten Dekade schneller als in anderen Sektoren angestiegen sind. Öl stellt im Transportsektor mit 95 % aller Emissionen die dominierende fossile Ressource dar (Benzin: 47 %, Diesel 31 %).

Der wichtigste Grund für den Anstieg von Treibhausgasemissionen ist Wirtschaftswachstum, im Speziellen auch im Transportsektor. Der Großteil der Weltbevölkerung besitzt kein Auto. Mit steigendem Einkommen legt sich die aufstrebende Mittelschicht, beispielsweise in Asien, ein Auto zu, um sowohl steigende Mobilitäts- als auch Statusbedürfnisse zu befriedigen.

Der Frachtverkehr nimmt sogar schneller als individueller motorisierter Verkehr zu. Der Einbruch bei den Exporten wird zwar kurzfristig die weltweiten Emissionen senken; mit zunehmendem Außenhandel, wird der Frachtverkehr jedoch bald sein altes Niveau erreichen und weiter wachsen.

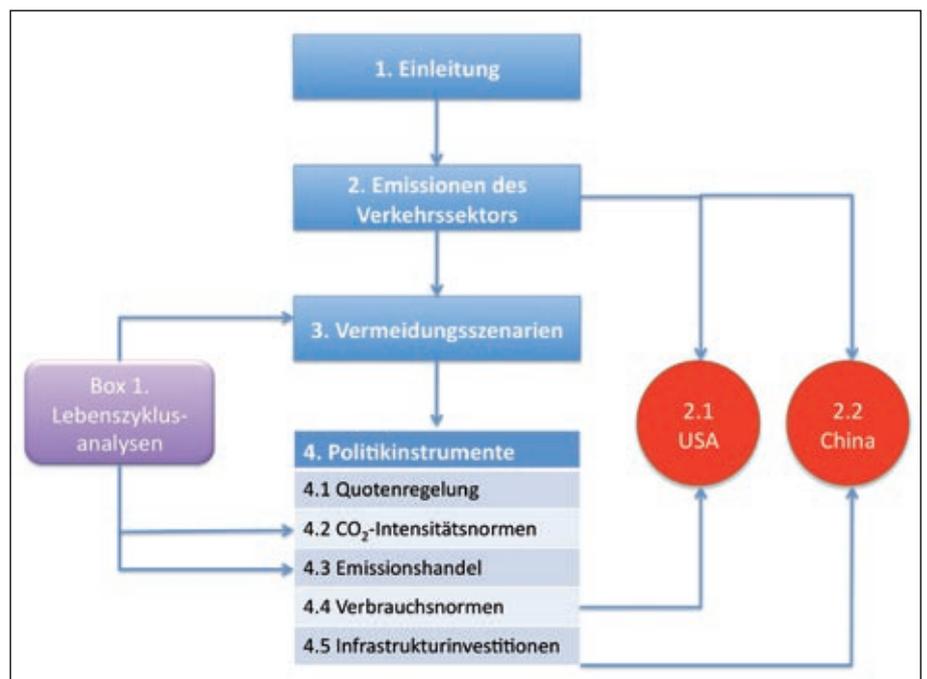


Abb. 1: Struktur dieses Artikels

Der Grund liegt vor allem in der stärkeren internationalen Vernetzung der Märkte, die z. B. eine deutliche Steigerung des Schiffsverkehrs bewirkt.

Wie werden sich die Emissionen des Transportsektors in den nächsten Jahrzehnten entwickeln? Nach dem derzeitigen Trend werden die Emissionen bis 2030 um 50 % und bis 2080 um 80 % steigen [9]. In 2004 entstanden 36 % aller Emissionen in Nicht-OECD-Ländern. Dieser Anteil steigt rapide: Für 2030 wird mit einem Anteil von über 46 % gerechnet. Diese Prognose setzt voraus, dass es zu keiner signifikanten Verminderung von Treibhausgasen kommt. Würde jedoch das 2°C-Ziel umgesetzt, müsste der Elektrizitätssektor vollständig dekarbonisiert werden; lediglich dem Transportsektor könnten noch Emissionen in einer Größenordnung unter dem heutigen Niveau zugestanden werden. Dies macht deutlich, dass eine Dekarbonisierung des Transportsektors der OECD Länder nicht ausreicht, sondern dass es in den Entwicklungs- und Schwellenländern zum Aufbau CO<sub>2</sub>-armer Infrastrukturen kommen muss.

Es ist aufschlussreich, die Rolle von zwei bedeutenden Weltregionen – USA und China – genauer zu analysieren, um zu erkennen, dass die Anforderungen an den Transportsektor höchst unterschiedlicher Natur sein können.

## 2.1 USA: Gewicht und Leistung statt Verbrauchseffizienz

Der Transportsektor spielt in den USA als Ursache für das Emissionswachstum eine größere Rolle als in anderen Weltregionen. Fast genau ein Drittel aller Treibhausgasemissionen (33,1 %) entsteht im Verkehrsbereich [10] – in der EU (19 %) und besonders in aufstrebenden Schwellenländern ist dieser Anteil deutlich kleiner. Mit zwei Gigatonnen jährlich sind die USA auch für etwas weniger als ein Drittel der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Transportsektor verantwortlich. Es wird erwartet, dass dieser Anteil sinkt, weil der Emissionszuwachs in Schwellenländern weitaus stärker steigt. Tatsächlich bewirkten die hohen Benzinpreise des Sommers 2008 und der Beginn der Wirtschaftskrise einen Rückgang der Emissionen des amerikanischen Verkehrssektors um 4,6 % gegenüber dem Jahr 2007 [10].

Woher kommt dieser hohe Anteil? Zum einen sind hier sicherlich geographische, historische und sogar ethische Ursachen zu nennen, die eine flächen- und entfernungsintensive Landnutzung bewirkten, die wiederum motorisierten Individualverkehr nach sich zog. Auch konzentriert sich die US-Verkehrspolitik vor allem auf den Straßenbau, während Investitionen in den öffentlichen Nahverkehr nahezu vernachlässigt wurden. Die bestehende Infrastruktur macht die Umstellung in Richtung nachhaltiger Verkehrssysteme relativ schwierig. Eine Analyse dieses Lock-in-Effekts, aber auch von Lock-out-Effekten ist Teil des Forschungskonzeptes unseres Lehrstuhls.

Zwischen 1990 und 2008 stiegen die Emissionen parallel mit der Transportnachfrage (Personenkilometer) an [10]. In der Tat liegt der Kraftstoffverbrauch (pro Entfernung) der USA deutlich über dem der EU, auch wenn man die Verbrauchswerte auf den gleichen Testzyklus normiert.

Wie lässt sich der recht hohe Kraftstoffverbrauch in den Vereinigten Staaten begründen? Gab es keine technologischen Verbesserungen in der amerikanischen Automobilindustrie? Diese Schlussfolgerung wäre leichtfertig und vor allem voreilig. Die Kraftstoffeffizienz (Entfernung pro Einheit Treibstoff) hat sich zuletzt Ende der 70er Jahre dank der beiden Ölpreiskrisen kräftig verbessert, und stagnierte danach beziehungsweise sank sogar leicht ab. Die Motoreffizienz nahm jedoch weiterhin zu. Im Ergebnis stieg die Leistung der Kraftfahrzeuge um 120 %, und das Gewicht um 30 %. Demnach haben die erhöhten Leistungs- und Gewichtsanforderungen an Fahrzeuge die technische Effizienz neutralisiert.

Es ist lehrreich sich die Gründe dieser Entwicklung genauer anzusehen. Der US-Senat führte in den 70er Jahren als Reaktion auf die Ölkrise Verbrauchsstandards (CAFE) ein. Die Großen Drei aus Detroit (GM, Chrysler, Ford) sahen ihre Marktanteile schwinden, da die japanischen Autohersteller die weitaus effizienteren Fahrzeuge auf den Markt brachten. Mit konzentrierter Lobbyarbeit konnte der Senat dazu gebracht werden, Pickups und andere schwere Fahrzeuge weniger zu besteuern [11]. Die amerikanischen Autohersteller investierten dann in schwere Fahrzeuge mit mehr PS; dadurch manövrierten sie sich eine Sackgasse, die mit dem vorläufigen Zusammenbruch Detroit's 2008/2009 ihr Ende fand. Dies ist ein Beispiel dafür, wie politische Entscheidungen die Richtung des technischen Fortschritts entscheidend mitbestimmen können. Hiermit ergibt sich ein partielles Erklärungsmuster für den hohen Treibstoffverbrauch in den Vereinigten Staaten. Ohne einen politischen Richtungswechsel werden die Emissionen nicht sinken. Wir werden weiter unten auf Verbrauchsstandards als Politikinstrument zurückkehren.

## 2.2 China: Welcher Motorisierungspfad?

China ist mittlerweile der größte Treibhausgasemittent der Welt. In China waren 2006 nur 9 % der Treibhausgasemissionen auf den Verkehrssektor zurückzuführen [12], doch die absolute Emissionsmenge des Transportsektors – und zu geringerem Maße auch sein relativer Anteil – steigen weiter schnell an [9]. Gemäß publizierter Business-as-usual-Szenarien, würde China in 2050 mit 1,4 GT mehr Emissionen im Transportsektor produzieren als die Europäische Union, wohl aber weniger als die Vereinigten Staaten [8, 13]. Auch wenn China aus Gründen der Fairness (historisch akkumulierte Emissionen der OECD-Länder) mit einiger Berechtigung verlangt, dass OECD-Länder zuerst handeln, wird auch die Beteiligung und das Engagement

Chinas zur Abwendung gefährlicher Klimaveränderungen dringend benötigt.

Welche Dynamik weist der Verkehrssektor in China auf? Hier ist es instruktiv, einen genaueren Blick auf den Dreiklang wirtschaftliche Entwicklung, Urbanisierung und Motorisierung zu werfen. Während die Menschen in OECD Ländern zu drei Vierteln in Städten wohnen, sind es in den Entwicklungs- und Schwellenländern nur 40 %. Dies ändert sich jedoch derzeit schnell. China ist schon jetzt weltweit die Nation mit den meisten Stadtbewohnern, und die Anzahl wird bis 2030 von 600 auf 900 Mio. ansteigen [14]. Die Urbanisierung wird teilweise angetrieben von einem rasch anwachsenden Wohlstand, der sich hauptsächlich in den Städten zeigt. Die räumliche Realisierung der Urbanisierung ist dabei höchst relevant: Die Städte dezentralisieren sich, breiten sich also schneller in der Fläche aus, als ihre Einwohnerzahlen wachsen [8, 15]. Das wiederum bedeutet, dass die Verkehrsnachfrage überproportional wächst – und damit einhergehend das steigende Einkommen einen starken Anstieg der Motorisierung hervorruft. Von gleicher Relevanz für die Erklärung der steigenden Nachfrage ist der Wunsch nach Status, der sich am besten durch den Kauf eines Autos erfüllen lässt [16].

Noch ist die Motorisierungsrate unter 50 Autos pro 1000 Einwohner. Die nächsten zehn Jahre werden entscheiden, ob China die Motorisierungsrate Südkoreas oder Japans mit 500 Autos pro 1000 Einwohner erreichen wird oder dem Beispiel Singapurs folgt, in der die Motorisierungsrate mit 100 Autos pro 1000 Einwohnern deutlich geringer ist. Der Nachhaltigkeitscharakter eines solchen Pfades sowie mögliche Politikinstrumente werden weiter unten besprochen.

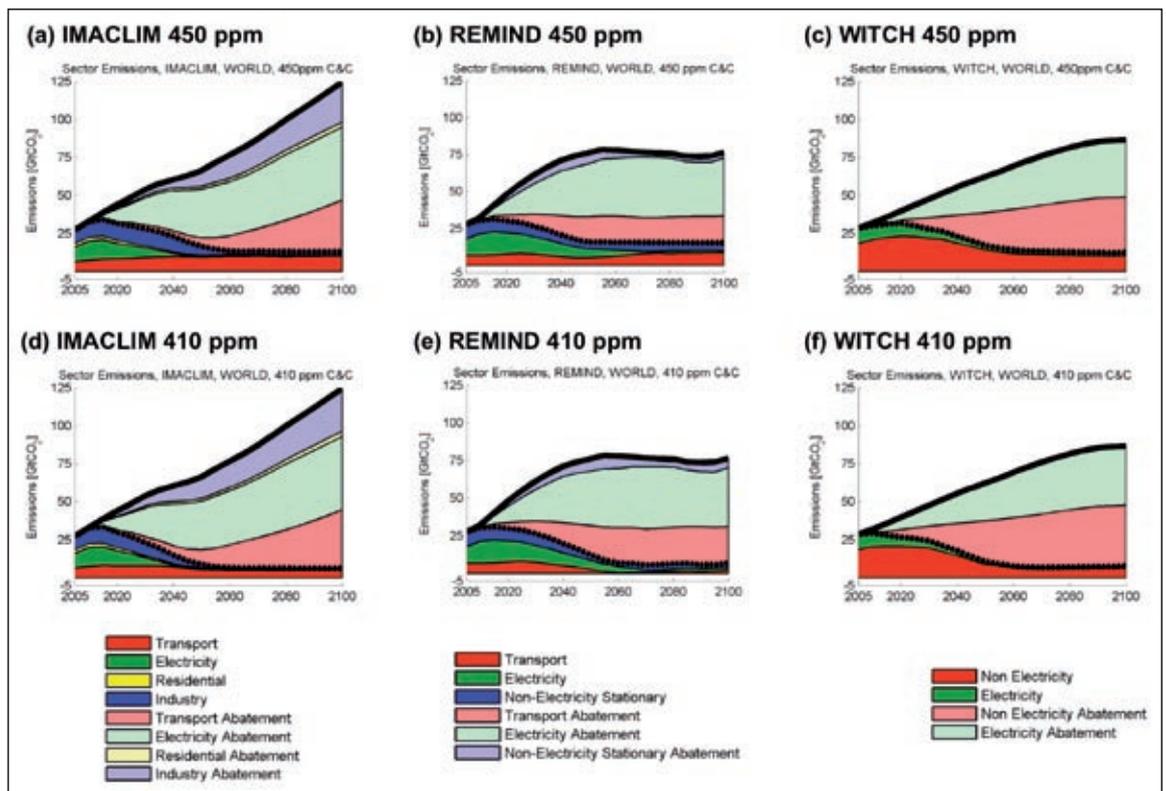
## 3 Vermeidungsszenarien

Welche Möglichkeiten bestehen, den Klimawandel erfolgreich in Grenzen zu halten? Der Bericht des IPCC bietet auch hier eine gute Grundlage. Wir wollen im Folgenden aktuellere Ergebnisse einer Metastudie vorstellen [7].

RECIPE (Report on Energy and Climate Policy in Europe) versucht, optimale und robuste Pfade zu einer CO<sub>2</sub>-armen Ökonomie aufzuzeigen, und beruft sich dabei auf strukturell unterschiedliche energie-wirtschaftliche Modelle, die unter einer Reihe von Annahmen getestet werden. Die Modelle dürfen als elementare Bedingung bestimmte Zielkonzentrationen in der Atmosphäre nicht überschreiten, etwa 450 ppm, damit das 2°C-Ziel mit 50 % Wahrscheinlichkeit erreicht werden kann [6]. In *Abbildung 2* werden diese Vermeidungsspfade unter zwei verschiedenen Szenarien in den verschiedenen energie-wirtschaftlichen Modellen dargestellt. Von Bedeutung in unserem Kontext: In jedem Fall trägt der Transportsektor erheblich zur Verminderung der Gesamtemissionen bei.

Auf welche Art und Weise schaffen diese Modelle eine Verringerung der Emissionen? Das erste Modell, IMACLIM [17],

Abb. 2: Drei verschiedene weltweite Energie-systemmodelle in RECIPE unter zwei alternativen Vermeidungsszenarien. Die obere schwarze Linie entspricht dem BAU-Szenario, die untere schwarze Linie dem Vermeidungspfad. In Hellrot ist der Anteil des Transportsektors angegeben.



behandelt den Transportsektor detailliert. Vermeidung wird hier erreicht durch a) Erhöhung der Energieeffizienz der Kraftfahrzeuge, b) Durchdringung von Plug-In Hybrid Fahrzeugen (PHF) und c) Infrastrukturmaßnahmen, als Ergänzung zu einem Preis auf Treibhausgasmissionen, welche die Transportintensität der Ökonomie verringern. Durch PHF ergibt sich die Möglichkeit, Fahrzeuge mit erneuerbarer Energie, wie etwa Wind und Sonne, anzutreiben.

Im zweiten Modell, REMIND [18], wird die Mitigation in erster Linie über Agrartreibstoffe und CCS (Carbon Capture and Storage) erreicht. Biomasse wird sowohl als Treibstoff als auch zur Produktion von Wasserstoff benutzt. Wasserstoff wird hier auch über Kohle (mit CCS) gewonnen.

Die Modelle sind also bezüglich der verwendeten Technologien sehr unterschiedlich, was an den detaillierten Annahmen über Effizienz und Kosten der verwendete

ten Energieträger liegt. Diese Annahmen sind prinzipiell unsicher, weil die Technologien überwiegend noch nicht im großen Stil erprobt sind. Da diese Annahmen von Bedeutung sind, diskutieren wir diese etwas ausführlicher unter dem Stichwort Lebenszyklusanalyse (vgl. Kasten).

Die Modelle weisen jedoch auch gewichtige Gemeinsamkeiten auf. So zeigen die Modelle deutlich, dass die Kosten eines ehrgeizigen Stabilisierungsziels von

## CO<sub>2</sub>-arme Technologien

# Lebenszyklusanalyse CO<sub>2</sub>-armer Transporttechnologien

Es können zwei Arten von CO<sub>2</sub>-armen Transporttechnologien unterschieden werden. Zum einen solche, die direkt erneuerbare Energien nutzen, etwa Ethanol oder andere Agrartreibstoffe, zum anderen solche, die auf intermediären Speichermedien beruhen, wie Batterien oder Brennstoffzellen.

Agrartreibstoffe können kostengünstiger als konventionelle Treibstoffe sein. Allerdings sind auch diese Treibstoffe im Normalfall nicht emissionsfrei. Verschiedene Prozessierungsschritte sorgen für relevante Lebenszyklusemissionen pro MJ gelieferter Energie, die zunächst aber als etwas niedriger als die des Benzins abgeschätzt wurden [19]. Mittlerweile hat sich herausgestellt, dass die Emissionen, die durch Landnutzungsänderungen hervorgerufen werden, von hoher Relevanz sein können, vor allem dann, wenn durch indirekte Effekte des globalen Lebensmittelmarkts etwa Regenwald abgeholzt wird [20]. Auch wenn diese Studien die indirekten Landnutzungseffekte über-

schätzt haben mögen, reicht doch auch schon ein relativ kleiner indirekter Effekt aus, um zumindest im Fall des US-amerikanischen Maisethanols die Lebenszyklusemission über die des Benzins ansteigen zu lassen [21]. Auch die Emissionen von höchst treibhausgasrelevanten Stickstoffoxiden können die Bilanz verschlechtern und die Unsicherheit über die genauen Zahlen entscheidend erhöhen. Schließlich stehen Agrartreibstoffe der ersten, zum Teil aber auch der zweiten Generation, in direkter Konkurrenz mit dem Nahrungsmittelanbau und können mittels einer Preiserhöhung von zum Beispiel Mais zu einer mangelhaften Nahrungsmittelsicherheit beitragen [22, 23].

Diese höchst relevanten Erkenntnisse sind bisher noch nicht Teil der globalen energieökonomischen Modelle. Allerdings bemühen sich einige Wissenschaftler des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, genau dieses Problem mit der Verbindung von REMIND und MagPie, einem Landnutzungsmodell, anzugehen.

Für die Lebenszyklusanalyse der Speichertechnologien ist unter anderem die Effizienz der Energiewandlung von der Primärenergie bis zum Fahrzeugantrieb relevant. Dabei schneidet die Batterie besser ab als die wasserstoffgetriebene Brennstoffzelle oder exotischere Varianten wie ein Druckluftspeicher, der das Fahrzeug mit komprimierter Luft antreibt [24, 25]. Ein zweiter wesentlicher Bestandteil einer Lebenszyklusanalyse sind die Infrastrukturkosten. Eine Infrastruktur stellt eine Vorleistung für Mobilitätsdienstleistungen dar; erst wenn sie bereitgestellt ist, können Technologien durch learning-by-doing billiger werden. Dadurch besteht aber auch die Gefahr von einem technologischen Lock-in. Dieser Lock-in ist nachteilig, wenn man sich für eine suboptimale Technologie entschieden hat. So gibt es Warnungen, dass der großflächige Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur (zu Kosten von etwa 200–500 Mrd. \$ für die USA) zu einem solchen technologischen Lock-in führen könnte [26, 27, 28].

450 ppm tragbar sind und nicht mehr als 0,1–1,4 % des Bruttonationalproduktes betragen. Die Kostenabschätzung liegt unter der des Sternreports [29].

Sollte Europa sich zu einer ambitionierten Klimapolitik verpflichten, auch dann, wenn sich die USA und China noch nicht zu verbindlichen Zielen bereit erklärt haben? Nach RECIPE ist eine solche Vorreiterrolle sinnvoll, da durch die Änderung der Investitionsstruktur die erste Weltregion, die massiv in eine CO<sub>2</sub>-arme Wirtschaftsweise investiert, später substantielle wirtschaftliche Vorteile genießen wird.

## 4 Politikinstrumente

Mit welchen Instrumenten können ehrgeizige Klimaschutzziele erreicht werden? Einen formalen Rahmen, eine Kategorisierung der Instrumente, wollen wir hier erläutern. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Transportsektor können in a) CO<sub>2</sub>-Intensität der Energie, b) Energieintensität der zurückgelegten Distanz und c) Gesamtstrecke faktoriert werden (siehe *Abbildung 3*). Es gibt marktwirtschaftliche Instrumente, wie eine CO<sub>2</sub>-Steuer oder den Emissionshandel, die auf die Gesamtemission wirken, und damit jeden Faktor gleichzeitig ansprechen. Innerhalb jedes Faktors gibt es verschiedene Möglichkeiten der Emissionsreduktion, und nicht jede Möglichkeit lässt sich gleichermaßen gut über ein Preissignal erreichen. Deshalb sind an einigen Stellen speziellere Instrumente angebracht, die den einzelnen Faktoren zugeordnet werden können und oft spezifischer wirken. Eine Übersicht ist in *Abbildung 3* dargestellt.

Transportnachfragepolitik und Effizienzstandards für Fahrzeuge sind in der Wissenschaft wohlbekannt. Wir fokussieren für den Moment auf neuartige Instrumente, die versuchen, die CO<sub>2</sub>-Intensität von Treibstoffen zu regulieren. Wir beschreiben zunächst die Evolution und die Rationalität dieser Politikinstrumente, dann den übergreifenden Charakter des Emissionshandels. Schließlich fassen wir kurz zusammen, welche Instrumente für unsere oben

genannten Beispiele, die Vereinigten Staaten und China, angemessen sein könnten.

### 4.1 Beimischungsregelungen

Agrartreibstoffe werden politisch weltweit gefördert. Hauptinstrument sind Quoten- oder Beimischungsregelungen mit verpflichtendem Charakter etwa in der EU, den Vereinigten Staaten, Brasilien und Indien. Ziel der Beimischung ist a) Reduktion der Abhängigkeit von Ölimporten und b) Reduktion der CO<sub>2</sub>-Intensität des Gesamtkraftstoffs. Dabei ist zunächst implizit angenommen worden, dass Agrartreibstoffe CO<sub>2</sub>-neutral sind, weil die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen beim Pflanzenanbau gerade gebunden wurden. Diese Annahme ist falsch, wie wir oben gesehen haben – verschiedene Verarbeitungs- und Landnutzungseffekte eingeschlossen, kann die Lebenszyklusemission einiger Agrartreibstoffe sogar über die konventioneller fossiler Treibstoffe hinausgehen. Im Speziellen gilt dies für den flächenintensiven amerikanischen Maisanbau, während die Bilanz des brasilianischen Zuckerrohrs weit aus besser aussieht. Im Jahr 2022 sollen 36 Mrd. Gallonen Agrartreibstoffe in den USA beigemischt werden, also in etwa ein Viertel des derzeitigen Verbrauchs. Über zehn Mrd. Gallonen sollen dabei von konventionellen Agrarprodukten, sprich Mais, kommen. In Anbetracht der Lebenszyklusbilanzen können Beimischungsregelungen also nicht nur ineffektiv, sondern sogar kontraproduktiv sein. Ziel muss es vielmehr sein, solche Agrartreibstoffe zu fördern, die eine geringere CO<sub>2</sub>-Intensität aufweisen.

### 4.2 CO<sub>2</sub>-Intensitätsnormen

Instrumente, die dieses Ziel angehen, sind der kalifornische Low Carbon Fuel Standard (LCFS) und vergleichbar die europäische Fuel Quality Directive COM-2007-18 [31, 32]. Diese CO<sub>2</sub>-Intensitätsnormen zielen eine 10 % Reduktion der CO<sub>2</sub>-Intensität der Treibstoffe an, und sind weitgehend technologieneutral: Ausschließlich der CO<sub>2</sub>-Inhalt ist entscheidend.

Damit ist es nun Aufgabe der Treibstoffanbieter, diejenigen Treibstoffe zu fördern, die eine klimafreundliche Bilanz aufweisen – was durchaus über den Weg von Elektroautos geschehen kann. Zentraler Punkt dieser Art von Regulierung sind präzise Lebenszyklusanalysen. Die Schwierigkeiten solcher Analysen sowie die inhärente Unsicherheit ist mittlerweile im Fokus der politischen Diskussion über den kalifornischen LCFS und in diese Richtung tendierende auch nationale Regelungen in den Vereinigten Staaten. Unabhängig davon sind die kalifornische und die europäische Intensitätsnorm erfolgreich, da der Anreiz steigt, verstärkt auf CO<sub>2</sub>-arme Agrartreibstoffe zurückzugreifen [33, 34].

Auch der LCFS ist nicht ohne Probleme. So werden die Emissionen elektrischer Autos entweder inakkurat oder nur über aufwendige Berechnungen mit einbezogen. Gravierender ist der Einwand, dass Intensitäts-Standards unerwünschte Nebenwirkungen zeitigen, etwa wenn die Produktion von CO<sub>2</sub>-armen Treibstoffen gesteigert wird, ohne die Produktion CO<sub>2</sub>-reicher Treibstoffe zu senken.

### 4.3 Absolute Emissionsobergrenze und Emissionshandel

Ein absolute Grenze auf die Emissionen (Cap) und ein Handel mit Emissionsrechten verhindern solche perversen Anreize. Treibstoffanbieter müssten entsprechend der CO<sub>2</sub>-Intensität der Treibstoffe Zertifikate erwerben und hätten damit einen Anreiz, möglichst CO<sub>2</sub>-arme Treibstoffe anzubieten. Ein sektorübergreifendes Cap bindet auch automatisch und mit relativ wenig Transaktionskosten Elektromobilität mit ein. Eine sektorenübergreifende Obergrenze bedeutet also gleiche, faire Startbedingungen für alle Technologien und Treibstoffe. Gleichzeitig setzt der Emissionshandel im Transportsektor eine detaillierte Lebenszyklusanalyse der Treibstoffe voraus und baut hiermit auf der CO<sub>2</sub>-Intensitätsnorm auf [35]. In gewisser Hinsicht können wir hier also von einer Evolution der Politikinstrumente für die Regulierung der CO<sub>2</sub>-Intensität im Transportsektor sprechen.

Wir haben hier ein sektorübergreifendes Emissionshandelssystem aus einer Bottom-up-Perspektive begründet. Seine ganze Kraft entfaltet ein Emissionshandelssystem erst, wenn alle Sektoren der Gesamtwirtschaft miteinbezogen werden.

Ein sektorübergreifender Emissionshandel stellt eine gesamtwirtschaftlich effiziente Lösung dar. Wenn etwa die Reduktionsverpflichtungen auf möglichst viele Sektoren aufgeteilt werden, dann sinken die Emissionsreduktionskosten mit jedem weiteren Sektor, selbst dann, wenn ein Sektor nur relativ kostspielige Mitigationsoptionen bietet (*Abbildung 4a*). Oder: Eine alle Sektoren übergreifende Cap führt im Durchschnitt zu geringeren Vermeidungskosten, als wenn verschiedene Sektoren ihre jeweils eigenen Caps hätten (*Abbildung 4b*).

Die Frage ist nun, ob absolute Emissionsgrenzen und generelle Instrumente wie

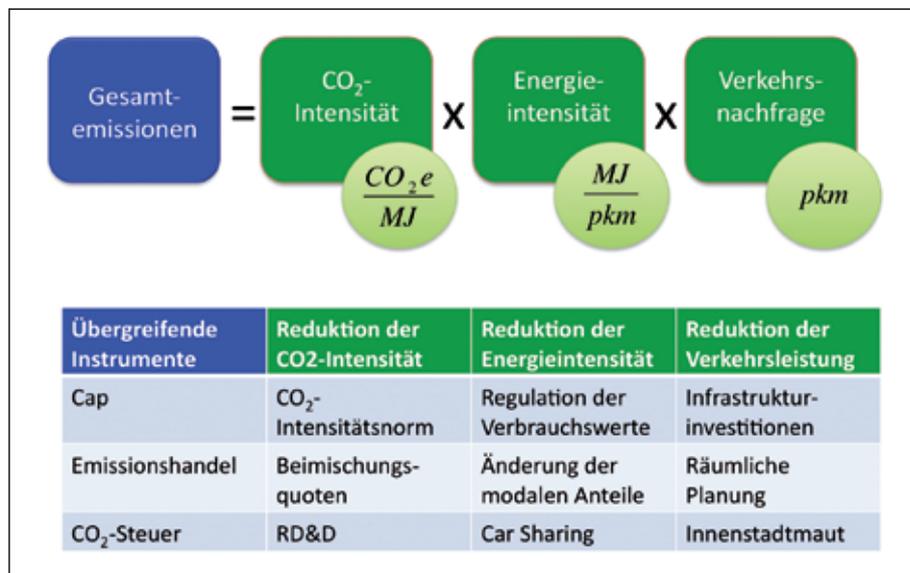


Abb. 3: Überblick über Emissionsfaktoren und Politikinstrumente (adaptiert von [30])

CO<sub>2</sub>-Steuer oder Emissionshandel ausreichend sind, um eine effiziente Klimapolitik zu verwirklichen. In einer statischen Welt wäre dies vermutlich richtig, aber die realen Marktbedingungen machen die Lage etwas komplizierter.

Zum einen könnten langfristig optimale, kosteneffiziente Lösungen nicht realisiert werden, weil die dafür nötigen Vorleistungen (wie etwa Forschung und Entwicklung) nicht unbedingt von privaten Firmen erbracht werden; denn jede dieser Investitionen begünstigt auch die anderen Marktteilnehmer. Hier können Mindestanforderungen, etwa im Bereich der CO<sub>2</sub>-armen Treibstoffe, eine sinnvolle Ergänzung sein.

Zum anderen handeln Konsumenten nicht unbedingt im engeren ökonomischen Sinne rational. Das lässt sich gut am Beispiel der Verbrauchseffizienz von Fahrzeugen nachweisen.

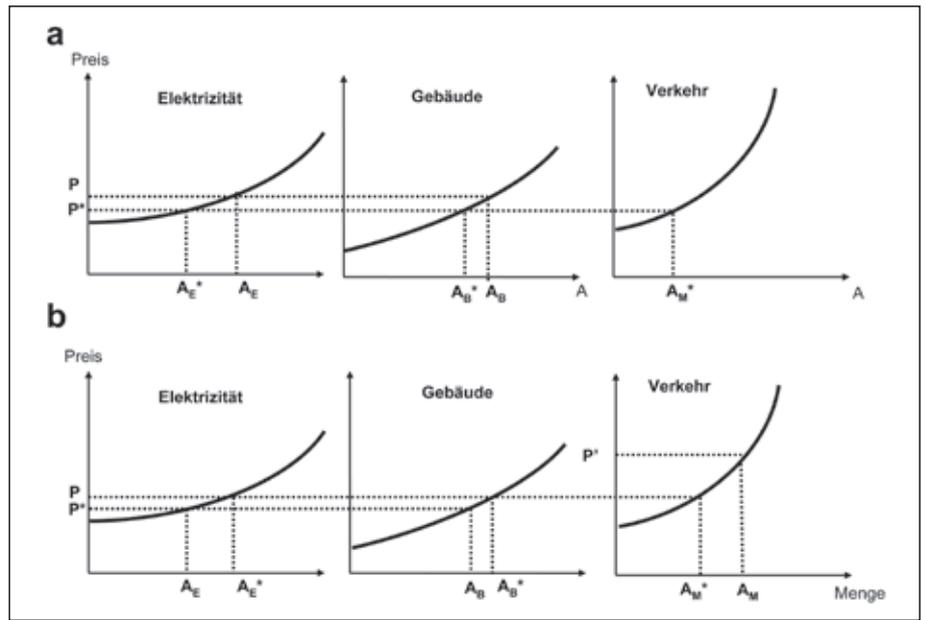
**4.4 Energieeffizienzregulierung von Fahrzeugen**

Konsumenten beziehen die operativen Kosten des Fahrzeuges in ihre Kaufentscheidung höchstens peripher mit ein [36]. Ein relativ energieeffizientes Auto wird oft auch dann nicht gekauft, wenn sich die zusätzlichen Investitionskosten in zwei oder drei Jahren amortisieren. Dieses Phänomen lässt sich am ehesten durch einen Uncertainty-Loss-Aversion-Bias erklären [37]. Schon vorhandene Preissignale würden bei einem homo oeconomicus bereits dazu führen, dass er ein energieeffizienteres Fahrzeug kauft. Es gibt also Hinweise darauf, dass auch ein Preissignal über den Emissionshandel nicht ausreichend ist.

In der Transportpolitik ist dies eine wohlbekanntere Tatsache, die auch als Erklärung für die Stagnation der Verbrauchswerte in den Vereinigten Staaten gilt (siehe oben). In Anerkennung dessen hat die U.S. Regierung die CAFE-Standards in 2009 merklich angehoben und eine Verbesserung der durchschnittlichen Verbrauchswerte von 25 mpg (miles per gallon ) auf 35,5 mpg im Jahr 2016 festgeschrieben. Allein dieses Instrument wird bis 2016 0,9 GT CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen. Eine kosteneffiziente Anhebung der Verbrauchswerte ist auch darüber hinaus möglich. Eine solche Regulierung ist das einfachste und wirksamste Instrument klimafreundlicher Transportpolitik in den Vereinigten Staaten [38].

**4.5 Transportnachfrage und Infrastrukturpolitik**

Zuletzt wollen wir kurz auf die Situation in China eingehen. Hier ist die Verbrauchswertregulierung recht fortschrittlich und bislang ambitionierter als die der Vereinigten Staaten [39]. Die Herausforderung ist vielmehr eine zu schnelle Motorisierung zu verlangsamen. Die traditionell dichten chinesischen Städte haben durchmischte Landnutzung und sind ideale Kandidaten für nicht-motorisierten Verkehr und öffentlichen Nahverkehr. Doch durch den raschen Einkommenszuwachs und die Urbanisierung explodiert die Anzahl der Autos in den Städten. Im Falle von Beijing führt das



**Abb. 4:** a) Eine hypothetische Ausweitung des Emissionshandels etwa von dem Elektrizitäts- und Bausektor auf den Verkehrssektor würde den Preis der Zertifikate von P auf P\* senken, und die Menge der zu vermeidenden Emissionen von A<sub>E</sub> auf A<sub>E</sub>\* und von A<sub>B</sub> auf A<sub>B</sub>\* senken.

b) Ein Zusammenschluss des Emissionshandels verschiedener Sektoren führt zu einer Preiserhöhung in den Sektoren, die relativ kostengünstige Vermeidungsmaßnahmen ergreifen können (von P\* auf P hier etwa Elektrizitätssektor und Bausektor), während die Kosten des hochpreisigen Sektors fallen (von P' auf P; z. B. Transport). Insgesamt sinken jedoch die durchschnittlichen Vermeidungskosten – die gesamtwirtschaftliche Effizienz wird erhöht.

zu externen Kosten des Autoverkehrs: permanenter Stau und hohe Luftverschmutzung und damit Gesundheitsgefährdung. Eine Monetarisierung der verschiedenen Effekte ist in *Abbildung 5* zusammengefasst [40].

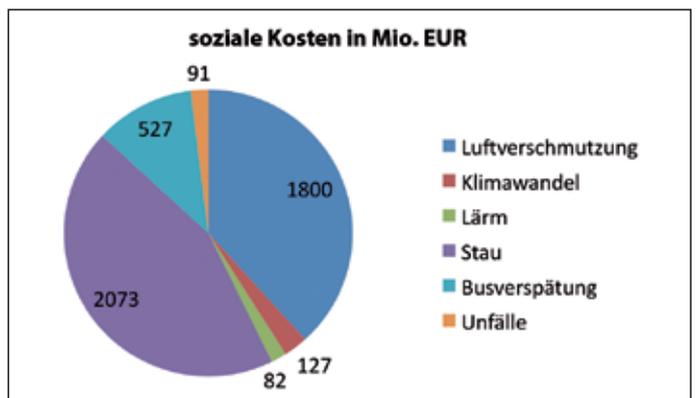
Daraus ergibt sich, dass sich die Verkehrspolitik in chinesischen Städten nicht allein an Klimaschutzziele orientieren sollte, sondern vor allem an einer kohärenten Nachhaltigkeitsstrategie. Für Beijing ist gezeigt worden, dass eine Kombination von ambitionierten Nachfrage- und Angebotsinstrumenten eine nachhaltige Strategie darstellt: Die Einführung einer Innenstadtmaut und der gleichzeitige Ausbau des öffentlichen Nahverkehrssystems führen zu erheblichen Gewinnen [40]. In der Tat stehen derzeit ungeheure Investitionsmaßnahmen an, die 300 Mio. Menschen zusätzlich in die Städte integrieren sollen. Die Investitionen könnten dabei einerseits

in einer zersiedelten Landnutzung und der Konstruktion von Stadtautobahnen enden (dominierende Politik Beijings im letzten Jahrzehnt) oder andererseits in eine relativ dichte Bauweise mit einfachem Zugang zu einem gut ausgebauten öffentlichem Nahverkehr münden (etwa Guangzhou, dramatischer ÖPNV-Ausbau ist jetzt auch im Fokus der Politik Beijings). Die Instrumente einer nachhaltigen Transport- und Landnutzungspolitik sind prinzipiell bekannt [41]. Die Implementierungsbarrieren in chinesischen Städten sind in erster Linie politischer Natur [16]. Die analytische Beschreibung dieser Infrastrukturentscheidungen aus der Klimaperspektive ist ebenfalls ein Forschungsziel unseres Forschungsbereichs an der TU Berlin.

**5 Zusammenfassung**

Zusammengefasst stellt eine ambitionierte Klimapolitik den Transportsektor vor

**Abb. 5:** Die sozialen Kosten des motorisierten Straßenverkehrs in Beijing gehen weit über den Klimawandel hinaus und sind überwiegend lokaler Natur [40].



große Herausforderungen. Mit einer sektorenübergreifenden Emissionsobergrenze und nach Weltregionen, aber auch Städten differenzierten Maßnahmen besteht jedoch die Möglichkeit dieser Herausforderung gerecht zu werden und einen Umbau des Transportsystems durchzusetzen. Gerade weil das Automobil die Emission im Landtransport dominiert, besteht eine wirksame Klimaschutzpolitik auch darin, den nicht-motorisierten Verkehrsmitteln, Fußgängern und Fahrradfahrern, vermehrte Aufmerksamkeit zu schenken. Diese Refokussierung geht schließlich Hand in Hand mit Investitionen in effiziente öffentliche Verkehrssysteme und eine nachhaltige Landnutzungspolitik.

Wir danken Herrn Linus Mattauch für die hilfreiche Kommentierung des Manuskripts.

## Literatur

- [1] IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] Raupach, M. R.; Marland, G.; Ciais, P.; Le Quéré, C.; Canadell, J. G.; Klepper, G.; Field, C. B.; 2007: Global and regional drivers of accelerating CO<sub>2</sub> emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104, 10288-10293.
- [3] Ramanathan, V.; Feng, Y. (2008): On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead. Proceedings of the National Academy of Sciences 105 (38), 14245-14250.
- [4] Canadell, J. G.; Le Quéré, C.; Raupach, M. R.; Field, C. B.; Buitenhuis, E. T.; Ciais, P.; Conway, T. J.; Gillett, N. P.; Houghton, R. A.; Marland, G. (2007): Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104, 18866-18870.
- [5] Smith, J. B. et al. 2009: Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, doi: 10.1073/pnas.0812355106.
- [6] Meinshausen, M.; Meinshausen, N.; Hare, W.; Raper, S.; Frieler, K.; Knutti, R.; Frame, D.; Allen, M. (2009): Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. Nature, vol. 458, pp. 1158-1163.
- [7] Edenhofer, O.; Carraro, C.; Hourcade, J.-C.; J.-C. Neuhoff, J.-C.; Luderer, G.; Flachsland, C.; Jakob, M.; Popp, A.; Steckel, J.; Stroschein, J.; Bauer, N.; Brunner, S.; Leimbach, M.; Lotze-Campen, H.; Bosetti, V.; De Cian, E.; Tavoni, M.; Sassi, O.; Waisman, H.; Crassous-Doerfler, R.; Monjon, S.; Dröge, S.; van Essen, H.; del Rio, P. (2009): RECIPE: The Economics of Decarbonization – Synthesis Report. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany.
- [8] Kahn Ribeiro, S.; Kobayashi, S.; Beuthe, M.; Gasca, J.; Greene, D.; Lee, D. S.; Muromachi, Y.; Newton, P. J.; Plotkin, S.; Sperling, D.; Wit, R.; Zhou, P. J. (2007): Transport and its infrastructure. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B.; Davidson, O. R.; Bosch, P. R.; Dave, R.; Meyer, L. A.; (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [9] IEA, 2009: Transport, Energy and CO<sub>2</sub> – moving towards sustainability. International Energy Agency, ISBN 978-92-64-07316-6.
- [10] EIA, 2009: Annual Energy Outlook 2009. Energy Information Administration.
- [11] Sperling, D.; Gordon, D. (2009): Two Billion Cars: Driving Towards Sustainability. Oxford University Press: USA.
- [12] Wagner, V.; Whitworth, A.; An, F. (2006): Climate change mitigation strategies for the transportation sector in China. Prepared for the Stern review on the economics of climate change. Available from: [http://www.icet.org.cn/en/library\\_en.html](http://www.icet.org.cn/en/library_en.html).
- [13] WEO, 2009: World Energy Outlook 2009. International Energy Agency.
- [14] OECD, 2009: Cities, Climate Change and Multilevel Governance.
- [15] Chen, H.; Jia, B.; Lau, S. S. Y. (2008): Sustainable urban form for Chinese compact cities: challenges of a rapid urbanized economy. Habitat International 32, 28-40.
- [16] Creutzig, F.; Thomas, A.; Kammen, D. M.; Deakin, E. (2009): Multi-dimensional Benefits of a City Toll in Chinese Cities: Potentials, Barriers and the Need for Responsible Institutions In E. Zusman, A. Srinivasan & S. Dhakal (Eds.), Low Carbon Transport in Asia: Capturing Climate and Development Co-benefits. London: Earthscan.
- [17] Crassous, R.; Hourcade, J.-C.; Sassi, O. (2006): Endogenous structural change and climate targets modeling experiments with IMACLIM-R. Energy Journal, 27, pp. 259-276.
- [18] Leimbach, M.; Bauer, N.; Baumstark L.; Edenhofer, O.: "Mitigation Costs in a Globalized World: Climate Policy Analysis with ReMIND-R". Accepted for Publication in Environmental Modeling and Assessment.
- [19] Farrell, A. E.; Plevin, R. J.; Turner, B. T et al. (2006): Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science, 311, 506-8.
- [20] Searchinger, T.; Heimlich, R.; Houghton, R. A. et al. (2008): Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change. Science, 319, 1238-40.
- [21] Hertel, T. W.; Golub, A. A.; Jones, A. D.; O'Hare, M.; Plevin, R. J.; Kammen, D. M.: Global Land Use and Greenhouse Gas Emissions Impacts of U.S. Maize Ethanol: The Role of Market-Mediated Responses. In press at BioScience.
- [22] WBGU, 2008: Future Bioenergy and Sustainable Land Use. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.
- [23] Creutzig, F.; Kammen, D. M. (2009): The Post-Copenhagen Roadmap Towards Sustainability: Differentiated Geographic Approaches, Integrated Over Goals, INNOVATION, Vol 4 (4): 301-32.
- [24] Eaves, S.; Eaves, J. (2004): A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles. J. Power Sources 130: 208-212.
- [25] Creutzig, F.; Papson, A.; Schipper, L.; Kammen D. (2009): Economic and environmental evaluation of compressed-air cars. Environ. Res. Lett. 4:044011.
- [26] Keith, D. W.; Farrell, A. (2003): Rethinking Hydrogen Cars, Science 301:315-316.
- [27] Ogden, J. M.; Williams, R. H.; Larson, E. D. (2004): Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines. Energy Policy 32(1): 7-27.
- [28] Hammerschlag, R.; Mazza, P. (2005): Questioning hydrogen. Energy Policy 33:2039-2043.
- [29] Stern, N. (2006): The Economics of Climate Change. The Stern Review, Cambridge University Press, New York.
- [30] Creutzig, F. (2010): Reaping benefits: National and Urban Low-Carbon Land Transportation Roadmaps, Report prepared for the GTZ.
- [31] Farrell, A. E.; Sperling, D. (2007): A low carbon fuel standard for California, Part I: Technical Analysis. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report UCDD-ITS-RR-07-07.
- [32] EC, 2009: DIRECTIVE 2009/30/EC, 23. April 2009.
- [33] Sperling, D.; Yeh, S. (2009): Low Carbon Fuel Standards. Issues in Science and Technology 2: 57-66.
- [34] Arnold, K. (2009): Ambitionierte Vorgaben für den Kraftstoffsektor: die „Fuel Quality Directive“ der EU zielt auf die Lebenszyklusemissionen. In: Wuppertal Bulletin zu Instrumenten des Klima- und Umweltschutzes, 12:24-28.
- [35] Creutzig, F.; Kammen, D. (2009): Getting the carbon out of transportation fuels. In H. J. Schellnhuber, M. Molina, N. Stern, V. Huber & S. Kadner (Eds.), Global Sustainability – A Nobel Cause. Cambridge University Press, UK.
- [36] Allcott, H.; Wozny, N. (2009): Gasoline Prices, Inattentive Consumers, and the Energy Paradox, working paper, Harvard Energy Technology Innovation Policy Group and Harvard University Center for the Environment, July 19, 2009.
- [37] Greene, D. L.; German, J.; Delucchi, M. A. (2009): Fuel Economy: the Case for Market Failure, ch. 11, in D. Sperling and J. Cannon, eds., Reducing Climate Impacts in the Transportation Sector, Springer Science+Business Media.
- [38] Greene, D. L.; Schäfer, A. (2003): Reducing Greenhouse Gas Emissions from US Transportation. Pew Center.
- [39] An, F.; Gordon, D.; He, H.; Kodjak, D.; Rutherford, D. (2007): Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: A Global Update. ICCT.
- [40] Creutzig, F.; He, D. (2009): Climate change mitigation and co-benefits of feasible transport demand policies in Beijing. Transportation Research D 14: 120-131.
- [41] Wegener, M.; Fürst, F. (2004): Land use transport interaction: state of the art. Deliverable 2a of the project TRANSLAND of the 4<sup>th</sup> RTD Framework Programme of the European Commission. Institut für Raumplanung, Universität Dortmund.

## Summary

### Mobility in change

A significant contribution of the transport sector is required to achieve ambitious reduction of greenhouse gas emissions until 2050. In this article, we summarize findings on the emissions within the transport sector, highlighting underlying factors of two important world regions, the U.S. and China. We then take a closer look at energy system models, and predictions of how the transport sector can decarbonize cost-effectively. A more detailed excursion focuses on the importance of accurate life-cycle analysis of novel fuels. In the last part, we explore a number of policy instruments, specifically those geared to the carbon content of fuels. We suggest a possible evolution of renewable fuel standards, to low carbon fuel standards and finally to an economic-wide cap and trade system. We close by describing two policies, fuel efficiency standards and infrastructure investments, that are of particular importance to our previous case studies, the U.S. and China.