

Sinn, Hans-Werner

**Working Paper**

## Das grüne Paradoxon: Warum man das Angebot bei der Klimapolitik nicht vergessen darf

ifo Working Paper, No. 54

**Provided in Cooperation with:**

Ifo Institute – Leibniz Institute for Economic Research at the University of Munich

*Suggested Citation:* Sinn, Hans-Werner (2008) : Das grüne Paradoxon: Warum man das Angebot bei der Klimapolitik nicht vergessen darf, ifo Working Paper, No. 54, ifo Institute - Leibniz Institute for Economic Research at the University of Munich, Munich

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/73837>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

# Working Papers

Das grüne Paradoxon:

Warum man das Angebot bei der Klimapolitik nicht  
vergessen darf

Hans-Werner Sinn

Ifo Working Paper No.54

Januar 2008

Eine elektronische Version ist auf der ifo-Website [www.ifo.de](http://www.ifo.de) zu finden.

# **Das grüne Paradoxon: Warum man das Angebot bei der Klimapolitik nicht vergessen darf\***

Thünen-Vorlesung, Verein für Socialpolitik,  
Jahrestagung, München, Oktober 2007

## **Abstract**

Despite its efforts and obligations under the Kyoto Protocol, the EU has not succeeded in even making a dent in the rapidly rising trend of worldwide carbon dioxide emissions. If anything, the trend has accelerated in recent years. In his Thünen Lecture given to the German Economic Association in October 2007, the author criticizes the attempt to slow down global warming by means of unilaterally curtailing the demand for fossil fuels and develops an intertemporal supply side approach to the economics of global warming. He advances the hypothesis that the ineffectiveness of demand policies results from anticipation effects on the part of the owners of fossil fuel resources. In addition to the threat of potential ousting by domestic rivals, the threat of falling energy prices (against a modified Hotelling trend) due to greening public policies and increasing participation in world wide emissions trading systems gives resource owners the incentive to speedup extraction. Feasible policy measures that do not encounter such problematic anticipation effects include the rapid creation of a complete worldwide monopsony for fossil fuels that can dictate quantities rather than having to rely on price signals. Moreover, source taxes on the financial returns of resource owners will provide additional conservation motives; technical measures including afforestation and sequestration may also be a way to reduce the speed of global warming.

JEL Code: O13, Q32, Q54, H23.

Hans-Werner Sinn  
ifo Institut für Wirtschaftsforschung  
an der Universität München  
und Lehrstuhl für Finanzwissenschaft  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Poschingerstr. 5  
81679 München  
Phone: +49(0)89/9224-1276  
sinn@ifo.de

\* Ich danke Max von Ehrlich, Marga Jennewein und Hans-Dieter Karl für wertvolle Hilfe bei der Erstellung dieses Beitrages. Ferner danke ich Wolfgang Weber für wichtige Erläuterungen zum Thema Kohlenstoffchemie.

## 1. Der Treibhauseffekt

Der Stern-Bericht (2006) hat die Erwärmung der Erde aufgrund des Treibhauseffekts an die vorderste Stelle der politischen Agenda in Europa gerückt. Tony Blair hat sich den Bericht zu eigen gemacht, und er stand im Mittelpunkt der deutschen EU-Ratpräsidentschaft in der ersten Jahreshälfte 2007. Beim G8-Gipfel des Jahres 2007 in Heiligendamm war der Klimawandel das zentrale Thema der Beratungen, genauso wie natürlich bei der Weltklimakonferenz in Bali im Dezember 2007. Die ökonomische Literatur zum Klimaproblem wächst rasch und lässt sich kaum noch überschauen.

Die wissenschaftlichen Belege für die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre sind erdrückend. Die Fakten lassen sich nicht mehr leugnen. Durch Messungen des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Luftblasen, die in den Eisbohrkernen aus Grönland und der Antarktis eingeschlossen sind, ist bekannt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Erdatmosphäre vor der industriellen Revolution bei 280 ppm<sup>1</sup> lag. Inzwischen ist sie auf 380 ppm angestiegen. Obwohl 380 ppm eine winzige Menge ist und bedeutet, dass weniger als 0,04% der Luft aus Kohlendioxid-Gas besteht, ist die Auswirkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die durchschnittliche Erdtemperatur enorm. Wenn Kohlendioxid und andere weniger relevante Treibhausgase<sup>2</sup> nicht in der Atmosphäre vorhanden wären, betrüge die durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche –6° Celsius. Wegen der Treibhausgase liegt die heutige Durchschnittstemperatur jedoch bei 15°C, ist also um 21°C höher. Offenbar reagiert die Temperatur äußerst sensibel selbst auf kleinste Veränderungen des Gehalts an Treibhausgasen in der Lufthülle der Erde. Seit der Industrialisierung hat sich die durchschnittliche Temperatur bereits um 0,8°C erhöht. Ein rapides Abschmelzen des Grönlandeises und der Alpengletscher sind die sichtbaren Folgen. Das Eis der Nordpolkappe ist mittlerweile so weit verschwunden, dass sich die so genannte Nordwestpassage, also der Seeweg im Norden Kanadas zwischen

---

<sup>1</sup> ppm: parts per million = Bestandteil pro eine Million Produktbestandteil.

<sup>2</sup> Im Einzelnen sind dies 0,02% Wasserdampf, 1,8 ppm Methan und 0,3 ppm Stickoxid.

dem Atlantik und dem Pazifik, im Sommer des Jahres 2007 erstmals geöffnet hat. Der Meeresspiegel ist im Vergleich zur vorindustriellen Zeit um 20 cm angestiegen.

Die Klimaforscher sind sich einig: Verändern wir unser Verhalten nicht, ist bis zum Jahr 2035, spätestens bis 2050, mit einem Temperaturanstieg von etwa 3°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu rechnen. Im Vergleich zu heute wäre das ein Anstieg von etwa 2°C. Der Stern-Bericht befürchtet bei einem business-as-usual-Szenario bis zum Jahr 2100 gar eine Erwärmung um 5°C gegenüber der vorindustriellen Zeit. Nach Ansicht der Autoren des Berichts wird damit ein Grenzwert erreicht, jenseits dessen die Menschheit „unbekanntes Territorium“ betritt. Wenn 5°C als gering erscheint, dann mache sich klar, dass dies der Temperaturanstieg seit der letzten Eiszeit vor etwa 15.000 Jahren war. Überschwemmungen, Orkane und Investitionen für die Gebäudeisolierung und Klimaanlage werden gewaltige Kosten verursachen. Migrationsbewegungen von den ausgetrockneten, dürrer Ländern Afrikas und Asiens zu fruchtbaren Landstrichen in Sibirien und Alaska könnten die politische Stabilität der Welt gefährden. Deshalb sind politische Maßnahmen gegen die Erwärmung der Erde erforderlich.

## **2. Die gegenwärtige Politik**

Mit dem Kyoto-Protokoll von 1997 wurde ein großer Schritt in Richtung Klimaschutz getan. Die Vereinbarung sieht vor, dass die unterzeichnenden Vertragsparteien, die meisten von ihnen Industrieländer, im Zeitraum von 2008 bis 2012 ihre Treibhausgasemissionen gegenüber dem Basisjahr 1990 um durchschnittlich 5,2% reduzieren.

Das Protokoll wurde bisher von 175 Staaten ratifiziert. Für die meisten dieser Staaten blieb die Unterschrift freilich folgenlos, weil ihre Emissionen nicht wirksam begrenzt wurden. Nur für 51 der insgesamt 175 Staaten bzw. 29% des anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wurden bindende Emissionsschranken festgelegt. Wichtige Länder, wie China und Indien haben den

Vertrag zwar unterschrieben und ratifiziert, sind aber von den Beschränkungen des Kioto-Protokolls gar nicht betroffen. Die Vereinigten Staaten haben den Vertrag nur unterschrieben, aber die Ratifikation durch das Repräsentantenhaus ausgesetzt. Australien, eines der Länder mit den höchsten Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Emissionen, unterschrieb den Vertrag erst am 3. Dezember 2007, nach dem Wechsel zur sozialdemokratischen Regierung unter Kevin Rudd, und kündigte an, ihn alsbald zu ratifizieren. Die 15 alten EU-Mitgliedstaaten zählen zu den Ländern, die durch das Kioto-Protokoll tatsächlich verpflichtet sind, ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren. Sie kamen überein, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zeitspanne von 1990 bis spätestens 2012 um 8% zu verringern.

Ab dem Jahr 2005 hilft dabei das neue Emissionshandelssystem der EU. Das System erfasst die Energieerzeuger und die energieintensiven Industriebranchen wie z.B. die Herstellung und Verarbeitung von Eisenmetallen oder die Mineralölindustrie. Insgesamt bindet es damit 45% des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der EU und etwa 30% der gesamten Treibhausgasemissionen, wenn man andere Treibhausgase mit ihren CO<sub>2</sub>-Äquivalenten hinzu rechnet (European Commission 2005). Die Emissionen der anderen Sektoren, nämlich der privaten Haushalte und des Verkehrs, sind nicht in das Handelssystem integriert, obwohl sie Bestandteil des Kioto-Protokolls sind. EU-Kommissar Stavros Dimas geht davon aus, dass die europäischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits im ersten Jahr seit Einführung des neuen Handelssystems um einige Prozent gesunken sind.<sup>3</sup> Ab dem Jahr 2011 wird die EU sogar den Luftverkehr in das Emissionshandelssystem integrieren.

Die konkreten Maßnahmen zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, die die Europäische Union eingeleitet hat, reichen vom Einsatz von erneuerbaren Energiequellen über Forschungs- und Entwicklungsprogramme bis hin zu Richtlinien zur Besteuerung des Energieverbrauchs. Auch die Gewährung von speziellen Einspeisungstarifen für Produzenten alternativer Energien sowie Quoten für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind vorgesehen. Gegenwärtig

---

<sup>3</sup> Vgl. European Environmental Agency (2007).

verhandeln die EU-Mitgliedsländer über spezifische Vorgaben für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Die Europäische Kommission hat vorgeschlagen, den Anteil erneuerbarer Energiequellen am Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 auf 20% zu erhöhen. Im Jahr 2005 betrug dieser Anteil in der gesamten Europäischen Union 6,3%, in Deutschland lag er bei 4,7%. Zwar können einige EU-Länder wie Österreich, Portugal und die skandinavischen Länder aufgrund ihrer Wasserkraft bisher schon einen Anteil erneuerbarer Energien von über 15% vorweisen. Im Vereinigten Königreich, Irland, den Niederlanden und Belgien beträgt dieser Anteil jedoch nicht einmal 3%. Zusätzlich haben die EU-Länder eine Vielzahl freiwilliger Maßnahmen ergriffen, die den CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduzieren, wozu insbesondere der Atomstrom gehört. Im Durchschnitt der EU-25 kommen 31% des Stroms aus dieser Quelle, und in Frankreich sind es bereits 78%. Andere Länder mit einem relativ hohen Anteil von Atomkraft an der Stromerzeugung sind Litauen mit 72%, Belgien mit 56%, Schweden mit 47%, Deutschland mit 26% und das Vereinigte Königreich mit 20%.

Tabelle 1: Politikmaßnahmen der EU-Länder zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes

-	Direkte Reduktion der Nachfrage nach Brennstoffen
	Bessere Gebäudeisolierung, leichtere Autos und Verkehrsminderung
-	Grüner Strom
	Wind, Wasser, Solarenergie, Biomasse oder Hybridautos
-	Nuklearenergie
	Elektrizität und Wasserstofftechnologie
-	Andere grüne Energiequellen
	Pellet-Heizung, Biodiesel, Wärmepumpen, Sonnenwärme, geothermische Wärme
-	Effizientere Verbrennungsprozesse
	Common-Rail-Dieselmotoren, Kohlekraftwerke mit feineren Stäuben

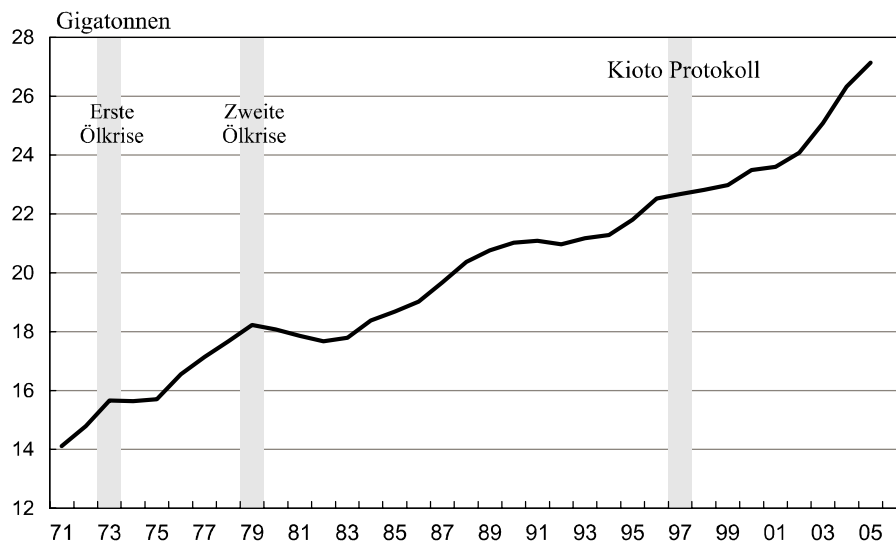
Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Maßnahmen, die EU-Länder zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ergriffen haben. Bessere Isolierungen, leichtere Autos und eine

Verkehrsminderung verringern den Bedarf an fossilen Brennstoffen. Genauso wirkt die Stromgewinnung aus Wind, Wasser, Biomasse oder Solarenergie. Das Hybridauto wandelt Bremsenergie in Elektrizität um und spart fossilen Treibstoff. Die aus der Atomspaltung gewonnene Nuklearenergie ist gegenwärtig die bedeutendste Alternativtechnologie, und vielleicht gibt es eines Tages sogar Fusionsreaktoren. Atomenergie kann durch ein Stromnetz transportiert werden, sie kann aber auch in Fahrzeugen genutzt werden, wenn der Strom zuvor in Wasserstoff umgewandelt wird. Wasserstoff ist eher ein Energiespeicher als eine Energiequelle selbst, denn er kommt in ungebundener Form in der Natur nicht vor. Grüne Energiequellen wie die Pellet-Heizung, Biodiesel, Wärmepumpen, Solarwärme und geothermische Wärme werden in Europa aufgrund hoher Subventionierung mittlerweile häufig genutzt. Und schließlich gibt es Wege, Verbrennungsprozesse effizienter zu gestalten, z.B. durch Common-Rail-Dieselmotoren oder die Nutzung von Kraftwerken, die mit feineren Kohlestäuben arbeiten. Sie reduzieren die Menge der unverbrannten Treibstoffreste und erhöhen die Energieausbeute des Treibstoffs.

Die Anstrengungen der EU-Länder im Bereich des Klimaschutzes stehen im auffallenden Gegensatz zur tatsächlichen Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, stieg die weltweite Emission von Kohlendioxid in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich an, sogar noch nach der Unterzeichnung des Kioto-Protokolls. Die Kurve der Emissionen weist nicht einmal eine Delle auf. Im Gegenteil, der CO<sub>2</sub>-Ausstoß hat sich nach dem Jahr 1997, als das Protokoll wirksam wurde, sogar noch deutlich beschleunigt. Diese Tatsache stellt die ökonomische Theorie und die Wirtschaftspolitik vor ein Rätsel.



Abbildung 1: Jährliche weltweite Kohlendioxidemission



Quelle: IEA (2007).

Die Lösung des Rätsels könnte damit zu tun haben, dass die Klimaschutzpolitik der EU-Länder ausschließlich Nachfragepolitik ist. So sehr sich die Maßnahmen, die in Tabelle 1 aufgelistet sind, unterscheiden, sie haben doch mit einander gemein, dass sie allesamt nur die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen reduzieren. Die Hoffnung der Politiker ist offenbar, dass dies schon ausreicht, die tatsächlich verbrauchten Mengen zu reduzieren und den Klimawandel zu verlangsamen. Aber was ist eigentlich mit dem Angebot? Auf keinem Markt wird das tatsächliche Transaktionsvolumen allein von einer Marktseite bestimmt. Immer kommt es auf Nachfrage und Angebot zugleich an. Der Rest dieses Aufsatzes wird sich deshalb mit dem in Literatur und Politik vergessenen Angebot beschäftigen.

### **3. Das vergessene Angebot: Warum man die Rechnung nicht ohne den Wirt machen sollte**

Die Idee hinter der Nachfragepolitik ist, dass sie ein globales öffentliches Gut bereitstellt. Reduzieren die „grünen“ Länder ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß, dann ist weniger CO<sub>2</sub> in der Luft, und die Temperatur der Atmosphäre bleibt niedriger, so dass sich der Klimawandel verlangsamt. Davon profitiert die Menschheit als ganze. Natürlich wäre es besser, wenn sämtliche Staaten ihre Nachfrage verringerten. Aber selbst wenn dies nur einige tun, wird sich der Klimawandel zumindest etwas verlangsamen. Es ist wie bei einer mildtätigen Spende. Man selbst leistet etwas und hofft, dass andere nachziehen, aber auch, wenn sie das nicht tun, kommt zumindest etwas Geld zusammen, und die Not wird gelindert.

Leider ist diese Sicht der Dinge zu euphemistisch, denn sie lässt die Querverbindung zwischen den grünen und den anderen Ländern über den Weltmarkt für fossile Brennstoffe außer Acht. Die Menge des CO<sub>2</sub>, das in die Atmosphäre emittiert wird, hängt von der Kohlenstoffnachfrage der grünen Länder, der Kohlenstoffnachfrage der anderen Länder und dem Kohlenstoffangebot der Förderländer ab. Nur wenn das weltweite Angebot sehr preiselastisch ist, so dass die Anbieter der Nachfrage auch schon bei minimalen Preisänderungen folgen, ist die Annahme richtig, dass sich eine Nachfrageverringering der grünen Länder direkt in einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen niederschlägt. Ist das Angebot starr und preisunelastisch, sieht die Sache ganz anders aus.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen 2 und 3 verdeutlichen diese Möglichkeiten. Dabei ist  $R(t)$  das Extraktionsvolumen und  $P(t)$  das Preisniveau der Periode  $t$ . Die Nachfragekurve erfasst die Nachfrage aller Länder der Welt. Sie ist durch horizontale Aggregation über die Länder gebildet. Die Position der Nachfragekurve ist im Allgemeinen zeitabhängig. So wird sich die Kurve aufgrund des wirtschaftlichen Wachstums im Laufe der Zeit nach Außen bewegen. Umgekehrt kann exogener technischer Fortschritt bei der Suche nach Ersatztechnologien die Kurve nach innen schieben. Die Steigung der Nachfragekurve

reflektiert die preisendogenen Substitutionsmöglichkeiten, über die die Wirtschaft verfügt. Bei höheren Preisen werden die oben genannten nachfragemindernden Maßnahmen von der Kernenergie bis zu den Pellets und vom Hybridauto bis zur besseren Gebäudeisolierung durch den Marktmechanismus selbst in Gang gesetzt. Des Weiteren kommen nun aber politische Maßnahmen ins Spiel, die durch technische Auflagen, Steuern oder die Subvention von Ersatztechnologien die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen auf den Weltenergiemärkten bei jedem gegebenen Preis und zu jedem gegebenen Zeitpunkt weiter reduzieren. Solche Maßnahmen verschieben die Nachfragekurve selbst nach links bzw. nach unten.

Abbildung 2 zeigt den Fall, bei dem sich diese Verschiebung wegen einer elastischen Angebotskurve voll und ganz in das Transaktionsvolumen am Weltenergiemarkt überträgt. Dies scheint der Fall zu sein, den die Politiker aller Welt vor Augen haben, wenn sie ihre umweltpolitischen Maßnahmen diskutieren und umsetzen. Auch der Stern-Bericht geht implizit von einem solchen Szenarium aus. Die Politikmaßnahmen schieben das Marktgleichgewicht vom Punkt A zum Punkt B; es wird zu jedem Zeitpunkt weniger Kohlenstoff extrahiert, als es sonst der Fall gewesen wäre, und folglich wird auch weniger verbrannt. Der Klimawandel verlangsamt sich.

Abbildung 2: Elastisches Angebot

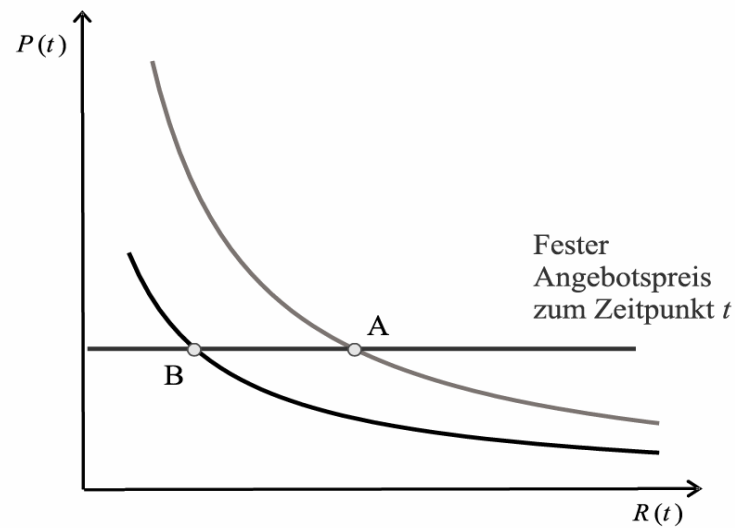
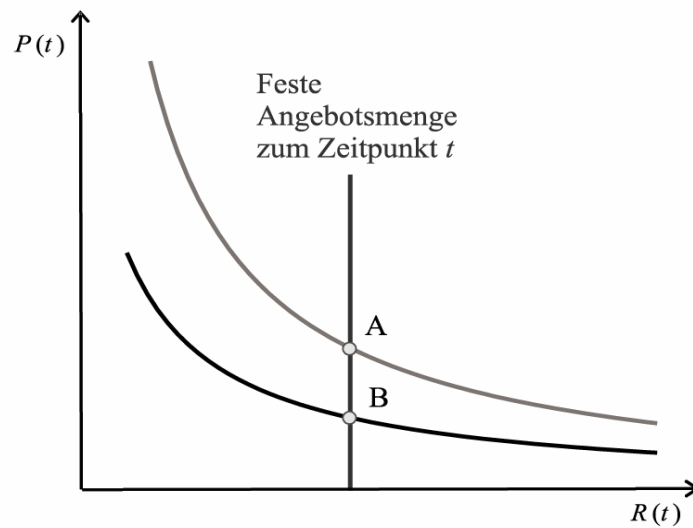


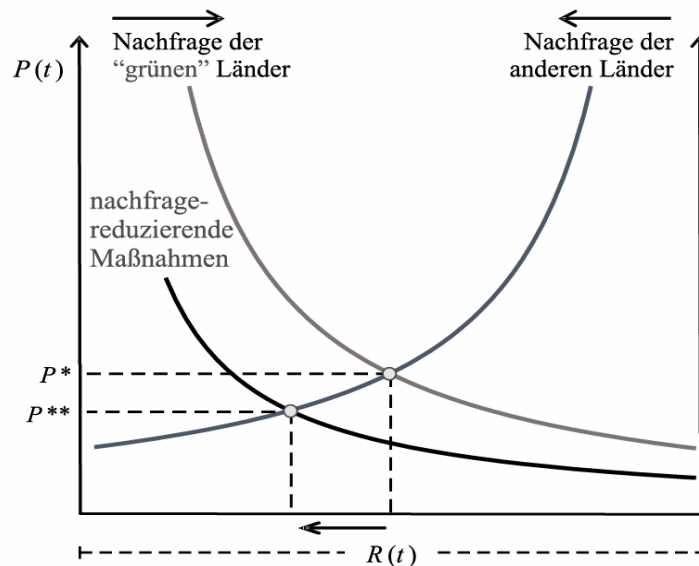
Abbildung 3 zeigt nun aber den Fall eines preisunelastischen Angebots mit einer senkrechten Angebotskurve. Die Ölscheichs und all die anderen Anbieter fossiler Brennstoffe werfen in einer bestimmten Periode eine feste Menge an Brennstoffen auf den Markt und lassen sich dabei von der Höhe des Preises nicht beeinflussen. In diesem Fall wird der Effekt politischer Maßnahmen zur Nachfrageverringering durch eine Preissenkung voll und ganz konterkariert. Nicht die Nachfrage, sondern das Angebot an fossilen Brennstoffen bestimmt das Transaktionsvolumen, und folglich ändert sich die Geschwindigkeit des Klimawandels nicht.

Abbildung 3: Unelastisches Angebot



Der Fall des unelastischen Angebots wird noch deutlicher, wenn man die Nachfragekurve für zwei Ländergruppen aufspaltet, wie es in Abbildung 4 getan wird. Die Differenz zwischen den beiden vertikalen Linien bezeichnet den Weltangebotsstrom an Kohlenstoff in einer bestimmten Periode  $t$ , also das, was in Abbildung 3 durch die Lage der senkrechten Angebotskurve verdeutlicht wird. Auf der Abszisse misst das Diagramm von links nach rechts die Nachfrage der grünen, europäischen Länder, von rechts nach links die Nachfrage der anderen Länder. Eine Nachfrageminderung der europäischen Länder drückt den Weltmarktpreis des Kohlenstoffs von  $P^*$  auf  $P^{**}$  und verteilt das vorhandene Angebot von Europa zu den anderen Ländern um, wie es der Pfeil unter dem Diagramm verdeutlicht.

Abbildung. 4: Wie die grünen Länder den Rest der Welt subventionieren, wenn das Angebot starr ist



Offenkundig ist die Nachfrageminderung der grünen Länder im Fall eines starren Angebots nutzlos. Sie drückt den Weltmarktpreis des Kohlenstoffs so weit, dass andere Verbraucherländer dazu ermutigt werden, ihren Kohlenstoffkonsum zu erhöhen, bis im Endeffekt der gesamte Verbrauch auf dem gleichen Niveau liegt, wie es auch ohne die Politikmaßnahme in derselben Periode der Fall gewesen wäre. Die grünen EU-Länder subventionieren mit ihrer Nachfrageminderung nur die Amerikaner und ermöglichen es ihnen, noch größere SUVs zu fahren, als sie es ohnehin schon tun, und die Chinesen dürfen ihren  $\text{CO}_2$ -intensiven Wachstumsprozesses sogar noch beschleunigen. Der Beitrag zur Verlangsamung des Klimawandels, den die EU-Länder leisten, ist null. Übertragen auf den Fall der mildtätigen Spenden bedeutet dies, dass der Spender nicht etwa nur vergeblich darauf wartet, dass andere es ihm nachtun, sondern mit ansehen muss, wie der nächsten Kirchgänger aus dem Klingelbeutel herausnimmt, was er selbst dort hinein getan hat.

Natürlich ist zu diesem Zeitpunkt der Analyse überhaupt noch nicht klar, wie das Angebot an fossilen Brennstoffen auf Preisänderungen reagiert und ob überhaupt einer der betrachteten Fälle der Wirklichkeit nahe kommt. Dennoch ist es nützlich, sich für einen Moment noch weiter mit dem Fall des preisunelastischen Angebots zu beschäftigen, weil er zeigt, wie oberflächlich die öffentliche Debatte ist.

Ist das Angebot an fossilen Brennstoffen preisunelastisch, hat dies für die Umweltpolitik weit reichende und bisweilen paradoxe Folgen.

- Die Nutzung alternativer Energieträger, wie Windkraft, Solarenergie oder Atomkraft, dämmt den Klimawandel nicht, sondern erhöht nur den weltweiten Energieverbrauch.
- Die Produktion von Biodiesel, Ethanol und Pellets steigert ebenfalls den Energieverbrauch. Zusätzlich beschleunigt sie aber auch noch den Klimawandel, denn die für die Produktion nötige Vernichtung von Waldflächen senkt den Bestand an reduziertem Kohlenstoff auf der Erde, sei es in Form von verbautem Holz in den Gebäuden oder in Form von lebendem Holz in den Wäldern.<sup>4</sup>
- Effizienzverbesserungen bei Verbrennungsprozessen, die nicht auf einer besseren Nutzung der Abwärme, sondern auf einer vollständigeren Verbrennung von Kohlenstoffen beruhen, erhöhen die CO<sub>2</sub>-Produktion und beschleunigen den Klimawandel. Beispiele sind Kraftwerke, die mit feineren Kohlestäuben arbeiten, und Common-Rail-Dieselmotoren, die besonders fein zerstäubten Dieselmotoren, die besonders fein zerstäubten Dieselmotoren, die besonders fein zerstäubten Dieselmotoren unter hohem Druck der Verbrennung zuführen. Sie bewirken, dass ein größerer Anteil der

---

<sup>4</sup> Werden zur Produktion der Bioenergie nicht Wald-, sondern Ackerflächen, die vorher zur Lebensmittelproduktion genutzt wurden, umgewandelt, treibt das die Lebensmittelpreise hoch. Die Auswirkung auf den Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre dagegen ist in diesem Fall bei starrem fossilen Angebot gleich null, weil wir tanken, was wir sonst gegessen und auf diese Weise zu Kohlendioxid gemacht hätten. Auch die Produktion von Bioenergie aus Abfallstoffen, die anderenfalls durch Oxidation zersetzt würden, hat auf die Kohlendioxidkonzentration in der Luft einen Nettoeffekt von null. Die Produktion von Bioenergie aus diesen Abfallstoffen trägt nur dann zur Verlangsamung der Erderwärmung bei, wenn andernfalls der Zersetzungsprozess dieses Materials ohne Oxidation und unter Produktion von Methan vonstattengegangen wäre. Methan hat zwar eine viel kleinere Halbwertszeit als Kohlendioxid, doch über einen Zeitraum von 500 Jahren ist es immer noch sechsmal so gefährlich für die Erderwärmung wie Kohlendioxid. Über eine Periode von 100 Jahren ist es sogar 25mal so gefährlich (vgl. IPCC, 2007, S. 33). Eine Verbrennung von Abfallstoffen kann so gesehen zur Verringerung des Treibhauseffektes führen.

zugeführten Kohlenstoffmoleküle oxidiert wird, was mehr Energie und mehr Kohlendioxid zugleich erzeugt.<sup>5</sup>

Obwohl all dies nur Gedankenexperimente sind, so zeigen sie doch, dass eine bloße Nachfragepolitik bei fossilen Brennstoffen wirkungslos ist, wenn diese Politik nicht auch das Angebot einschränkt. Man muss also die Angebotsreaktionen der Ressourcenbesitzer verstehen, wenn man die Politik beurteilen und effizient gestalten möchte. Nur in dem Maße, wie es der Nachfragepolitik gelingt, die Eigentümer der fossilen Brennstoffe davon zu überzeugen, ihre Lager unter der Erde zu lassen, wird es ihr gelingen, den Klimawandel verlangsamen. Diese triviale Tatsache wurde bisher in der öffentlichen und wissenschaftlichen Debatte dieses Problems übersehen.

#### **4. Das Angebotspotenzial: Chemie, Klimaforschung und Ressourcenbestände**

Wenden wir uns nun der Angebotsseite zu. Dazu muss der Fokus zunächst auf die verfügbaren und ausbeutbaren Lagerstätten von reduziertem Kohlenstoff in der Erdkruste gelegt werden, denn diese Lagerstätten sind die Quellen des CO<sub>2</sub>-Problems. Reduzierter Kohlenstoff, der für die Verbrennung genutzt werden kann, ist in Kohle, Öl und Methan enthalten. Der Verbrennungsvorgang verbindet den Kohlenstoff mit Sauerstoff zu CO<sub>2</sub>. Wird eine Tonne Kohlenstoff verbrannt, so entstehen dadurch 3,6 Tonnen CO<sub>2</sub>. Kohlenstoff tritt normalerweise in Verbindung mit anderen chemischen Elementen auf, insbesondere mit Wasserstoff. Deshalb spricht man bei den fossilen Brennstoffen auch von Kohlenwasserstoffen. Der Wasserstoff kann

---

<sup>5</sup> Was früher als Ruß unverbrannt aus dem Auspuff eines Dieselmotors herauskam, wird heute verbrannt und in Kohlendioxid verwandelt. Das Potenzial für eine noch umfassendere Oxidation des Treibstoffs ist bei modernen Motoren weitgehend ausgereizt. Nur der so genannte Diesotto von Mercedes, ein Dieselmotor mit Zündkerzen, verspricht weitere Verbesserungen in der Energieeffizienz, was dann zwangsläufig auf eine Erhöhung des Kohlendioxid-Ausstoßes pro Liter Diesel hinausläuft. Dagegen sind Verbesserungen an Motoren, die die Abwärme nutzen, wie zum Beispiel der Ersatz mechanischer durch elektrische Pumpen bei den Öl- und Wasserkreisläufen des Motors bei preisunelastischem Angebot fossiler Brennstoffe CO<sub>2</sub>-neutral.



ebenfalls verbrannt werden und trägt zum Energiegehalt der fossilen Brennstoffe bei. Wasserstoff wird durch den Verbrennungsprozess in Wasser umgewandelt und ist für die Umwelt harmlos.<sup>6</sup> Je höher der Wasserstoffgehalt im Brennstoff, desto geringer ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Einheit erzeugter Energie. Insbesondere Methan ist in dieser Hinsicht von Vorteil. Für jedes Kohlenstoffatom hat es vier Wasserstoffatome; jedes von ihnen produziert etwa 30% der Energie des Kohlenstoffatoms. Somit ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Einheit Energie bei der Verbrennung von Methan nicht einmal halb so groß wie bei der Verbrennung von Kohle. Ein Erdgastaxi fährt zu mehr als fünfzig Prozent mit Wasserstoff.

Gleich welchen dieser Brennstoffe man nutzt, die Menge des CO<sub>2</sub>, die bei der Verbrennung entsteht, ist genau proportional zur Menge des verbrannten Kohlenstoffs. Verbrennung bedeutet ja lediglich, dass der Kohlenstoff aus den unterirdischen Lagerstätten herausgeholt, mit Sauerstoff verbunden und dann in die Luft gepustet wird. Im Gegensatz zu einer weit verbreiteten Meinung gibt es keinerlei technologische Möglichkeiten, die CO<sub>2</sub>-Produktion relativ zum Kohlenstoffverbrauch zu vermindern. (Was nicht heißt, dass man das CO<sub>2</sub> nicht außerhalb der Atmosphäre lagern könnte, ein Thema, auf das am Ende dieses Beitrags eingegangen wird.) Ungefähr 55% des CO<sub>2</sub>, das in die Luft entweicht, wird recht schnell, innerhalb weniger Jahrzehnte, von den Meeren und der Biomasse absorbiert, denn es bleibt wegen seines höheren spezifischen Gewichts zunächst in der Nähe der Erdoberfläche. Kohlendioxid ist im Gegensatz zu den anderen Treibhausgasen ein chemisch äußerst stabiles Gas, das sich in der Luft nicht selbst zersetzt. Nur durch chemische Bindung an Wasser, Kalk und andere Stoffe kann es aus der Luft verschwinden. Das ist der Grund dafür, dass sich 45% der CO<sub>2</sub>-Emission noch nach 100 Jahren in der Erdatmosphäre befinden. In den nächsten 200 Jahren werden weitere 20% der ursprünglichen Emissionsmenge abgebaut, so dass nach 300 Jahren noch etwa 25% in der Luft vorhanden sind. Man könnte nun meinen, danach ginge die Entwicklung geometrisch degressiv weiter und treibe

---

<sup>6</sup> Zwar ist Wasserdampf ebenfalls ein starkes Treibhausgas, doch kondensiert überschüssiges Wasser in den Atmosphäre und fällt als Regen herab. Nur endogen, als Folge der Erwärmung der Atmosphäre aufgrund anderer Treibhausgase, nimmt die Konzentration an Wasserdampf in der Luft zu.

den Restbestand mit fortschreitender Zeit asymptotisch gegen Null. Ganz so ist es aber nicht. Aufgrund verschiedener Klimateffekte ist der nach dreihundert Jahren verbleibende Rest an Kohlendioxid außerordentlich stabil und schrumpft praktisch nicht mehr. Nach Aussagen des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2007) dauert es viele tausend Jahre, bis das anthropogene CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre verschwunden ist. Archer (2005) sowie Archer und Brovkin (2005) weisen nach, dass die durchschnittliche Lebensdauer des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre etwa bei 30.000 bis 35.000 Jahren liegt.

Tabelle 2: Das Angebotspotenzial an Kohlenstoff und der Klimawandel

	Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre (GtC)	CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre (ppm)	Durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche (°C)
Vorindustrielle Zeit	600	280	14
Gegenwart	800	380	15
2035 (nach der Schätzung von Stern)	1200	560	17 (15,5–18,4)
Alle Reserven verbrannt: 850 GtC (Schätzungen reichen von 766 bis 983 GtC)	1183	555	17 (15,5–18,4)
2100 (nach der Schätzung von Stern)	1900	900	19 (16,2–22,3)
Alle Ressourcen verbrannt: 4773 GtC (Schätzungen reichen von 3967 bis 5579 GtC)	2948	1384	?
Alle Ressourcen verbrannt: 4773 GtC (Schätzungen reichen von 3967 bis 5579 GtC)	1993	936	19.5 (16,8–22,3)

Die Schätzungen zu den Reserven und den Ressourcen wurden vom World Resource Institute (2006), vom World Energy Council (2000, S. 149) und von der EIA (2007) übernommen. GtC ist die Einheit für Gigatonnen (Milliarden Tonnen) Kohlenstoff. Die entsprechenden Angaben zum Kohlenstoffgehalt entstammen eigenen Berechnungen auf der Basis von Umrechnungskoeffizienten, die von BP (2007, S. 6, 22, 32) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2005, S. 6 f.) veröffentlicht wurden. „Kurzfristig“ bedeutet hier „nach hundert Jahren“, „langfristig“ steht für „die Zeit nach 2300“. Wie im Text erläutert wird, sind 45% der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen noch nach 100 Jahren in der Atmosphäre vorhanden. Nach 300 Jahren befinden sich noch 25% der Emissionen in der Atmosphäre und bleiben dort praktisch für immer. Die Angaben zur Lebensdauer des anthropogenen CO<sub>2</sub> sind Archer (2005), Archer und Brovkin (2006) sowie Hoss et al. (2001) entnommen. Die Temperaturprojektionen entsprechen dem 5–95% Klima-Sensitivitäts-Bereich des Weltklimarats (IPCC TAR, 2001, zitiert nach Stern et al., 2006, S. 12).

Der Stern-Bericht hat die CO<sub>2</sub>-Konzentration als „parts per million“ (ppm) für Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft angegeben und die entsprechenden Auswirkungen auf die Temperatur der Erdatmosphäre prognostiziert. Die Ergebnisse, die von den Autoren des Berichts als wahrscheinlich erachtet wurden, sind zusammen mit den Informationen zu den jeweiligen absoluten Kohlenstoffvorkommen in Tabelle 2 aufgeführt.<sup>7</sup> Die Zahlenwerte beziehen sich allein auf das Gewicht der in der Luft vorhandenen Kohlenstoffmengen. Die am Kohlenstoff haftenden Sauerstoffatome, die das 2,6-fache Gewicht haben, sind in den Gewichtsangaben nicht enthalten.

Eine Umrechnung der Ergebnisse von Stern in absolute Angaben zur Kohlenstoffmenge macht es möglich, die Prognosen zum Klimawandel auf die Schätzungen der Weltreserven und -ressourcen zu beziehen. Mit Reserven bezeichnet man die Lagerstätten, die gegenwärtig bekannt sind und deren Abbau zu herrschenden Preisen rentabel ist. Ressourcen umfassen dagegen auch Lagerstätten, die noch nicht erschlossen sind und/oder nur dann profitabel werden, wenn der Preis substantiell steigt. Dazu gehören zum Beispiel Teersande, Ölschiefer oder Tiefseevorkommen.

Schätzungen zum Umfang der Lagerstätten an Kohle, Öl und Erdgas werden regelmäßig von dem World Resource Institute, dem World Energy Council, der Energy Information Administration der US-Regierung, British Petroleum und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) veröffentlicht. Der Kohlenstoffgehalt dieser Lagerstätten kann leicht berechnet werden. (Es ist der Kohlenstoffgehalt selbst gemeint, nicht die Energie, die dem Kohlenstoff entspricht. Die Rechnung bezieht sich also nicht auf die so genannten Energieäquivalente.) Dementsprechend reichen die Werte der Kohlenstoffreserven von 766 GtC (British Petroleum) bis 983 GtC (World Energy Council). Die Werte für die

---

<sup>7</sup> Der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Atmosphäre ist unter Verwendung der Formel  $5,137 \times 10^{18} \text{ kg}$  als Masse der Atmosphäre kalkuliert, d.h. 1 ppm CO<sub>2</sub> entspricht 2,13 GtC Kohlenstoff (vgl. Trenberth, 1981). Der Stern-Bericht geht von 380 ppm CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre aus. Das entspricht 800 Gt Kohlenstoff in der Atmosphäre. Das UN-Umweltprogramm (UN Environmental Program, 1998) schätzte ungefähr 750 GtC Kohlenstoff in der Atmosphäre in den frühen neunziger Jahren, die CDIAC (2000) schätzte 369 ppm und ungefähr 787 GtC Kohlenstoff in der Atmosphäre für das Jahr 2000.

Ressourcen liegen zwischen 3967 GtC (BGR) und 5579 GtC (World Energy Council). In der zweiten Spalte der Tabelle 2 sind sowohl die Bereiche als auch die Durchschnittswerte der untersuchten Quellen aufgelistet.

Der durchschnittliche Schätzwert für die Reserven liegt bei 850 GtC. Werden diese Reserven verbrannt, so ergibt sich eine Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre, die etwa zweimal so hoch ist wie in vorindustrieller Zeit und der Stern-Prognose für das Jahr 2035 nahe kommt. Nach dieser Prognose wird die durchschnittliche Temperatur auf der Erde gegenüber vorindustrieller Zeit um 3°C ansteigen, nämlich von 14°C auf 17°C. Das Szenarium, das der Stern-Bericht für das Jahr 2100 mit einem Temperaturanstieg von 5°C, also von 14°C auf 19°C, entwirft, entspricht einem fossilen Kohlenstoffverbrauch von 1900 Gt. Damit wären mehr als alle Reserven aufgebraucht, aber weniger als alle Ressourcen.

Die interessantere Frage ist nun, was geschehen wird, wenn alle Ressourcen aufgebraucht werden. Die beiden letzten Zeilen der Tabelle zeigen dies. Werden die Reserven sehr schnell, etwa bis 2100, verbraucht, so führt dies, bezogen auf die vorindustrielle Zeit, zu mehr als einer Vervierfachung der Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre. Das ist ein wahrhaftes Katastrophenszenario. Obwohl niemand es gewagt hat, hierfür den Temperaturanstieg zu prognostizieren, ist doch klar, dass Temperatur an der Erdoberfläche weit über 19°C hinaus steigen würde. Das ist die Konstellation bei der die Menschheit nach Meinung von Stern „unbekanntes Territorium“ betreten würde.

Langfristig, in etwa 300 Jahren, wenn nur noch 25% der Emission in der Atmosphäre verbleiben, könnte man mit den Wirkungen selbst eines solchen Szenariums gerade noch umgehen. Die Temperatur würde dann nur noch 19,5°C betragen, wie im Stern-Szenario für das Jahr 2100. Es ist für die Menschheit also essenziell, dass das Kohlendioxid so langsam emittiert wird, dass die Natur eine Chance hat, den Löwenanteil der Emission zu absorbieren. Nur so kann eine katastrophale Konzentration vermieden werden. Aber selbst in diesem Fall könnte die Temperatur auf einen so hohen Wert angestiegen sein, dass die Erde dauerhaft

geschädigt wird. Stern et al. haben dies glaubhaft in ihrem umfangreichen und sorgfältig recherchierten Report demonstriert.

Die Natur hat die Menschheit mit einem Angebot an reduziertem, oxidierbarem Kohlenstoff in der Erdkruste ausgestattet. Die ökonomischen Entscheidungen der Ressourceneigentümer verwandeln das Angebot der Natur in ein Marktangebot, das Marktangebot findet über den Preismechanismus seine Nachfrage, und durch die Gesetze der Chemie wird dieses Angebot zum einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß, der die Atmosphäre belastet. Deshalb kann man den von Menschen verursachten Treibhauseffekt nicht verstehen, wenn man nicht weiß, wie der Markt für fossile Brennstoffe funktioniert.

## **5. Die intertemporale Angebotsentscheidung im Idealfall**

Das Angebot auf dem Markt für fossile Kohlenstoffe wird von ganz anderen Gesetzen gesteuert als das Angebot normaler Güter, weil der Kohlenstoff aus erschöpfbaren Lagerstätten stammt und nicht leicht reproduzierbar ist. Das Angebot der Natur ist in der Tat so konstant, wie es im oben ausgeführten Gedankenexperiment unterstellt wurde. Es gibt jedoch zwei ökonomische Entscheidungen der Ressourcenbesitzer, die das Angebot der Natur in ein Marktangebot verwandeln und das Marktangebot prinzipiell preisabhängig machen. Erstens müssen die Ressourcenbesitzer entscheiden, welchen Anteil ihrer Bestände sie langfristig überhaupt fördern wollen, und zweitens müssen sie sich klar darüber werden, wie sie die Fördermengen über die Zeit verteilen wollen. Durch beide Entscheidungen wird der Angebotsstrom an fossilen Brennstoffen bestimmt, der den CO<sub>2</sub>-Ausstoß und demzufolge die Geschwindigkeit des Klimawandels festlegt.

## 5. 1 Ersatztechnologien und Abbauvolumen

Die erste dieser Entscheidungen hängt davon ab, wie sich der Preis der geförderten Ressource im Verhältnis zu den Stückkosten der Extraktion verhält, wenn die unterirdischen Lagerstätten und mit ihnen die laufenden Abbaumengen immer kleiner werden. Ich bleibe hier bei der Standardannahme der Theorie der erschöpfbaren Ressourcen, dass die Ressource unverzichtbar ist. Während die Stückkosten für alle relevanten Bestände beschränkt bleiben, steigt der Preis ins Grenzenlose, wenn der Abbaustrom gegen null geht. Ein bisschen Extraktion, das den allerwichtigsten Bedarf deckt, wird somit immer profitabel bleiben, wie klein auch immer die Restmenge im Boden ist und wie hoch auch immer die Extraktionskosten für diese Restmengen sind.<sup>8</sup> Diese Annahme schließt aus, dass bestimmte Teile der wirtschaftlich relevanten Ressourcenbestände auch auf die lange Frist, nach tausenden von Jahren, nie zur Disposition stehen.

Natürlich gibt es Ersatztechnologien, die den Preisanstieg verlangsamen. Je höher der Preis für fossile Brennstoffe ist, desto größer sind auch die endogenen Anreize, den Verbrauch dieser Brennstoffe zu vermeiden und auf alternative Energieträger wie beispielsweise die Solar- oder die Nuklearenergie auszuweichen. Das Spektrum der in Tabelle 1 angeführten Maßnahmen, die die Nachfrage senken, wird zum Einsatz kommen, sobald die Preise steigen, und dies wiederum wird den Preisanstieg dämpfen. Das alles steckt, wie erläutert, bereits hinter den in Abbildungen 2 bis 4 gezeigten Nachfragekurven (und wurde in Sinn 2007a und 2007b formal modelliert).

Die Frage ist nur, ob solche Ersatztechnologien jemals wirklich *perfekte* Substitute für fossile Kohlenwasserstoffe sein können in dem Sinne, dass sie bei der Nachfragekurve eine feste Preisobergrenze einziehen, jenseits derer die Nachfrage völlig verschwindet. Nur solche

---

<sup>8</sup> Die formale Annahme in Sinn (2007b) ist, dass die Nachfrageelastizität und die Stückkosten der Extraktion endliche Obergrenzen (beliebiger Höhe) haben. Eine Obergrenze der Nachfrageelastizität impliziert, dass der Preis der Ressource gegen unendlich strebt, wenn die verkaufte Menge gegen null geht. Die Annahme wirkt über die Transversalitätsbedingung im Planungsproblem der Ressourcenanbieter und stellt sicher, dass die Ressource für  $t \rightarrow \infty$  extrahiert wird.

uneingeschränkt perfekten Substitute würden den Ressourcenabbau vor einer Erschöpfung der Lagerstätten zum Stillstand bringen. Es spricht einiges dafür, dass es solche perfekten Substitute nicht wirklich gibt.

Sicherlich stimmt es, dass man mit Nuklear- und Solarstrom viele Anwendungen fossiler Brennstoffe ersetzen kann. Solange elektrischer Strom direkt verwendet werden kann, sind diese Ersatztechnologien perfekte Substitute für fossile Brennstoffe. Indes gibt überall dort, wo die Energie mobil eingesetzt wird, insbesondere im Transportwesen selbst, natürliche Grenzen der Substituierbarkeit. Man braucht dort entweder Akkus oder muss den Strom zunächst in Wasserstoff umwandeln, um ihn auf diese Weise zu transportieren. Autos und Schiffe kann man mit Wasserstoff antreiben. Bei den Flugzeugen wird es aber schwierig. So ist kaum vorstellbar, dass beispielsweise Hubschrauber oder Düsenjäger jemals mit Wasserstoff als Energiequelle funktionieren würden. Wasserstoffspeicher benötigen außerordentlich viel Platz. Auf 200 bar komprimierter Wasserstoff braucht relativ zu seinem Energiegehalt 13mal soviel Platz wie Benzin und muss in schweren, druckfesten Behältern gespeichert werden. Wird ein solcher Behälter bei einem Absturz zerstört, entwickelt er sich zu einer wahren Bombe. Nur noch vier Mal so viel Platz wie Benzin nimmt der Wasserstoff ein, wenn man ihn extrem herunterkühlt, so dass er flüssig wird. Aber dann braucht man umfangreiche Kühlaggregate und Isoliergefäße. In jedem Fall geht ein erheblicher Teil der Energie durch die Komprimierung oder Kühlung verloren.

Ein perfektes Substitut für fossile Brennstoffe bieten nur die Biotreibstoffe, die chemisch ganz ähnlich strukturiert sind und sich genauso gut speichern und transportieren lassen. Eine feste Preisobergrenze wird aber auch durch sie nicht begründet. Steigt man von fossilen auf biologische Brennstoffe um, wird nämlich der Preis solcher Brennstoffe steigen, weil die Anbauflächen, die für ihre Produktion zur Verfügung stehen, äußerst begrenzt sind. Nach Angaben der Internationalen Energieagentur ist eine Fläche von 1,4 Gigahektar notwendig, um den Treibstoffbedarf allein für das Transportwesen zu befriedigen (vgl. IEA, 2006, S.

289). Das ist weniger als ein Fünftel des gegenwärtigen Verbrauchs an fossilen Brennstoffen, jedoch bereits die gesamte Landwirtschaftsfläche der Welt. Da steigende Nahrungsmittelpreise rasch einen unüberwindlichen politischen Widerstand gegen die Umwidmung landwirtschaftlicher Flächen von der Nahrungsmittel- auf die Brennstoffproduktion erzeugen würden, steht sicherlich nur ein kleiner Anteil dieser Flächen für die Produktion von biologischen Brennstoffen zur Verfügung, was wiederum heißt, dass nur ein verschwindend kleiner Teil der Weltenergieproduktion durch biologische Energie abgedeckt werden kann. Die Tortilla-Krise in Mexiko City im Januar 2007 belegt in aller Deutlichkeit, wie eng begrenzt die politischen Möglichkeiten für die Bioenergie sind.<sup>9</sup> Eine Deckelung der Preise für fossile Brennstoffe, die den Abbau fossiler Lagerstätten jenseits eines bestimmten Stückkostenniveaus für immer beenden würde, ist aufgrund solcher Erwägungen jedenfalls nicht in Sicht. Der letzte Hubschrauber des indischen Präsidenten und der letzte chinesische Kampfbomber werden so lange weiter fliegen, bis die Lager der fossilen Brennstoffe fast gänzlich ausgebeutet sind.

Zugegeben, es gibt andere theoretische Annahmen. Sie beschreiben aber sehr spezielle Randbedingungen der Produktionsprozesse und des Verlaufs der Nachfragekurve, die man in dieser historischen Phase prinzipiell noch nicht beobachten kann. Bei den folgenden Überlegungen unterstelle ich deshalb eine graduelle Extraktion mit einem schrumpfenden Abbaustrom, der nicht versiegt, bevor alle wesentlichen Restbestände verbraucht sind. Das Problem des Klimawandels besteht nicht darin, ob einige der unterirdischen Lagerstätten der fossilen Energieträger auch noch nach zehntausenden von Jahren unangetastet bleiben, sondern wie schnell die Ressourcenbesitzer ihre Bestände während der nächsten paar hundert

---

<sup>9</sup> Die Tortilla-Krise erreichte mit öffentlichen Protestaktionen in Mexiko City im Januar 2007 ihren Höhepunkt. Tortillas sind aus Mais hergestellte Fladenbrote. Der Preis von Mais, den Mexiko etwa zu 50% aus den USA importiert, erhöhte sich im Laufe des Jahres 2006 um mehr als das Doppelte, hauptsächlich weil in den USA immer mehr Mais zur Produktion von Bioethanol verwendet wurde. Mexiko versuchte das Problem zu lösen, indem es eine Preisobergrenze für Tortillas festlegte und den zollfreien Import von Mais erlaubte.



Jahre extrahieren. Das ist das eigentliche Angebotsproblem in dieser historischen Phase der menschlichen Entwicklung.

## **5.2 Das Portfolioproblem der Ressourcenanbieter**

Das intertemporale Allokationsproblem der Ressourcenbesitzer ist ein Problem der Portfoliooptimierung, ähnlich wie bei einem Investmentbanker. Die Ressourcenbesitzer, also die Eigentümer der Lagerstätten an Kohle, Öl und Gas, stehen vor der Alternative, ihr Vermögen als Ressource im Boden zu belassen oder die Lagerstätten abzubauen und die entstehenden Gewinne am Kapitalmarkt anzulegen. Da die fossilen Brennstoffe mit fortschreitender Extraktion immer knapper werden, steigt ihr Marktpreis immer weiter an und die unberührten Lagerstätten gewinnen immer mehr an Wert: Die Lagerstätten erzielen eine Rendite in Form laufender Wertzuwächse. Auf der anderen Seite lockt die Kapitalmarktrendite, wenn man extrahiert. Ähnlich wie es Investmentbanker tun, werden kluge Ressourcenbesitzer ihr Vermögen so zwischen einer Anlage über und unter dem Boden aufteilen, dass die Gesamtrendite des Vermögens maximiert wird. Sie werden die Extraktion in die Zukunft verlagern, wenn der Wertzuwachs der Lagerstätten über dem Kapitalmarktzins liegt. Und sie werden ihre heutigen Fördermengen vergrößern, wenn der Wertzuwachs der Lagerstätten kleiner als der Kapitalmarktzins ist.

Da alle Ressourcenbesitzer diesem einfachen Entscheidungsprinzip folgen, muss sich der Preis der (extrahierten) fossilen Brennstoffe so entwickeln, dass der Wertzuwachs der im Boden belassen Lagerbestände der Kapitalmarktrendite gleicht. Bieten die Kapitalmärkte die attraktiveren Bedingungen, weil der gegenwärtigen Energiepreis hoch und der erwartete zukünftige Preis niedrig ist, werden sich die meisten Ressourcenbesitzer entschließen, die Extraktion in der Gegenwart zu Lasten der Zukunft auszudehnen. Dadurch fallen die gegenwärtigen Energiepreise, doch steigen die zukünftigen, was die Attraktivität der sofortigen Extraktion verringert. Umgekehrt ist es, wenn der erwartete Wertzuwachs der

Lagerbestände die Kapitalmarktrendite übersteigt. Das ist der Fall, wenn der gegenwärtige Ressourcenpreis im Vergleich zum zukünftigen Preis niedrig ist. Die Ressourcenbesitzer entscheiden sich nun, die Extraktion auf die Zukunft zu verschieben, um die Wertzuwächse auf diese Weise auszunutzen. Doch indem sie das tun, erhöhen sie die aktuellen und senken sie die zukünftigen Preise, was den laufenden Wertzuwachs der Lagerbestände verringert und der Verschiebung die Attraktivität wieder nimmt. Im Gleichgewicht sind die Unternehmen indifferent zwischen einer Verschiebung der Extraktion und der sofortigen Kapitalmarktinvestition. Es wird dann ein Abbaupfad realisiert, bei dem die Rendite der Lagerbestände der Kapitalmarktrendite gleicht. Diese Regel gilt ganz allgemein, unabhängig davon, ob es Abbaukosten gibt und wovon diese Kosten im Einzelnen abhängen.<sup>10</sup>

Im einfachsten theoretischen Fall ohne Extraktionskosten impliziert die Portfolio-Regel, dass der Preis der extrahierten Ressource mit einer Rate steigt, die dem Zinssatz entspricht, denn der Preis der extrahierten Ressource gleicht dann dem Preis der Ressource im Lager. Diese Implikation nennt man die Hotelling-Regel, genannt nach der grundlegenden Arbeit Hotellings (1931) zum Verhalten von Ressourcenbesitzern.

### **5.3 Das Pareto-Optimum ohne Treibhauseffekt**

Die Hotelling-Regel ist ein Stück positive Theorie, denn sie versucht zu beschreiben, wie Märkte tatsächlich funktionieren. Interessanterweise entspricht aber diese Regel genau der normativen Extraktionsregel, die von Solow (1974) und Stiglitz (1974) hergeleitet wurde (für den Fall ohne Extraktionskosten und Treibhausexternalität). Solow und Stiglitz betrachten das Portfolio-Problem aus der Perspektive der Gesellschaft statt aus der Perspektive des einzelnen

---

<sup>10</sup> Die Regel gilt sogar unabhängig von der Marktform: Konkurrenz, Oligopol und Monopol sind gleichermaßen erfasst. Man beachte, dass diese Regel nicht die Hotelling-Regel ist, sondern sie impliziert. Aber nicht einmal die Hotelling-Regel selbst wird durch Marktmacht wesentlich verändert, wie Stiglitz (1976) gezeigt hat. Der Monopolist wählt den Abbaupfad so, dass der Grenzerlös aus dem Verkauf der Ressource mit einer Rate steigt, die dem Marktzins entspricht. Im einfachsten Fall einer konstanten Nachfrageelastizität ist der Grenzerlös indes proportional zum Preis, so dass sich wie im Konkurrenzfall die Hotelling-Regel ergibt. Bei nicht konstanter Nachfrageelastizität wird die Hotelling-Regel modifiziert, aber die Modifikation kann in beide Richtungen gehen. Eine systematische Verknappung des Angebots, wie sie bei reproduzierbaren Ressourcen zu erwarten ist, muss man bei erschöpfbaren natürlichen Ressourcen nicht befürchten.

Unternehmens. Die Gesellschaft hat zwei Möglichkeiten, Konsummöglichkeiten auf zukünftige Generationen zu übertragen. Sie kann natürliches Kapital in Form von Bodenschätzen vererben. Oder sie kann mittels der extrahierten Ressource Sachkapital produzieren und dieses dann vererben.

Die Vererbung einer zusätzlichen Einheit Sachkapitals hat den Vorteil, dass eine Rendite in Form der Grenzproduktivität des Kapitals entsteht. Das Kapital steht nicht nur zukünftigen Generationen selbst zur Verfügung, sondern erwirtschaftet bis dahin ein zusätzliches Sozialprodukt, das ebenfalls von diesen Generationen konsumiert werden kann.

Die Vererbung einer zusätzlichen Ressourceneinheit im Boden liefert zwar keine direkt damit vergleichbare Rendite. Sie kann aber den Vorteil haben, dass sich die Grenzproduktivität der extrahierten Ressource bei der Güterproduktion durch Abwarten steigern lässt, weil Brennstoffe immer knapper werden. Je knapper ein Produktionsfaktor ist, desto höher ist der Grenzbeitrag zur Produktion, den er zu leisten vermag. Die Wachstumsrate der Grenzproduktivität der extrahierten natürlichen Ressource verkörpert einen gesellschaftlichen Vorteil einer Konservierungsstrategie, der mit dem Vorteil der Kapitalbildung vergleichbar ist.

Die aus gesellschaftlicher Sicht optimale Verteilung des Vermögens zwischen dem Sachkapital auf dem Boden und dem Kohlenstoff im Boden ist dann gewährleistet, wenn beide Vorteile gleich hoch sind, wenn also die Wachstumsrate der Grenzproduktivität der geförderten Ressource genauso groß ist wie die Grenzproduktivität des Kapitals (nicht: wie die Wachstumsrate der Grenzproduktivität des Kapitals). Ist diese Bedingung, die man Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung nennt, erfüllt, so herrscht ein intertemporales Pareto-Optimum in dem Sinne, dass es nicht möglich ist, durch die Änderung des Abbaupfades zukünftige Generationen mit einem höheren Lebensstandard auszustatten, ohne dabei gegenwärtige Generationen schlechter zu stellen. Die Effizienzbedingung ist das normative Pendant zu der

positiven Hotelling-Regel, da im Marktgleichgewicht das Grenzprodukt der extrahierten Ressource ihrem Preis und das Grenzprodukt des Sachkapitals dem Zinssatz gleicht.

Man kann sowohl die Hotelling-Regel als auch die Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung auf den Fall von Extraktionskosten erweitern. Da die Lagerstätten der fossilen Energieträger nicht gleich gut zugänglich sind, entstehen bei ihrer Förderung unterschiedlich hohe Stückkosten der Extraktion und Exploration. Üblicherweise beuten die Firmen die Lagerstätten mit den geringsten Stückkosten zuerst aus. Erst im Anschluss daran, wenn die Ressource knapper wird und die Käufer bereit sind, höhere Preise zu zahlen, explorieren sie die Lagerstätten mit höheren Stückkosten. Somit sind die Stückkosten der Extraktion umso höher, je kleiner der Restbestand in den Lagern ist.

Durch die Abhängigkeit der Stückkosten vom restlichen Ressourcenbestand wird das intertemporale Marktgleichgewicht, wie es oben diskutiert wurde, modifiziert. Die Regel, dass der Wertzuwachs der Ressource in Situ dem Kapitalmarktzins gleicht, wird jetzt in die Bedingung transformiert, dass der Kapitalmarktzins dem Preisanstieg relativ zum Preis nach Abzug der Stückkosten der Extraktion gleicht. In ähnlicher Weise (ohne die Schäden des Klimawandels zu berücksichtigen) verändert sich die Bedingung für ein intertemporales Pareto-Optimum. Pareto-Optimalität erfordert jetzt, wie in Sinn (1981) gezeigt wurde, dass der Abbaupfad so gewählt wird, dass die Zunahme des Grenzprodukts der Ressource in Relation zu diesem Grenzprodukt abzüglich der Stückkosten der Extraktion genauso groß ist wie die Grenzproduktivität des Sachkapitals. Auch die modifizierte Hotelling-Regel stimmt mit der modifizierten Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung überein, weil die Grenzproduktivität des Kapitals dem Zins und die Grenzproduktivität der Ressource ihrem Marktpreis entspricht. Somit wählen die Märkte im Prinzip auch dann einen Pareto-optimalen Extraktionspfad, wenn es bestandsabhängige Extraktionskosten gibt (was angesichts der Hauptsätze der Wohlfahrtstheorie nicht verwunderlich ist). Soweit jedenfalls die neoklassische Theorie unter sehr idealisierenden Annahmen.

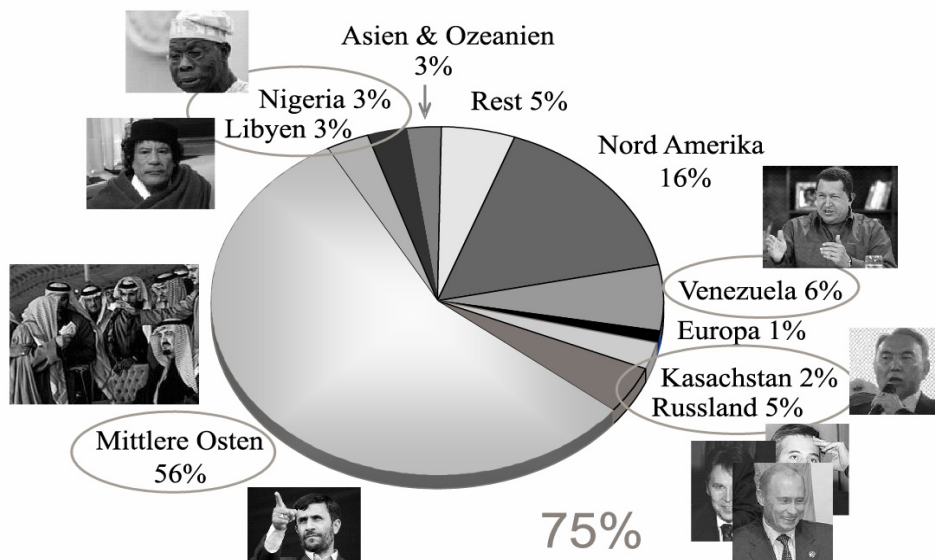
## 6. Ursachen des Marktversagens

In der Realität funktioniert der Rohstoffmarkt freilich lange nicht so effizient, wie es bislang dargestellt wurde. Es gibt verschiedene Ursachen für Marktversagen. Die wichtigsten sind unsichere Eigentumsrechte und der Treibhauseffekt.

### 6. 1. Unsichere Eigentumsrechte

Unsichere Eigentumsrechte sind für die Ressourcenbesitzer ein ernstzunehmendes Problem, wenn man bedenkt, dass die meisten der fossilen Brennstoffe in Ländern lokalisiert sind, die unter instabilen politischen Verhältnissen leiden. Dies trifft nur in einem geringen Ausmaß auf die Kohlelagerstätten zu, die sich hauptsächlich in China und den USA befinden. Jedoch sind die Methan- und insbesondere die Rohölvorkommen von diesem Problem stark betroffen. Abbildung 5 verdeutlicht dies anhand der Verteilung der Rohölreserven.

Abbildung 5: Weltölreserven



Quelle: Energy Information Administration (2007).

75% der Weltölreserven lagern in Venezuela, Kasachstan, Russland, dem Mittleren Osten, Libyen und Nigeria, Regionen mit instabilen politischen Verhältnissen und unsicheren Eigentumsrechten. Es sind nicht José Barroso oder Angela Merkel, sondern Potentaten wie Hugo Chavez, Vladimir Putin und seine Oligarchen, Mahmud Ajhmadinejad oder Mummar al-Gaddafi, die entscheiden, wie schnell das Öl gefördert wird und wie schnell sich die Erde erwärmt. Und leider gibt es allen Grund zu befürchten, dass diese Potentaten das Öl zu schnell aus der Erde herausholen.

Die unsicheren Eigentumsrechte an den Ölfeldern führen nämlich dazu, dass die Ressourceneigner wenig Interesse an einer konservativen Extraktionspolitik haben, weil sie stets befürchten müssen, dass ihre Nachkommen oder ihr Clans die Macht verlieren, bevor sie in der Lage sind, das Öl zu extrahieren. Möglicherweise wird eine Revolution ein rivalisierendes Regime an die Macht bringen, möglicherweise wird eine demokratische Revolution die regierende Klasse des Landes hinwegspülen. Angesichts dieser Unsicherheiten ist es vorteilhafter, das Öl so schnell wie möglich zu extrahieren und die Einnahmen auf einem Schweizer Bankkonto zu deponieren.

Mit anderen Worten: Unsichere Eigentumsrechte implizieren, dass Wertzuwächse in Höhe des Zinssatzes nicht mehr ausreichen, die Ressourcenbesitzer für einen Aufschub der Extraktion zu kompensieren. Stattdessen muss der Extraktionspfad mit einer höheren Extraktionsrate beginnen, die dann im Zeitablauf schneller schrumpft, so dass der jährliche Wertzuwachs für die Lagerstätten hoch genug ist, neben dem Zins auch noch das Enteignungsrisiko zu kompensieren. Das wiederum bedeutet, dass die Marktkräfte keinen Extraktionspfad erzeugen, der dem Kriterium der intertemporalen Pareto-Optimalität genügt. Eine Verlangsamung der Extraktion bei gleichzeitiger Verringerung des Investitionsvolumens würde es möglich machen, den Konsum zukünftiger Generationen zu erhöhen, ohne den Konsum der heutigen Generationen zu verringern.

## **6. 2 Pareto-Optimalität und Treibhauseffekt**

Dass man versuchen sollte, die Extraktion zu verlangsamen, gilt umso mehr, als der Treibhaus-Effekt bereits für sich genommen impliziert, dass selbst Märkte mit perfekten Eigentumsrechten die fossilen Treibstoffe zu schnell extrahieren. Der Grund dafür liegt in den externen Kosten des Treibhaus-Effekts, also den Nachteilen für andere, die sich nicht in Marktpreisen niederschlagen. Der geförderte Kohlenstoff (oder etwa 25 bis 45% davon, wie oben erläutert) wird in der Atmosphäre in oxidierte Form akkumuliert und verursacht dort dauerhafte nicht durch Geldzahlungen kompensierte Schäden, deren Beseitigung einen bestimmten Anteil des Sozialprodukts in Anspruch nimmt. Dies impliziert, wie in Sinn (2007 a) formal gezeigt wurde, dass ein Pareto-optimaler Abbaupfad für fossile Brennstoffe durch einen langsameren Verbrauch der fossilen Brennstoffe gekennzeichnet ist, als er vom Markt realisiert wird.

Man kann das Ergebnis vielleicht am besten so verstehen, dass man den Bestand an  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre quasi als Antimaterie zum Kapitalstock begreift, den die Menschheit unter anderem mit Hilfe fossiler Brennstoffe hat schaffen können. Der Kapitalstock erzeugt mit seiner positiven Grenzproduktivität ein Motiv für eine rasche Ressourcenextraktion. Je höher nämlich diese Grenzproduktivität ist, desto schneller muss im Pareto-Optimum die Grenzproduktivität des Brennstoffeinsatzes anwachsen. Eine schnell anwachsende Grenzproduktivität verlangt eine mit hohem Niveau beginnenden und dann steil abfallenden Zeitpfad dieses Einsatzes. Der akkumulierte  $\text{CO}_2$ -Bestand, der das Spiegelbild des akkumulierten Kapitalbestands ist, hat eine negative Grenzproduktivität, die der Grenzproduktivität des Kapitals entgegenwirkt. Je stärker negativ diese Grenzproduktivität ist, desto langsamer sollte der Bestand an fossilen Brennstoffen unter dem Aspekt der intertemporalen Pareto-Optimalität abgebaut werden.

Oder man kann es auch so sehen: Durch den Aufschub der Extraktion kann man den Konsum in der Zukunft nicht nur deshalb erhöhen, weil die Ressource in der Zukunft knapper

ist und folglich einen höheren Grenzbeitrag zum Sozialprodukt leistet, sondern auch weil ein kleinerer Anteil des Sozialprodukts für die Beseitigung von Klimaschäden absorbiert wird. Deshalb kann der Konsum zukünftiger Generationen steigen, ohne dass der Konsum der gegenwärtigen Generation eingeschränkt wird, wenn ein größerer Anteil der fossilen Brennstoffe in der Erde gelassen und statt dessen etwas weniger Sachkapital produziert wird.

Treibhauseffekt und unsichere Eigentumsrechte vergrößern die Differenz zwischen dem tatsächlichen und dem effizienten Extraktionsvolumen. Unsichere Eigentumsrechte implizieren, dass die Märkte die fossilen Brennstoffe schneller extrahieren, als sie es im Fall von sicheren Eigentumsrechten täten. Der Treibhauseffekt hingegen impliziert, dass der Ressourcenabbau langsamer stattfinden sollte, als es bei einem Markt mit perfekten Eigentumsrechten der Fall wäre. Unsichere Eigentumsrechte beschleunigen also die Extraktion, obwohl die Extraktion wegen des Treibhauseffektes eigentlich gedrosselt werden sollte.

## **7. Das „grüne Paradoxon“**

Die Analyse des intertemporalen Marktgeschehens hat nun einem Punkt geführt, an dem die Frage nach den tatsächlichen Auswirkungen der Wirtschaftspolitik auf soliderer Basis wieder aufgegriffen werden kann, als es mittels statischer Angebots- und Nachfragediagramme möglich war.

### **7.1 Reaktionen auf Energiepreisänderungen**

Stern et al. (2006) haben den Standpunkt vertreten, dass die Politik versuchen sollte, den Klimawandel mit Hilfe einer „carbon tax“, also einer Steuer auf den Kohlenstoffeinsatz und -ausstoß zu verlangsamen. Dabei nehmen sie implizit an, dass der Zeitpfad der Produzentenpreise für fossile Brennstoffe fest ist, so dass die Steuer additiv zu diesen Preisen



hinzutritt und die Nachfrage verringert. Die verringerte Nachfrage wiederum bestimmt unmittelbar das Angebot der Produzenten und das Transaktionsvolumen.

Diese Annahme ist jedoch von der Realität weit entfernt. Wie das Angebot wirklich auf Nachfragereduktionen reagiert, hängt vom intertemporalen Entscheidungskalkül der Ressourcenbesitzer ab, und das hat wenig mit den statischen Angebotsreaktionen zu tun, wie man sie bei reproduzierbaren Gütern vorfindet.

Ein wesentliches Kennzeichen des intertemporalen Angebotsproblems ist die inverse Beziehung zwischen dem Angebot in der Gegenwart und der Zukunft. Wenn Anbieter tatsächlich mit einer Angebotsverringering auf eine heutige Nachfragereduktion reagieren, so werden sie das Angebot in der Zukunft erhöhen, weil sie ihre Bestände ja irgendwann verkaufen müssen. Und wenn sie heute mehr anbieten, müssen sie das Angebot in der Zukunft senken, weil sie dann nur noch wenig auf Lager haben. Welcher dieser Fälle vorkommt, hängt vom zeitlichen Verlauf der Nachfragereduzierung ab, den die Anbieter erwarten.

Eine exogene Nachfragereduzierung in der Gegenwart, die heute und in der nahen Zukunft die Preise drückt, veranlasst die Anbieter, ihre Extraktion in die Zukunft zu verlagern, was den Klimawandel verlangsamt. Indes wird eine exogene Nachfragereduktion, die für die Zukunft angekündigt oder erwartet wird und entsprechend erst später den Preispfad drückt, zur Folge haben, dass in der Zukunft weniger, dafür aber in der Gegenwart mehr extrahiert wird. Das beschleunigt den Klimawandel. Es folgt, dass es den Zwischenfall einer symmetrischen Nachfragereduzierung in der Gegenwart und der Zukunft geben muss, bei dem der Angebotspfad letztendlich überhaupt nicht reagiert und sich folglich die Geschwindigkeit des Klimawandels nicht ändert. Das wäre dann der Fall, bei dem in jeder Periode tatsächlich ein starres Angebot vorliegt, wie es in den Abbildungen 3 und 4 angenommen wurde. Die anfangs für diesen Fall dargelegten Effekte, von der Additivität der Kernkraft und des Biopors bis hin zur Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes durch die Verwendung

von Common-Rail-Dieselmotoren, sind insofern gar nicht so pervers, wie es zunächst den Anschein haben mochte.

Der zeitliche Verlauf des Angebots der Ressourcenbesitzer erinnert an ein geschlossenes hydraulisches System. Wenn man den Kolben an einer Stelle drückt, kommen sie anderswo heraus, und wenn man alle Kolben gleichmäßig drückt, bewegt sich keiner.

Wie das Angebot auf die von der Nachfragepolitik ausgehenden Preissignale reagiert, wurde schon in Long und Sinn (1985) detailliert untersucht. Dort wird eine sehr allgemeine Klasse von Extraktionskostenfunktionen, die alle relevanten Fälle inklusive der Annahmen dieses Aufsatzes umschließen, betrachtet. Es wird gezeigt, dass die Reaktionen des Extraktionspfades davon abhängen, wie die Nachfragereduktion den Zeitpfad des Produzentenpreises bei gegebenem Extraktionspfad verändern würde, also dann, wenn die Anbieter nicht auf die Nachfrageänderung reagieren würden. Es kommt auf das Ausmaß der vertikalen Absenkung der Nachfragekurven zu den verschiedenen Zeitpunkten an, gemessen jeweils bei den Mengen, die sich ohne die Politikintervention ergeben hätten. Ich spreche vom „absoluten“ und vom „relativen Preiskeil“, um die absolute und die relative Absenkung der Nachfragekurve zu bezeichnen, der sich die Produzenten zu einem bestimmten Zeitpunkt gegenüber sehen. Sinn und Long zeigen, dass der Verlauf des (auf einen festen Zeitpunkt berechneten) Barwertes des absoluten Preiskeils das Angebotsverhalten erklärt, weil ihm die Unternehmen ausweichen wollen. Sinkt dieser Barwert im Zeitverlauf, verschieben die Ressourcenbesitzer die Extraktion in die Zukunft. Steigt hingegen der Barwert des absoluten Preiskeils im Zeitverlauf, verlagern sie die Extraktion in die Gegenwart. Bleibt der Barwert des absoluten Preiskeils im Zeitverlauf gleich, ändern sie den Zeitpfad des Angebots nicht. Um im Bild zu bleiben, ist das der Fall, wo alle Kolben des hydraulischen Systems gleichmäßig gedrückt werden und sich deshalb keiner bewegt.

Um diese Aussage in eine spezifische Politikmaßnahme zu übersetzen, sei unterstellt, dass alle Regierungen der Verbraucherländer eine zeitinvariante Wertsteuer auf die Nutzung

fossilen Brennstoffs erheben. Eine solche Wertsteuer erzeugt einen konstanten relativen Preiskeil. Bei unverändertem Extraktionspfad würde die Steuer den Produzentenpreis über den gesamten Zeitverlauf um den gleichen Prozentsatz drücken. Sind die Extraktionskosten vernachlässigbar, so dass die Hotelling-Regel gilt (Preissteigerungsrate = Zins), so steigt der absolute Preiskeil entsprechend mit einer Rate in Höhe des Zinssatzes, was seine Konstanz in Barwerten impliziert. Folglich gibt es keinerlei Variation im Extraktionspfad. Deshalb wird bei vernachlässigbaren Extraktionskosten eine konstante Wertsteuer keinen Einfluss auf den fossilen Brennstoffverbrauch haben.

Aber es ist unwahrscheinlich, dass die Regierungen übereinkommen, eine Wertsteuer mit konstantem Satz zu erheben. Was, wenn die Ressourceneigner erwarten, dass der Steuersatz mit der Zeit steigen wird, hervorgerufen etwa durch die zunehmenden Temperaturen und ein wachsendes Problembewusstsein der Öffentlichkeit bezüglich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes? Wie es in Sinn (1982) sowie in Long und Sinn (1985) gezeigt wurde, werden sie in diesem Fall ihre Verkäufe in der Gegenwart erhöhen, um der zukünftigen steuerlichen Belastung zu entgehen. Der Klimawandel wird sich folglich beschleunigen, ein Phänomen, das man als „grünes Paradoxon“ bezeichnen könnte (Sinn 2007b). Das grüne Paradoxon gibt der Aussage, dass die Angebotsreaktionen von Eigentümern erschöpfbarer Ressourcen einer andern Logik folgen als die Reaktionen normaler Anbieter, eine tiefere Bedeutung. Es wird deutlich, dass die ökonomisch relevanten Preissignale, die von Steuern ausgehen, anders als im statischen Fall nicht von der Höhe dieser Steuern, sondern von ihrer Veränderung im Zeitverlauf abhängen.

Das grüne Paradoxon tritt nicht nur bei steigendem Wertsteuersatz und vernachlässigbaren Extraktionskosten auf. Eine Verallgemeinerung auf den Fall mit Extraktionskosten und für andere nachfrageeinschränkende Maßnahmen wie beispielsweise die Subventionierung von Biosprit, Windkraft und Photovoltaik oder auch die Förderung der Fusionsforschung ist leicht möglich. Es bezeichne  $\tau(t)$  den erwarteten relativen Preiskeil, der durch eine nachfragereduzierende Politik entsteht, oder, genauer, die erwartete relative Verringerung des

Produzentenpreises von Kohlenstoff zum Zeitpunkt  $t$ , die durch die Politik verursacht würde, wenn der gesamte Angebotspfad im Zeitverkauf unverändert bliebe. Wie in Sinn (2007b) gezeigt wird, lautet die Neutralitätsbedingung, die garantiert, dass der Angebotspfad dann tatsächlich unverändert bleibt:

$$\hat{\tau} = r \frac{g(S)}{P(R,t)} \quad (\text{Grenzfall für eine neutrale Politik der Nachfrageminderung})$$

Alle Variablen dieser Gleichung sind prinzipiell zeitinduziert und nehmen zu anderen Zeitpunkten jeweils andere Werte an. Dabei ist  $\hat{\tau}$  die Wachstumsrate des relativen Preiskeils  $\tau$ . Mit  $r$  wird die Diskontrate bezeichnet, und  $g(S)$  kennzeichnet die Stückkosten der Extraktion und Exploration als Funktion des Restbestandes der Ressource im Boden,  $S$ .  $P(R,t)$  ist der Produzentenpreis der extrahierten Ressource als Funktion des laufenden Abbaustroms  $R$  und der Kalenderzeit  $t$ , wobei  $R$  die Menge vor der Reaktion des Abbaupfades darstellt. Wächst  $\tau$  schneller als in dieser Gleichung angegeben, wird der Extraktionspfad steiler. Die Förderung wird in der Gegenwart und der nahen Zukunft größer, dafür aber in der fernen Zukunft kleiner, was den Klimawandel beschleunigt. Wächst dagegen  $\tau$  langsamer, bleibt es konstant oder sinkt es gar, wird der Angebotspfad flacher, und der Klimawandel verlangsamt sich, wie es beabsichtigt ist.

Die Gleichung zeigt, dass eine nachfragemindernde Politik bei Abwesenheit von Extraktionskosten ( $g = 0$ ) neutral ist, wenn  $\hat{\tau}$  gleich null, d.h. wenn der relative Preiskeil  $\tau$  konstant ist. Wird die Nachfrage aufgrund einer Wertsteuer auf den Verbrauch fossilen Brennstoffs reduziert, kann  $\tau$  als der Steuersatz interpretiert werden. Damit bestätigt die Gleichung das schon in Sinn (1982) erzielte Resultat. Die Gleichung ist aber allgemeiner und gilt für alle nachfragereduzierenden Maßnahmen und beliebige Verläufe der Extraktionskostenfunktion.

Mit bestandsabhängigen Extraktionskosten verlangt das Neutralitätskriterium eine moderate Steigerung des relativen Preiskeils in Höhe des Produkts aus Diskontsatz und Kostenanteil an den Erlösen. Das bedeutet, dass eine Nachfragereduzierung, die die Preise bei den alten Mengen proportional im Zeitverlauf senkt, nicht mehr neutral ist, sondern zu einem flacheren Extraktionspfad führt und damit den Klimawandel verlangsamt. Das ist die Reaktion, die grüne Politiker erwarten.

### **7.3 Wenn die Politik immer grüner wird**

Das Problem ist nun aber wieder, dass die grüne Politik glaubwürdig versichern müsste, in Zukunft die Nachfrageeinschränkungen nicht weiter zu verschärfen. Diese Bedingung wird in der Realität typischerweise nicht erfüllt. Im Gegenteil, die grünen Programme sind meist so angelegt, dass die jeweiligen Maßnahmen mit der Zeit intensiver werden. Das bedeutet, dass sich das grüne Paradoxon selbst dann ergeben könnte, wenn Extraktionskosten vorliegen.

Es gibt viele Beispiele für eine immer intensiver werdende grüne Politik. Wie bereits ausgeführt, hatte das Kioto-Protokoll von 1997 das Ziel, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Zeitraum von 1990 bis 2010 um 8% zu reduzieren. 2007 beschloss der Europäische Rat für die EU-Länder sogar, die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Basisjahr 1990 um 20% zu senken. Diese Verminderung soll unabhängig von den Beschlüssen der anderen Staaten realisiert werden. Für den Fall, dass sich die anderen Industrieländer verpflichten, die Emissionen in der gleichen Höhe zu senken, bietet die EU sogar eine Reduktion um 30% an. Die Reduktionsziele sollen durch eine größere Energieeffizienz, die Vergrößerung des Anteils erneuerbarer Energiequellen und die Nutzung von Biobrennstoffen erreicht werden. Die EU plant des Weiteren, bis zum Jahr 2012 die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Neuwagen auf bis zu 120 g per km zu begrenzen (eine Politik, die allerdings von einigen als versteckter Protektionismus für Frankreich und Italien kritisiert wird, da in diesen Ländern kleine Autos produziert werden). Außerdem hat sie beschlossen, ab 2011 den Luftverkehr innerhalb der EU und ab

2012 auch den internationalen Flugverkehr, soweit Abflug oder Ankunft in der EU liegt, in das Emissionshandelssystem mit einzubeziehen. All dies sind nur Beispiele für eine Verschärfung nachfragemindernder Politiken im Zeitablauf, denen viele weitere Beispiele folgen werden. Auch wenn gegenwärtig die zukünftigen Maßnahmen zur Nachfragereduktion noch nicht im Einzelnen bekannt sind, so ist doch klar, dass die Umweltpolitik immer rigoroser durchgreifen wird, wenn mehr und mehr Menschen die Belastungen des Klimawandels am eigenen Leibe zu spüren bekommen.

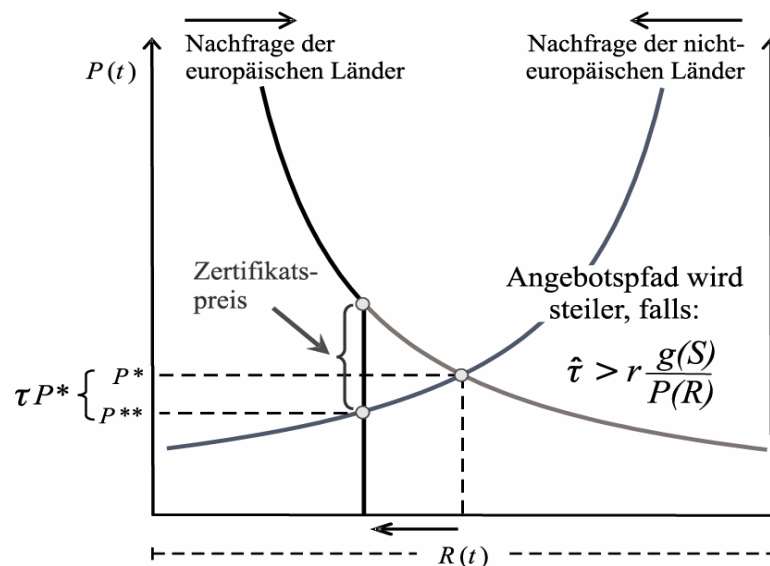
Besonders nachteilige Effekte werden auf den Klimawandel ausgeübt, wenn die Ressourcenanbieter befürchten müssen, dass der Anteil des Weltausstoßes an CO<sub>2</sub>, der durch internationale Abkommen beschränkt wird, weiter ansteigt, weil immer mehr Länder bereit sind, solche Abkommen zu tragen. Die Umweltschützer hoffen, dass nach Australien auch die USA das Kioto-Protokoll ratifizieren und dass Indien und China sich bereit finden, bindende Schranken für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu akzeptieren. Wenn die Gruppe der grünen Länder, die das alte oder ein neues, erweitertes Kioto-Protokoll ratifizieren und sich dadurch auch effektiv binden, immer größer wird, wächst der Preiskeil im Laufe der Zeit immer mehr an, was die Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung formale Bedingung für eine Beschleunigung des Klimawandels vergrößert.

Das grüne Paradoxon kann bei allen in Kapitel 2 angesprochenen Nachfrageminderungen auftreten, sofern sie auf eine antizipierte, diskretionäre Wirtschaftspolitik zurück zu führen sind. Subventionen für alternative Brennstoffe, Einschränkungen für die Autoindustrie und öffentliche Programme für die Entwicklung neuer Energiequellen, das alles sind schlechte Nachrichten für die Ressourcenbesitzer, die sie dazu bewegen werden, die Förderung der Ressourcen zu beschleunigen, um noch zu guten Preisen verkaufen zu können.

### 7.3 Das grüne Paradoxon beim Emissionshandel

Nun mag man einwenden, solche Effekte seien dann weniger wahrscheinlich, wenn die Umweltpolitik sich fester Mengenschranken bediene, wie es zum Beispiel beim EU-Emissionshandelssystem der Fall ist. Anders als bloße Preissignale, wie sie von Steuern verursacht werden, könne die Mengensteuerung sicherstellen, dass die Nachfrage das Angebot dominiert. Dass dieser Einwand falsch ist, zeigt Abbildung 6.

Abbildung 6: Wie das Emissionshandelssystem die globale Erwärmung beschleunigt



Analog zu Abbildung 4 gibt es (grüne) europäische und andere Länder. Jede dieser Ländergruppen ist mit einer spezifischen Nachfragekurve nach fossilen Brennstoffen ausgestattet. Die Abbildung zeigt für ein gegebenes Jahr die Implikationen des Emissionshandelssystems im Unterschied zu einer Situation, in der ein solches System nicht eingeführt wurde. Die Breite des Diagramms verkörpert die Extraktionsmenge, die am Weltmarkt ohne intervenierende Politikmaßnahmen in einer bestimmten Periode realisiert worden wäre. Nun möge von den EU-Ländern ein System der Mengenbeschränkung qua Emissionshandel eingeführt werden. Dies reduziert die Nachfrage der EU auf dem

Weltenergiemarkt, wie es durch den senkrechten Ast der linken Nachfragekurve veranschaulicht wird. Die Folge ist, dass der Weltmarktpreis der Brennstoffe von  $P^*$  auf  $P^{**}$  gedrückt wird. Zum neuen Preis  $P^{**}$  kaufen die nicht-EU-Länder gerade so viel mehr an Brennstoffen, wie die EU weniger kauft. Da die Umweltzertifikate in Europa handelbar sind, wird keinem Unternehmen eine feste Mengenschranke aufoktroyiert. Vielmehr steigt der Energiepreis in Deutschland, bis die kleinere, durch die Zertifikate festgelegte Menge „freiwillig“ gewählt wird. Der Gesamtpreis, den die Verbraucher fossiler Brennstoffe in Europa zu zahlen haben, wird durch  $P^{**}$  zuzüglich des Preises der Zertifikate angegeben, dessen Höhe durch die geschweifte Klammer gemessen wird.

Entscheidend ist nun, wie beim alten Extraktionspfad der Zeitpfad des Weltmarktpreises fällt, denn das erzeugt den Zeitpfad des Preiskeils, der für die Prognose des tatsächlichen Extraktionsverhaltens relevant ist. Der absolute Preiskeil beträgt  $\tau P^*$ , und der relative Preiskeil ist  $\tau$ . Für jede Periode definiert eine ähnliche Abbildung wie Abbildung 4 einen spezifischen Wert des relativen Preiskeils. Wenn sich die Vorgaben für die Reduktion der Emissionen bei gleichzeitig wachsender Weltwirtschaft mit fortschreitender Zeit verschärfen, wird der relative Preiskeil im Zeitverlauf immer größer, und es ergibt sich wieder die Möglichkeit des grünen Paradoxons: Der Abbaupfad wird steiler, wenn der relative Preiskeil mit einer Rate wächst, die größer ist als das Produkt aus Diskontsatz und Kostenanteil an den Erlösen. In der Gegenwart und in der nahen Zukunft wird mehr extrahiert als in der fernen Zukunft, verglichen jeweils mit der Menge, die ohne ein Emissionshandelssystem gefördert würde. Das Diagramm, das in Abbildung 6 gezeigt ist, wird durch diese Effekte in der Gegenwart und der nahen Zukunft breiter und in der fernen Zukunft enger. Die globale Erwärmung beschleunigt sich.

Dass dieser Fall nicht nur eine theoretische Möglichkeit verkörpert, sondern gerade auch beim Emissionshandel recht wahrscheinlich ist, zeigt ein Blick auf die EU-Beschlüsse. Während der ersten Zeitspanne des Emissionshandelssystems von 2005 bis 2007 erlaubte die



EU 1.734 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Doch für die zweite Spanne von 2008 bis 2012 reduzierte sie die Menge bereits auf 1.623 Millionen Tonnen.<sup>11</sup> Und es ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit zu erwarten, dass die Mengeneinschränkungen nach 2012 fortgeführt werden. Auch die oben erwähnte Erweiterung des Reduktionszieles von den bis 2012 schon beschlossenen 8% auf 20% gegenüber dem Basisjahr 1990 wird die EU-Kommission im Wesentlichen durch Mengenbeschränkungen im Rahmen ihres Emissionshandelssystem erreichen wollen.

Das grüne Paradoxon kann die Erklärung dafür sein, dass die energischen Einsparpolitiken der EU bisher nicht einmal einen Knick in der Kurve des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes haben hervorbringen können und diese Kurve, wenn überhaupt, eher steiler als flacher gemacht hat. Dies könnte die Lösung des Rätsels sein, das sich mit Abbildung 1 gestellt hatte.

## 8. Angebotspolitik gegen den Klimawandel

Da Nachfragepolitik in der bisherigen Form unwirksam ist, weil sie völlig unrealistische Annahmen über das Angebot macht, ergibt sich die Frage, wie wirksame Politikmaßnahmen aussehen. Solche Politikmaßnahmen müssen unter expliziter Berücksichtigung der zeitlichen Dimension der Angebotsentscheidungen abgeleitet werden. Im Folgenden diskutiere ich

- finanzpolitische Maßnahmen, die den Angebotspfad abflachen,
- die Verbesserung des Schutzes der Eigentumsrechte,
- bindende Mengenbeschränkungen in einem erweiterten Kioto-Protokoll sowie
- technische Maßnahmen zur Speicherung von CO<sub>2</sub>.

Zu den bei diesem Stand der Diskussion offenkundigen finanzpolitischen Maßnahmen, die den Angebotspfad abflachen, gehört die Einführung einer **allmählich schrumpfenden Wertsteuer**

---

<sup>11</sup> Vgl. Europäische Union (2007).

auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe (Sinn 1982). Aber so eindeutig sich eine solche Maßnahme aus theoretischer Sicht empfiehlt, so unreal ist sie aus politökonomischer Perspektive, denn keine Regierung kann glaubhaft eine bindende Verpflichtung dieser Art eingehen. Wird die Erde immer wärmer, werden die Stimmen, die nach Taten rufen, immer lauter.

Alternativ könnte man versuchen, die positive Externalität, die aus der Nichtförderung fossiler Brennstoffe resultiert, mittels **Subventionierung der Lagerbestände** zu internalisieren. Die Ressourcenbesitzer würden dann die Förderung verlangsamen, um mehr Subventionen kassieren zu können. Auch dies ist freilich nur eine theoretische Möglichkeit ohne Realisierungschancen. Da die Öffentlichkeit der Verbraucherländer ohnehin schon über die hohen Preise von Öl und Gas stöhnt, wird sie niemals zustimmen, die Produzenten dieser Rohstoffe auch noch dafür zu bezahlen, dass sie ihre Fördermengen drosseln und die Preise erhöhen.

Eine zunächst vielleicht plausiblere Lösung liegt in der Einführung einer **Mengensteuer mit konstantem Satz** auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe. Bleibt die Steuer im Zeitverlauf konstant, sinkt ihr Barwert, und die Ressourcenbesitzer werden, wie in Sinn (1982) gezeigt wurde, die Förderung verlangsamen.

Ja, unter bestimmten theoretischen Annahmen wäre eine solche Steuer sogar effizient. Angenommen, eine Einheit geförderten Kohlenstoffs verursacht in allen Folgejahren denselben Grenzschaten  $b$ . Bei ebenfalls konstantem Zins  $i$  ist der Barwert des Grenzschatens für alle Förderzeitpunkte gleich  $b/i$ , und es folgt, dass ein konstanter absoluter Steuerkeil in der Höhe von  $b/i$  die Allokationsverzerrung aufgrund des Treibhauseffektes korrekt internalisieren würde. Das mag der Fall sein, den Stern et al. (2006) oder Newberry (2005) im Auge haben, wenn sie die Erhebung von Pigou-Steuern in Höhe der marginalen externen Kosten der CO<sub>2</sub>-Produktion vorschlagen, um ein weltweit einheitliches Preissignal zu erzeugen. Die Lösung ist aber nicht überzeugend.

Zum einen ist der Grenzschaten keineswegs konstant, sondern steigt, wie Stern et al. selbst überzeugend nachweisen, im Laufe der Zeit immer weiter an, weil sich das CO<sub>2</sub> in der

Atmosphäre ansammelt und der Klimawandel voran schreitet. Zwar kann man auch für diesen Fall theoretisch eine Barwertformel berechnen. Zu jedem Zeitpunkt muss man dann ein Integral bis in die Ewigkeit berechnen, in das der diskontierte Grenzschaten aller danach folgenden Zeitpunkte eingeht. Doch ist das ein sehr komplexes Unterfangen, das man praktisch nicht wird implementieren können.

Zum anderen reagiert der Zeitpfad des Extraktionsmengen sehr sensibel auf Abweichungen zwischen dem gewählten Steuersatz und seinem theoretisch richtigen Pendant, weil es, wie schon betont, für die Ressourcenanbieter nicht auf die Höhe, sondern auf die zeitliche Variation des Steuersatzes ankommt. Auch bei der Mengensteuer besteht die Gefahr, dass der Steuersatz wegen des wachsenden politischen Drucks im Laufe der Zeit so rasch steigt, dass er der oben hergeleiteten Bedingung für das grüne Paradoxon genügt.

Eine ganz andere Option besteht darin, die Investitionsalternativen der Ressourceneigner weniger attraktiv zu gestalten, damit diese Ressourceneigner das Interesse daran verlieren, schnell zu extrahieren, um ihre Gewinne am Kapitalmarkt anzulegen. Das könnte zum Beispiel dadurch geschehen, dass die westliche Welt sämtliche Steueroasen schließt und die Ressourcenbesitzer einer **Quellensteuer auf Kapitalerträge** unterwirft. Sicher, das wird auch nicht ganz leicht sein, doch bevor die Welt zugrunde geht, wird man die verfügbaren diplomatischen Druckmittel für den Erfolg eines solchen Unterfangen einzusetzen bereit sein. Jedenfalls greift eine solche Steuer unmittelbar in die Hotelling-Regel ein und erzeugt starke Anreize, einen größeren Wertanteil des Vermögens unter statt über der Erdoberfläche zu halten. Der Angebotspfad würde abgeflacht, und der Klimawandel würde sich verlangsamen.

Auf den ersten Blick mag eine solche Lösung als recht weit hergeholt erscheinen, weil sie an einer ganz anderen Stelle des ökonomischen Entscheidungsprozesses ansetzt als sämtliche Umweltpolitiken der Welt es bislang getan haben. Indes übt diese Lösung einen extrem starken Effekt auf die Abbaustrategien aus und hat darüber hinaus den Vorteil, dass auch Fehler bei der adäquaten Festsetzung des Steuersatzes nie zu ökonomischen Reaktionen

führen können, die das Gegenteil von dem sind, was man eigentlich will. Auch wenn der Steuersatz im Zeitablauf schwankt und wenn er falsch berechnet sein sollte, wird doch stets ein Anreiz ausgelöst, die Geschwindigkeit des Ressourcenabbaus zu verringern.

Ähnlich könnte übrigens eine **Enteignungsdrohung für die Finanzanlagen der Ressourceneigentümer** wirken. Würde die westliche Welt den Ressourcenbesitzern mit der Enteignung ihres Finanzvermögens drohen, so würde dies ebenfalls die Diskontrate, mit der diese Ressourcenbesitzer kalkulieren, verringern und einen Anreiz ausüben, weniger schnell zu fördern. Jedoch ist es außerordentlich schwierig und auch nicht ungefährlich, eine solche Politik zu implementieren, weil sie das Vertrauen in das Finanzsystem untergräbt und auch normale Sparer und Investoren abschrecken würde. Die Lösung kommt deshalb kaum in Betracht.

Eine weitere Möglichkeit, die Motive für eine Konservierung der fossilen Brennstoffe zu stärken, liegt in einer **Stärkung der Eigentumsrechte der Ressourceneigner**. Müssten die Diktatoren der Erdöl exportierenden Länder weniger Sorge haben, von ihren Rivalen enteignet zu werden, oder würden wir sie und ihre Clans nicht mehr mit der Einführung einer Demokratie nach westlichem Muster bedrohen, so hätten sie weniger Eile, ihre Ressourcen in Finanzvermögen zu verwandeln. Wenn sie ihrer Macht sicher wären, würden sie die fossilen Brennstoffe später aus dem Boden holen, und die Erde würde sich langsamer erwärmen. Aber wiederum gilt, dass theoretische Möglichkeiten nicht mit praktischen Politikvorschlägen verwechselt werden sollten. Die Eigentumsrechte der Potentaten zu stärken, die mit ihren Entscheidungen die Geschwindigkeit des Klimawandels festlegen, ist weder einfach noch humanitär vertretbar. Ratschläge für Krieg und Frieden zu geben liegt im übrigen jenseits der Kompetenz eines Ökonomen.

Trotz der enttäuschenden Resultate einer Nachfragepolitik nach bisherigem Muster könnte man schließlich versuchen, alle Länder in das Emissionshandelssystem zu integrieren, um so ein opportunistisches Verhalten der nicht partizipierenden Länder zu verhindern. Ein wirklich

lückenloses Handelssystem, eine Art Super-Kioto, das die Verbraucherländer zu einem **weltumspannenden Monopson** zusammenschließt, würde natürlich die Mengen diktieren können, weil es den Preismechanismus bei den Angebotsentscheidungen der Ressourcenbesitzer aushebeln könnte. Es käme faktisch zur Enteignung der heutigen Ressourceneigner, weil niemand Kohlenstoff ohne Bezugsschein kaufen könnte. Die fossilen Brennstoffe der Erde würden einer Zentralverwaltungswirtschaft unterworfen, die das der Welt insgesamt zur Verfügung stehende Angebot in jeder Periode festlegt.

Dabei käme es darauf an, sehr schnell zu handeln, um die Ankündigungseffekte eines solchen Monopsons für die Entscheidungen der Ressourcenanbieter in Grenzen zu halten. Ein lange Zeit im Voraus angekündigtes Super-Kioto wäre wegen des grünen Paradoxons auch zugleich ein Super-Gau für den Klimawandel. Wenn das Monopson schneller gebildet wird, als die Ressourceneigner in der Lage sind, ihre Investitionen in Förderanlagen hochzufahren und wirtschaftlich zu nutzen, kann man vollendete Tatsachen schaffen, an denen die Anbieter nicht mehr vorbei können. Das derzeitige, sich bereits über Jahrzehnte erstreckende Gerangel über bindende Schranken beim Umweltschutz ist das Gegenteil vom dem, was ein erfolgreiches Monopson braucht.

Für den Erfolg eines weltumspannenden Monopsons müsste freilich zudem sichergestellt sein, dass die Politiker als wohlwollende Machthaber agieren, die ihre Dispositionen tatsächlich zum Nutzen der Menschheit treffen. Jahrzehnte der Public-Choice-Forschung haben bezüglich solcher Annahmen zu einer gewissen Ernüchterung geführt. Die Schrecken real existierender Zentralverwaltungswirtschaften sitzen uns allen noch in den Gliedern. Dennoch wird die Menschheit vermutlich gezwungen sein, diesen Weg zu wählen, denn der Treibhauseffekt ist nun mal die bei weitem größte Externalität, mit der sie es bislang zu tun hatte. Dem Stern-Bericht muss man in dieser Frage Recht geben. Ein rasch aufgebautes, weltumspannendes Monopson, das die Verteilung der Mengen auf die Verbraucherländer dem Allokationsmechanismus des Zertifikatehandels unterwirft, ist vermutlich das kleinere Übel.

Jenseits von Angebot und Nachfrage bietet sich schließlich noch die Speicherung des bei der Verbrennung entstehenden CO<sub>2</sub> an. Einer der möglichen Wege zu Speicherung von CO<sub>2</sub> ist die **Sequestrierung**. Zusätzlich zu den Leitungsnetzen, die die fossilen Brennstoffe zu den Verbrauchsorten transportieren, könnte man ein zweites Netz für die Beseitigung des bei der Verbrennung anfallenden CO<sub>2</sub> schaffen. Durch Pipelines könnte das CO<sub>2</sub> zurück zu den unterirdischen Lagerstätten geleitet werden, aus denen der Kohlenstoff ursprünglich kam. Dort könnte man es unter extrem hohem Druck in flüssiger Form speichern. Leider ist eine solche Lösung nicht nur teuer, weil man viel Energie für die Verpressung benötigt (ungefähr ein Drittel der erzeugten Energie). Vielmehr stößt sie auch bereits früh an technische Grenzen, weil das Volumen des bei der Verbrennung entstehenden CO<sub>2</sub> selbst im Falle der Verflüssigung sehr viel größer ist als das Volumen des verbrannten Kohlenwasserstoffs. So fällt bei der Verbrennung eines Kubikmeters Anthrazitkohle 5,4 m<sup>3</sup> flüssiges CO<sub>2</sub> an (55 bar zu 20°C); ein Kubikmeter Rohöl wird zu 3,6 m<sup>3</sup> flüssigem CO<sub>2</sub>, und aus einem Kubikmeter Methan entstehen immerhin noch 1,6 m<sup>3</sup> flüssiges CO<sub>2</sub>. Daher muss zusätzliche Lagerkapazität geschaffen werden. Selbst, wenn dies gelänge, wären die auftretenden Sicherheitsprobleme freilich immens. CO<sub>2</sub> ist schwerer als Sauerstoff, so dass jedes Leck fatale Folgen für die Bevölkerung haben könnte, die in der Nähe einer Endlagerstätte lebt. Ähnliche Bedenken sind im Hinblick auf den Versuch angebracht, das CO<sub>2</sub> in die Tiefsee zu pumpen, so tief, dass der Druck reicht, es dort in flüssiger Form zu halten. Die Risiken für das maritime Leben und die Nahrungskette könnten immens sein.

Am sichersten ist es, Kohlendioxid in Form von Holz zu speichern und groß angelegte Programm zur **Aufforstung von Wäldern** zu starten. Bäume speichern den reduzierten Kohlenstoff, den die Photosynthese aus der Luft gefiltert hat. Jedes Jahre werden etwa 150 Tausend km<sup>2</sup> Waldfläche abgeholzt, doch nur 50 Tausend km<sup>2</sup> werden wieder aufgeforstet. Der jährlich Nettoverlust an Wald, der einer Fläche der Größe Irlands entspricht, trägt etwa 18% zur jährlichen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission bei. Das ist mehr, als durch den Verkehr in

der Luft, zu Lande und im Wasser emittiert wird.<sup>12</sup> Könnte man die Abholzung stoppen und statt dessen jährlich eine Fläche der Größe Irlands wieder aufforsten, so ließe sich der anthropogene CO<sub>2</sub>-Ausstoß bereits um ein gutes Drittel verringern. Das reicht zwar nicht, den Klimawandel zu stoppen, würde uns diesem Ziel aber doch ein gutes Stück näher bringen.

## **9. Schlussbemerkungen**

Naive Politik, die nicht nur die Ziele der Wirtschaftspolitik, sondern zusätzlich die Instrumente mit Werturteilen versieht, ist das Kennzeichen der modernen Fernsehdemokratie. So erklärt sich auch die Umweltpolitik vor allem durch das Bestreben, das öffentliche Bedürfnis nach aktiver Mitwirkung an der Rettung der Welt zu befriedigen, statt den weltweiten Ausstoß an CO<sub>2</sub> tatsächlich zu verringern.

Nach meiner festen Überzeugung sind die umweltpolitischen Maßnahmen, die bislang in der EU gegen den Treibhauseffekt ergriffen wurden, im Wesentlichen wirkungslos, wenn nicht gefährlich, weil sie die Angebotsseite auf dem Weltmarkt für fossile Brennstoffe völlig außer Acht lassen. Es ist ein Faktum, dass diese Maßnahmen die Kurve des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bislang nicht haben günstig beeinflussen können, und es ist zu befürchten, dass sie sogar zur Beschleunigung des Ausstoßes beigetragen haben. Die Angst vor grüner Politik, die ihren Instrumentenkasten immer weiter ausdehnt, erhöht das Angebot fossiler Brennstoffe, statt es zu drosseln. Sie entfaltet damit ähnlich konterproduktive Wirkungen wie die Angst der Ressourcenbesitzer vor einem Verlust ihrer Eigentumsrechte durch politische Umwälzungen in ihren Ländern. Beide Ängste können erklären, warum der Ölpreis selbst im Winter 2007/2008, als er die 100-Dollar-Marke überschritt, inflationsbereinigt niedriger war als auf dem Höhepunkt der zweiten Ölkrise, ein viertel Jahrhundert zuvor.

---

<sup>12</sup> Vgl. Houghton (2004, S. 250 n.) und Stern et al. (2006, S. xxv).

Blinder Aktionismus, der die Marktkräfte missachtet und von der naiven Vorstellung ausgeht, dass man die Produktion von Kohlendioxid drosseln kann, indem man unilateral die Nachfrage nach Kohlenstoffen verringert, ist nutzlos und konterproduktiv. Quellensteuern auf Kapitalerträge sind recht sichere Anreizmechanismen, die den Abbau fossiler Brennstoffressourcen und damit die Erwärmung der Erde verlangsamen. Im Gegensatz zu Steuern auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe hängt ihre Wirkungsrichtung nicht vom der Änderung des Steuersatzes im Zeitablauf ab: Vielmehr geht eine Anreiz zu einem konservativeren Extraktionsverhalten bereits von jedem im positiven Bereich verlaufenden Zeitpfad des Steuersatzes aus. Gepaart mit technischen Maßnahmen und ökonomischen Anreizen zur Sequestrierung von Kohlendioxid und zur Wiederaufforstung von Wäldern bilden Quellensteuern ein sinnvolles Politikpaket, von dem günstige Effekte erwartet werden können.

Viele UmweltökonomInnen empfehlen ein neues Kioto-Protokoll mit bindenden Mengenbeschränkungen, das durch einen weltweiten Handel mit Emissionszertifikaten ergänzt wird und an dem alle Länder teilnehmen. Auch diese Empfehlung kann man unterschreiben, denn ein wirklich lückenloses Monopson könnte die Mengen diktieren und brauchte sich nicht mehr auf Preissignale zu verlassen.

Das Problem entsteht nur, wenn die Politik graduell vorgeht und im Laufe der Zeit immer mehr Länder zu einer Beschränkung ihres Verbrauchs fossiler Brennstoffe veranlassen will. Ein solches Vorgehen würde einen mit fortschreitender Zeit immer stärker werdenden komparativen Preissenkungseffekt erzeugen, was eine Beschleunigung der Extraktion wahrscheinlich macht. Leider ist genau dies der Ansatz, den die EU derzeit verfolgt. Sie geht, wie sie meint, mit gutem Beispiel voran und versucht dann, andere Länder mit ins Boot zu holen. Nach der Analyse dieses Beitrags muss befürchtet werden, dass ein solcher Ansatz den Klimawandel eher noch beschleunigt.



## Literaturverzeichnis

- Archer, D. (2005), Fate of Fossil Fuel CO<sub>2</sub> in Geologic Time, *Journal of Geophysical Research* 110, 5–11.
- Archer, D., und V. Brovkin (2006), Millennial Atmospheric Lifetime of Anthropogenic CO<sub>2</sub>, *Climate Change*, mimeo.
- European Environment Agency (2007), Pressemitteilung IP-07-835\_DE1, Brüssel, 14. Juni 2007.
- Europäische Kommission (2005), *EU Action against Climate Change – EU Emissions Trading – An Open Scheme Promoting Global Innovation*, Europäische Kommission, Generaldirektion Umwelt, Brüssel.
- Europäische Union (2007), Pressemitteilung IP/07/459, Brüssel, 2. April 2007.
- Hoos, G., R. Voss, K. Hasselmann, E. Meier-Reimer und F. Joos (2001), A Nonlinear Impulse Response Model of the Coupled Carbon Cycle-Climate System (NICCS), *Climate Dynamics* 18, 189–202.
- Hotelling, H. (1931), The Economics of Exhaustible Resources, *Journal of Political Economy* 39, 137–175.
- Houghton, J. (2004), *Global Warming*, dritte Auflage, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- IEA (2006), *Energy Technology Perspectives*, IEA Publications, Paris.
- IPCC (2007), Technical Summary, in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Long, N.V., und H.-W. Sinn (1985), Surprise Price Shifts, Tax Changes and the Supply Behaviour of Resource Extracting Firms, *Australian Economic Papers* 24, 278–289.

- Newberry, J. (2005), Why Tax Energy? Towards a More Rational Energy Policy, *Cambridge Working Papers in Economics* CWPE 0508.
- Sinn, H.-W. (1981), Stock Dependent Extraction Costs and the Technological Efficiency of Resource Depletion, *Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften* 101, pp. 507-517.
- Sinn, H.-W. (1982), Absatzsteuern, Ölförderung und das Allmendeproblem, in: H. Siebert, Hrsg., *Reaktionen auf Energiepreisänderungen*, Lang, Frankfurt und Bern, 83–103.
- Sinn, H.-W. (2007a), Pareto Optimality in the Extraction of Fossil Fuels and the Greenhouse Effect, CESifo Working Paper No. 2083, August; NBER Working Paper No. 13453, September.
- Sinn, H.-W. (2007b), Public Policies against Global Warming, Presidential Address, IIPF Congress, Warwick, August 2007; CESifo Working Paper No. 2087, August; NBER Working Paper No. 13454, September; erscheint 2008 in *International Tax and Public Finance*.
- Solow, R.M. (1974), The Economics of Resources or the Resources of Economics, *American Economic Review* 64, 1–14.
- Stern, N., S. Peters, V. Bakhshi, A. Bowen, C. Cameron, S. Catovsky, D. Crane, S. Cruickshank, S. Dietz, N. Edmonson, S.-L. Garbett, L. Hamid, G. Hoffman, D. Ingram, B. Jones, N. Patmore, H. Radcliffe, R. Sathiyarajah, M. Stock, C. Taylor, T. Vernon, H. Wanjie und D. Zenghelis (2006), *Stern Review: The Economics of Climate Change*, HM Treasury, London.
- Stiglitz, J.E. (1974), Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths, *Review of Economic Studies* 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, 123–137.
- Trenberth, K. (1981), Seasonal Variations in Global Sea-Level Pressure and the Total Mass of the Atmosphere, *Journal of Geophysical Research – Oceans and Atmospheres* 86, 5238–5246.

## Datenquellen

BGR (2005), *Reserves, Resources and Availability of Energy Resources*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Eigenverlag, Hannover, verfügbar unter: [www.bgr.bund.de](http://www.bgr.bund.de).

BP (2007), *BP Statistical Review of World Energy*, BP Eigenverlag, London, verfügbar unter: [www.bp.com/statisticalreview](http://www.bp.com/statisticalreview).

CDIAC (2000), *Global Carbon Cycle 1992-1997*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, verfügbar unter: <http://cdiac.ornl.gov/pns/faq.html>.

EIA (2007), *Performance Profiles of Major Energy Producers 2005*, Energy Information Administration – Official Energy Statistics from the U.S. Government, Washington DC, verfügbar unter: <http://www.eia.doe.gov/>.

IEA (2007), IEA Database, CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion, verfügbar unter: [www.sourceoecd.org](http://www.sourceoecd.org).

IPCC (2007), *Working Group I: The Physical Science Basis of Climate Change- Technical Summary*, IPCC, New York, verfügbar unter: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.

UN Environmental Program (1998), *Introduction to Climate Change*, Grid Arendal, verfügbar unter: <http://www.grida.no/climate/vital/intro.htm>.

World Energy Council (2000), *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*, United Nations Development Program, New York.

World Resource Institute (2006), *Climate Analysis Indicators Tool (CAIT)*, on-line database version 3.0., World Resources Institute, Washington DC, verfügbar unter: <http://cait.wri.org>.

## **Ifo Working Papers**

- No. 53     Schwerdt, G. and J. Turunen, Changes in Human Capital: Implications for Productivity Growth in the Euro Area, December 2007.
- No. 52     Berlemann, M. und G. Vogt, Kurzfristige Wachstumseffekte von Naturkatastrophen – Eine empirische Analyse der Flutkatastrophe vom August 2002 in Sachsen, November 2007.
- No. 51     Huck, S. and G.K. Lünser, Group Reputations – An Experimental Foray, November 2007.
- No. 50     Meier, V. and G. Schütz, The Economics of Tracking and Non-Tracking, October 2007.
- No. 49     Buettner, T. and A. Ebertz, Quality of Life in the Regions – Results for German Counties, September 2007.
- No. 48     Mayr, J. and D. Ulbricht, VAR Model Averaging for Multi-Step Forecasting, August 2007.
- No. 47     Becker, S.O. and K. Wohlrabe, Micro Data at the Ifo Institute for Economic Research – The “Ifo Business Survey”, Usage and Access, August 2007.
- No. 46     Hülsewig, O., J. Mayr and S. Sorbe, Assessing the Forecast Properties of the CESifo World Economic Climate Indicator: Evidence for the Euro Area, May 2007.
- No. 45     Buettner, T., Reform der Gemeindefinanzen, April 2007.
- No. 44     Abberger, K., S.O. Becker, B. Hofmann und K. Wohlrabe, Mikrodaten im ifo Institut – Bestand, Verwendung und Zugang, März 2007.
- No. 43     Jäckle, R., Health and Wages. Panel data estimates considering selection and endogeneity, March 2007.
- No. 42     Mayr, J. and D. Ulbricht, Log versus Level in VAR Forecasting: 16 Million Empirical Answers – Expect the Unexpected, February 2007.
- No. 41     Oberndorfer, U., D. Ulbricht and J. Ketterer, Lost in Transmission? Stock Market Impacts of the 2006 European Gas Crisis, February 2007.

- No. 40 Abberger, K., Forecasting Quarter-on-Quarter Changes of German GDP with Monthly Business Tendency Survey Results, January 2007.
- No. 39 Batchelor, R., Forecaster Behaviour and Bias in Macroeconomic Forecasts, January 2007.
- No. 38 Sülzle, K., Innovation and Adoption of Electronic Business Technologies, December 2006.
- No. 37 Overesch, M. and G. Wamser, German Inbound Investment, Corporate Tax Planning, and Thin-Capitalization Rules – A Difference-in-Differences Approach, December 2006.
- No. 36 Kempkes, G. and C. Pohl, The Efficiency of German Universities – Some Evidence from Non-Parametric and Parametric Methods, October 2006.
- No. 35 Kuhlmann, A., German Productivity – A Reassessment via the New Ifo Productivity Database, October 2006.
- No. 34 Kuhlmann, A., What is the X-Factor in the German Electricity Industry?, September 2006.
- No. 33 Temple, J. and L. Wößmann, Dualism and cross-country growth regressions, August 2006.
- No. 32 Baumann, F., V. Meier and M. Werding, Transferable Provisions in Individual Health Insurance Contracts, July 2006.
- No. 31 Abberger, K., Qualitative Business Surveys in Manufacturing and Industrial Production – What can be Learned from Industry Branch Results?, May 2006.
- No. 30 Ruschinski, M., Investigating the Cyclical Properties of World Trade, May 2006.
- No. 29 Holzner, Chr., V. Meier and M. Werding, Time Limits in a Two-tier Unemployment Benefit Scheme under Involuntary Unemployment, April 2006.
- No. 28 Eggert, W. and A. Haufler, Company Tax Coordination cum Tax Rate Competition in the European Union, April 2006.
- No. 27 Lachenmaier, S. and H. Rottmann, Employment Effects of Innovation at the Firm Level, April 2006.
- No. 26 Radulescu, D.M. and M. Stimmelmayer, Does Incorporation Matter? Quantifying the Welfare Loss of Non-Uniform Taxation across Sectors, March 2006.