



## **Die vergessene Seite in der Klimapolitik: Das Grüne Paradoxon im Lichte von Hotelling und Solow-Stiglitz**

Authors: Felicitas Holzer  
Submitted: 17. December 2014  
Published: 19. December 2014  
Volume: 2  
Issue: 1  
Affiliation: University of Buenos Aires  
Languages: German  
Keywords: Umweltökonomie, Ressourcenökonomik, fossile Energieträger, Politikmaßnahmen, Sinn  
Categories: Humanities, Social Sciences and Law  
DOI: 10.17160/josha.2.1.10

### Abstract:

Beginnend mit einem neoklassischen Modell von Solow und Stiglitz wird ein gesellschaftliches Optimum für den Extraktionspfad erschöpfbarer fossiler Energieträger hergeleitet. Der durch die Planung eines benevolenten Diktators generierte Abbaupfad stellt für alle Generationen ein pareto-optimale – d.h. eine intertemporale Besserstellung einzelner Generationen ist nicht mehr möglich – (und damit normativ begründbare) Lösung dar. Es wird genauer ein optimales Verhältnis zwischen Sachkapital- und Ressourceneinsatz für die volkswirtschaftliche Produktion zu jedem Zeitpunkt  $t$  gewählt. Das „positive Pendant“ zur normativen Solow-Stiglitz-Bedingung stellt die Hotelling-Regel dar. Ausgangspunkt ist jedoch nicht das gesellschaftliche Optimierungskalkül, sondern das intertemporale Portfolioproblem der Ressourcenbesitzer. Es wird der Barwert aller auf den gegenwärtigen Zeitpunkt abdiskontierten Gewinne im Zeitablauf maximiert. Beiden Modellen ist gemein, die jeweiligen Vorteile einer gegenwärtigen Extraktion (die Ressource generiert ein positives Grenzprodukt bzw. steht dem Ressourcenbesitzer zum

# JOSHA

[josha.org](http://josha.org)

**Journal of Science,  
Humanities and Arts**

JOSHA is a service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content

Ludwig-Maximilians-Universität München



„Die vergessene Angebotsseite in der Klimapolitik: Das Grüne Paradoxon im  
Lichte von Hotelling und Solow-Stiglitz“

**Bachelorarbeit im Bereich  
Umweltökonomie**

zur Erlangung des Grades eines **Bachelor of Science**  
an der Volkswirtschaftlichen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Eingereicht von:

Felicitas Holzer

Fachsemester: 6

Matrikelnummer: 8057902

Referent:

Prof. Christian Holzner

München, den 29.04.2011

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	4
2. Modellansätze hinsichtlich der Angebotsseite erschöpfbarer Ressourcen .....	8

### Teil I

2.1 Solow-Stiglitz-Modell .....	9
2.1.1 Intuitiver Erklärungsansatz des Solow-Stiglitz-Modells .....	9
2.1.2 Formale Herleitung des gesellschaftlichen Optimums .....	11
2.2 Hotelling-Regel .....	13
2.2.1 Intuitiv-ökonomischer Erklärungsansatz der Hotelling-Regel .....	14
2.2.2 Intuitiv-formaler Erklärungsansatz des Maximierungsproblems .....	14
2.3 Zusammenhang zwischen Solow-Stiglitz und Hotelling .....	17
2.4 Verschiedene Arten von Marktversagen .....	18
2.4.1 Unsichere Eigentumsrechte .....	19
2.4.2 Pareto-Optimalität und Treibhauseffekt .....	20

### Teil II

2.5 Das grüne Paradoxon .....	22
2.5.1 Energiepreisänderungen und die Reaktion der Ressourcenbesitzer .....	22
2.5.2 Formale und graphische Erläuterung des grünen Paradoxons .....	23
2.5.3 Populäre Politikmaßnahmen im Lichte des grünen Paradoxons .....	26
2.6 Modellkritik .....	28
2.6.1 Marktdeterminanten hinsichtlich Ressourcen und Reserven .....	28
2.6.2 Back-Stop-Ressourcen .....	29
2.6.3 Externalitäten aus F&E bei erneuerbaren Technologien .....	30
2.6.4 Unsichere Erwartungen .....	31
2.6.5 Kippelemente .....	32
2.6.6 Einfluss anderer Marktformen .....	33
2.6.7 Ethische Rechtfertigung des Diskontfaktors .....	34

### Teil III

3. Diskussion von Politikmaßnahmen auf Basis des grünen Paradoxons .....	36
3.1 Sicherung der Eigentumsrechte .....	36
3.2 Steuerpolitische Instrumente beim Verbrauch fossiler Brennstoffe .....	37
3.3 Quellensteuer .....	38
3.4 Subventionslösung .....	39
3.5 Weltmonopson .....	39
3.5.1 Kartellstabilisation .....	40
3.6 CO <sub>2</sub> -Bindung und Sequestrierung .....	41

4. Zusammenfassung und Fazit .....	43
Literaturverzeichnis .....	47
Abbildungsverzeichnis .....	50
Variablenverzeichnis .....	51
Anhang .....	54

## 1. Einleitung

Angesichts der durchschnittlichen Temperaturerhöhung der Erde um 0,8°C seit der Industrialisierung<sup>1</sup>, welche von einer Mehrheit der Wissenschaftler bzw. zahlreichen Berichten auf den anthropogenen Treibhauseffekt zurückgeführt wird, reagieren vor allem die europäischen Länder mit einer Vielzahl an Initiativen. Die Angst vor einem rasanten Temperaturanstieg – der Stern-Report prophezeit bis 2100 eine Erwärmung um 5°C gegenüber der vorindustriellen Zeit – sowie einem schwer reversiblen CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre<sup>2</sup> und befürchtete Überschwemmungen, Orkane bzw. hohe Kosten für Gebäudeumrüstungen forcieren Klimaschutzprogramme der europäischen Union. Die 15 alten EU-Mitgliedsstaaten sehen bis 2020 eine Reduktion der Treibhausmissionen um 30 Prozent gegenüber 1990 vor.<sup>3</sup> Dazu einigten sie sich neben Richtlinien zur Besteuerung des Energieverbrauchs auf ein ambitioniertes Projekt, ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit Hilfe eines 2005 eingeführten Emissionshandelssystems zu beschränken.<sup>4</sup>

Zudem stieg zwischen 1990 und 2007 in Deutschland der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärverbrauch von 1,3 auf 6,7 Prozent. Dies geschah nicht zuletzt aufgrund der EU Richtlinie von 2001 zur Förderung erneuerbarer Energiequellen und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, das 2004 verabschiedet wurde und Stromerzeuger verpflichtet, bevorzugt Strom aus regenerativen Energieträgern abzunehmen.<sup>5</sup>

Trotz vorbildhaften Verhaltens auf Seiten der europäischen Union haben internationale Abkommen, wie das Kyoto-Protokoll, geringe Erfolge zu verbuchen. Länder wie China und Indien haben den Vertrag zwar unterschrieben und ratifiziert, sind selbst aber von den im Kyoto-Protokoll beschriebenen Maßnahmen nicht betroffen. Die Ratifikation wurde zudem von den USA im Repräsentantenhaus ausgesetzt.<sup>6</sup> Dies wäre noch kein ausreichender Grund, Programme gegen den Klimawandel abzuwenden. Allerdings steht die europäische Klimapolitik in einem auffallenden Missverhältnis zur tatsächlichen weltweiten CO<sub>2</sub> Entwicklung, wie Abbildung 1 zeigt.

---

<sup>1</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 2.

<sup>2</sup> Vgl. Montenegro, Brovkin, Eby, Archer, Weaver (2007), S. 1. Hierbei wird betont, dass ein Anteil von ca. 20 % des heute anthropogen verursachten CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Atmosphäre bis zu 5000 Jahre weiter fortbesteht.

<sup>3</sup> Vgl. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (2010).

<sup>4</sup> Vgl. Ellermann, Joskow (2008), S. ii.

<sup>5</sup> Vgl. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (2010).

<sup>6</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 3-4.

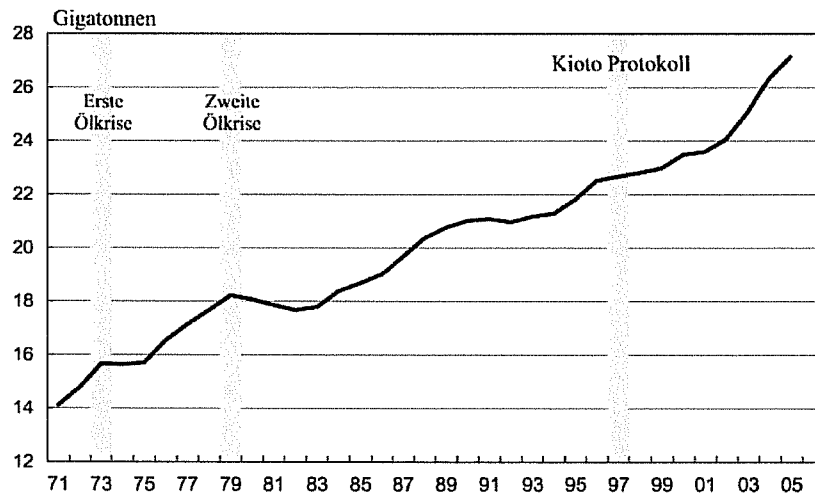


Abbildung. 1: Jährliche weltweite Kohlendioxidemission

Wie klar zu sehen ist, steigt die weltweite Emissionsmenge kontinuierlich an, sogar während und nach den Verträgen zum Klimaschutz. Beispielsweise wurde 1997 das Kyoto-Protokoll wirksam. Es ist jedoch keinerlei Absinken in der CO<sub>2</sub>-Kurve zu erkennen, sondern vielmehr eine ständige Zunahme an Treibhausemissionen, was auf den ersten Blick betrachtet einen Widerspruch dazu darstellt.

Diese Arbeit beschäftigt sich im Kern mit der Lösung der zunächst nicht konsistent erscheinenden Emissionsentwicklung. Im Zentrum der Analyse wird stehen, warum Klimapolitik nicht allein die Nachfrageseite betreffen sollte. Die Idee der Nachfragepolitik ist, dass umweltbewusste Länder ihre Emissionen zu Gunsten des globalen öffentlichen Gutes „Umweltqualität“ reduzieren. Unter der Prämisse, dass andere Länder ihre Emissionen konstant halten oder ebenfalls reduzieren, soll sich der Klimawandel dadurch etwas verlangsamen.

Um das oben angesprochene Emissionsrätsel zu lösen, darf das Kohlenstoffangebot insbesondere der erschöpfbaren Ressourcen – die im Zentrum der Betrachtung stehen - nicht länger vernachlässigt werden. Denn nur wenn das weltweite Angebot preiselastisch ist, werden Nachfrageänderungen tatsächlich zu einer CO<sub>2</sub>-Mengenänderung führen. Da, wie aus Abbildung 1 zu entnehmen ist, allerdings kein Abfallen der Schadstoffmenge zu beobachten ist, kann daraus der Schluss gezogen werden, dass die Angebotsseite zumindest zum jetzigen Zeitpunkt die Menge diktiert.

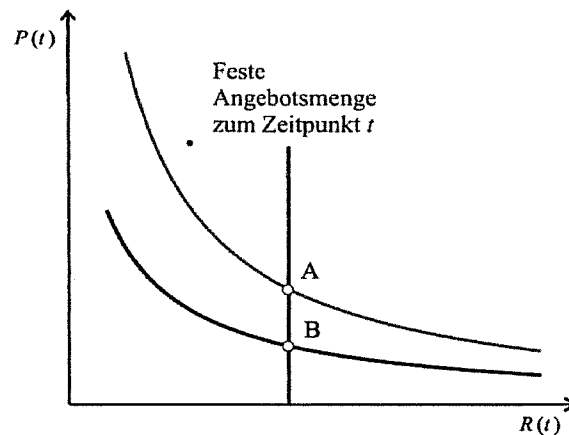


Abbildung 2: Vollständig unelastisches Angebot

Dies ist der Fall, wenn das Angebot zu jedem Zeitpunkt  $t$  - wie in Graphik 2 abgebildet – preisunelastisch ist. „Ölscheichs“ und andere Anbieter bieten eine fixe Menge an fossilen Brennstoffen  $R(t)$  unabhängig vom Preis  $P(t)$  an. Jeder Nachfragereduktion wird durch eine Preissenkung vollständig entgegengewirkt, denn der sinkende Preis gibt anderen Verbraucherländern Anreize ihren Kohlenstoffkonsum in  $t$  zu erhöhen. Durch Aufhebung der gegenläufigen Effekte ändert sich die Geschwindigkeit des Klimawandels nicht (Bewegung von Punkt A nach B).<sup>7</sup>

Im ersten Teil der Arbeit wird die zu betrachtende Angebotsseite um eine intertemporale Komponente erweitert. Den Ausgangspunkt bildet ein stark normativ geprägtes Modell von Solow und Stiglitz, das aus Perspektive der Gesellschaft einen optimalen Extraktionspfad fossiler Brennstoffe entwickelt. Wird die so ermittelte Effizienzbedingung von einer Volkswirtschaft erfüllt, kann keine weitere Pareto-Verbesserung zwischen den Generationen durch eine Änderung des Abbaupfades vollzogen werden. Das bedeutet, dass keine künftige Generation besser gestellt werden kann, ohne die jetzige schlechter zu stellen.<sup>8</sup> In das Modell werden anschließend Annahmen bezüglich unsicherer Eigentumsrechte und des Treibhauseffektes integriert und deren Auswirkung auf den Abbaupfad bzw. die Extraktionsgeschwindigkeit analysiert.

Die zweite modellhafte Betrachtungsweise setzt bei den Ressourcenbesitzern an. Unter der Annahme, dass fossile Brennstoffe erschöpfbare Ressourcen sind, müssen diese ihre Fördermenge und die angebotene Menge an Brennstoffen in jeder Periode optimieren. Dieser optimale Extraktionspfad wird unter Zuhilfenahme der Hotelling-Regel beschrieben. Dabei stehen die Anbieter

---

<sup>7</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 9-13.

<sup>8</sup> Vgl. Sinn (2008a), S.25-26.

vor der Alternative, die Ressourcen sofort abzubauen und den erzielten Gewinn am Kapitalmarkt zum gegebenen Zins anzulegen oder die Extraktion erst zu späteren Zeitpunkten vermehrt vorzunehmen und dabei auf eine Preissteigerung zu hoffen. Im Gleichgewicht ist Arbitrage nicht möglich und die Hotelling-Regel, welche aus dem Ansatz einer Beschreibung des Verhaltens der Ressourceneigner resultiert, wird erfüllt.

Das schon im Titel dieser Arbeit angekündigte grüne Paradoxon bildet den Kern der Arbeit und des zweiten Teils, indem es die Forcierung der grünen Politik im Lichte von Solow-Stiglitz und Hotelling untersucht. Insbesondere wird in den Quellen Sinn (2008a) und Sinn (2008b) erörtert, wie die zeitliche Dimension einer Steuer auf den Kohlenstoffeinsatz die Förderung fossiler Brennstoffe beeinflusst. Das Sinn'sche Modell sagt für den Fall einer immer höher werdenden Besteuerung eine Erhöhung der Extraktionsgeschwindigkeit erschöpfbarer Ressourcen und somit eine Verschärfung des Klimawandels voraus, was als „grünes Paradoxon“ bezeichnet wird.<sup>9</sup> Diese theoretische Prognose passt empirisch zum ansteigenden Schadstoffausstoß in Graphik 1. Welche Komponenten jedoch in welcher Qualität und Quantität genau zu einer Beeinflussung der Extraktionsgeschwindigkeit führen, wird in Teil I und Teil II ausführlich behandelt.

Den genannten Modellansätzen folgt in Teil II abschließend eine Modellkritik in Hinsicht auf Forschung und Entwicklung, erneuerbare Technologien, Modellerweiterungsmöglichkeiten, politische Überlegungen und vor allem Substitute für erschöpfbare Brennstoffe bzw. Backstop-Ressourcen. Die Kritik basiert vor allem auf Kommentaren von Edenhofer und Kalkuhl, Kemfert sowie Tol und Anthoff zu Sinns Modellansatz.

Im dritten Teil der Arbeit werden von der Sinn'schen theoretischen Betrachtungsweise implizierte Politikmaßnahmen sowie technische Möglichkeiten zur Reduktion von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre kritisch analysiert. Die durch das Modell gestützte Kritik an der heutigen Umweltpolitik darf nicht als Affront gegen jegliche umweltpolitische Handlungen gesehen werden. Im Gegenteil versucht Sinn an vielen Punkten bzw. Variablen oder Modellkomponenten der Theorie rund um das grüne Paradoxon anzusetzen – wie im Hauptteil noch näher erläutert wird. Eine der wichtigsten Forderungen, die Sinn ableitet, ist eine Quellensteuer, welche die Anlage der Gewinne für die Ressourcenbesitzer am Kapitalmarkt weniger attraktiv macht und somit zu einer Verlangsamung der Extraktion führen soll. Wichtig bei allen Politikimplikationen ist, dass stets das Angebot in die Überlegungen eingebettet wird und keine reine Nachfragepolitik, wie sie aktuell von den EU-Staaten praktiziert wird, stattfindet.

---

<sup>9</sup> Vgl. Abschnitt 2.5. Diese Kernthese des grünen Paradoxons gilt nur unter bestimmten Parameter- bzw. Variablen-voraussetzungen,



Mit dieser Einteilung der Arbeit soll klar zwischen theoretischem Ansatz und den daraus resultierenden Vorschlägen für das praktisch-politische Vorgehen getrennt werden. Denn oft sind theoretisch fundierte und konsistent erscheinende Handlungsimplicationen unter den realen sozio-ökonomischen Bedingungen schwer umsetzbar.

## 2. Modellansätze hinsichtlich der Angebotsseite erschöpfbarer Ressourcen

Bei den folgenden zwei Modelltypen - von Solow-Stiglitz einerseits und von Hotelling andererseits - dient vor allem eine intuitive Erklärung dem Verständnis grundlegender Theorieaspekte. Zudem soll eine formale Herleitung die Intuition logisch-deduktiv stützen. Es wird anschließend auf die enge Verbindung zwischen den beiden Ansätzen eingegangen. Nach einer Erweiterung der beiden Modelle um Marktunvollkommenheiten wird in Abschnitt 2.5 das grüne Paradoxon diskutiert, welches in seiner praktischen Konsequenz auf den ersten Blick zu überraschenden Politikimplikationen führt.

## Teil I

### 2.1 Solow-Stiglitz-Modell

In diesem ersten Abschnitt wird ein neoklassisches Modell normativer Verbindlichkeit betrachtet, mit dessen Hilfe eine optimale Abbaubedingung für erschöpfbare Ressourcen, wie z.B. Erdöl, Kohle oder Gas, hergeleitet wird. Dabei wird zunächst von jeglichen Klimaschäden für eine Volkswirtschaft abstrahiert und ausschließlich die Aufteilung zwischen produziertem Kapital  $K$  und der zu extrahierenden Ressource  $R$  aus Sicht der Gesellschaft bzw. eines sozialen Planers optimiert.<sup>10</sup> Eng mit diesem Vorgehen verbunden ist die Wohlfahrtsoptimierung über mehrere Generationen. Eine Volkswirtschaft kennt zwei Wege, Konsummöglichkeiten späteren Generationen zu übertragen. Entweder wird natürliches Kapital in Form von sich in Lagerstätten befindenden Ressourcen oder mittels extrahierter Ressourcen produziertes Sachkapital vererbt.<sup>11</sup>

#### 2.1.1 Intuitiver Erklärungsansatz des Solow-Stiglitz-Modells<sup>12</sup>

Ausgangspunkt bildet folgende Produktionsfunktion

$$Y = f(K, R, t) \quad (1)$$

mit den Inputfaktoren  $K$  als Kapitalstock des hergestellten Sachkapitals,  $R$  die Menge an der extrahierten erschöpfbaren Ressource (nicht die Ressourcen in den Lagerstätten),  $Y$  als Output –  $K$ ,  $R$  und  $Y$  sind jeweils zeitvariant – sowie  $t$  als Zeitvariable. Des Weiteren gilt für die Inputfaktoren  $K$  und  $R$ , dass ihr Grenzprodukt positiv ist und mit ihrer Einsatzmenge abnimmt:  $f_K > 0$ ,  $f_{KK} < 0$  und  $f_R > 0$ ,  $f_{RR} < 0$ . Es kann angenommen werden, dass trotz eines Einsatzrückgangs des fossilen Brennstoffs  $R$  die Produktion der Investitionsgüter oder Konsumgüter ( $Y$  ist hier nicht näher spezifiziert) mit fortschreitender Zeit nicht zurückgeht:  $f_t > 0$ .

Diese Annahme wird bei Sinn (2008b) nicht weiter erläutert. Allerdings müssen einige funktionale Spezifikationen erfüllt sein. Beispielsweisen – für jede Produktionsfunktion gilt anderes –

führt eine Substitutionselastizität  $\sigma = \frac{d(K/R)}{K/R} / \frac{d(Y_K/Y_R)}{Y_K/Y_R} \geq 1$ <sup>13</sup> bei einer CES-

---

<sup>10</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 366.

<sup>11</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 22-23.

<sup>12</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 366-369.

<sup>13</sup> Vgl. Perman, Ma, McGilvray, Common (2003), S. 474-477.  $\sigma$  Beschreibt die relative Änderung des Einsatzverhältnisses von  $K$  und  $R$  bei einer Änderung der relativen Grenzprodukte der Inputfaktoren. Je höher  $\sigma$ , desto eher können die beiden Faktoren gegeneinander substituiert werden. In Verbindung mit der CES-Produktionsfunktion gilt  $\sigma = 1/(1+\theta)$ .  $\theta$  ist hier ein Parameter der Produktionsfunktion.

Produktionsfunktion  $Y = A(\alpha K^{-\theta} + \beta R^{-\theta})^{-1/\theta}$  auch ohne technischen Fortschritt und ohne Bevölkerungswachstum zu einer nachhaltigen Produktion, sprich die Konsummöglichkeiten für folgende Generationen sind mindestens genauso hoch, wie das Konsumpotential der heutigen.

Anders betrachtet kann der Output auch in folgende Komponenten aufgeteilt werden, wenn Extraktionskosten für die sich im Boden befindlichen Ressourcen angenommen werden: Der erwirtschaftete Output kann einer Volkswirtschaft demnach zum Konsum dienen, den Kapitalstock ausweiten oder zum Abbau weiterer Ressourcen genutzt werden (hier müssen die Extraktionskosten kompensiert werden).

$$Y_t = C_t + \dot{K}_t + g(S_t)R_t \quad (2)$$

Mit  $C_t$  als Konsumvariable,  $\dot{K}_t$  als Änderung des Kapitalstocks zwischen zwei Zeitpunkten bzw. als Investition und  $g(S_t)$  als Extraktionskosten pro Einheit der Ressource, welche sich in Abhängigkeit des im Boden verbleibenden Ressourcenstocks  $S_t$  befinden.<sup>14</sup>

Im Folgenden wird aus Gründen der Vereinfachung der Zeitindex der Variablen weggelassen. Eine Volkswirtschaft bzw. ein sozialer Planer hat bestimmte Möglichkeiten, wie mit dem Bestand an erschöpfbaren fossilen Brennstoffen umgegangen wird. Es kann heute eine Einheit der Ressource gefördert und investiert werden. Nach Ablauf der Periode kann die Volkswirtschaft das zusätzlich investierte Kapital  $f_R - g(S)$  und den damit verbundenen zusätzlich produzierten Output  $f_K(f_R - g(S))$  konsumieren.

Alternativ kann die Gesellschaft die Extraktion um eine Periode verschieben. Wiederum nach Ablauf dieser Periode wird der Konsum um  $f_R - g(S)$  ausgebaut und die Gesellschaft profitiert zusätzlich von einer Steigerung des Grenzproduktes der Ressource  $\dot{f}_R$  aufgrund der zunehmenden Brennstoffknappheit. Im Optimum kann die Gesellschaft durch Ausweichen auf eine der beiden Alternativen nicht mehr besser gestellt werden. Es ist demnach nicht möglich, das Konsumpotential einer Periode zu steigern, ohne es in einer anderen zu senken: Der Volkswirtschaft steht bei der Wahl beider Möglichkeiten die gleiche zusätzliche Konsumsteigerung in der Folgeperiode offen, was als Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung – einer Pareto-Effizienz für erschöpfbare natürliche Ressourcen – bezeichnet wird.

$$f_K = \frac{\dot{f}_R}{(f_R - g(S))} \quad (3)$$

---

<sup>14</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 23-25. Da Firmen zunächst das Öl der Lagerstätten mit den geringsten Stückkosten der Extraktion fördern und erst mit dem Preisanstieg der Ressource lohnend werdende „teure“ Lager ausgebeutet werden, kann gefolgert werden, dass je niedriger der Restbestand  $S$  der fossilen Brennstoffe ist, desto höher  $g$ :  $g'(S) < 0$ . Neuentdeckungen (eine Ausweitung von  $S$ ) und Förderung von Vorkommen mit zu hohen Extraktionskosten werden nicht in dieses Modell integriert.

<sup>15</sup> Herleitung im Anhang, S. 54.

Im speziellen Fall der Abwesenheit von Extraktionskosten  $g=0$  impliziert Gleichung (3), dass beim gewählten Extraktionspfad die Wachstumsrate des Grenzproduktes der Ressource dem Grenzprodukt des Sachkapitals entsprechen muss.

Um den Ansatz der Vererbung von Kapital an zukünftige Generationen zu verfolgen, kann Gleichung (3) auch unter anderem wie folgt interpretiert werden: Eine Gesellschaft kann Bodenschätze oder mittels extrahierter Ressourcen produziertes Sachkapital vererben. Ausgehend vom Wohlstand der gegenwärtigen Generation sollen die Konsummöglichkeiten der Folgegenerationen maximiert werden, indem eine optimale Zusammensetzung zwischen produziertem Sachkapital und natürlichem Kapital in den Lagerstätten vererbt wird.

Bei der Vererbung von einer Einheit Sachkapital wird eine Rendite in Höhe des Grenzproduktes des Kapitals erzeugt. Zudem steigert die Einheit  $K$  das Sozialprodukt, das wiederum der heutigen und künftigen Generationen zur Verfügung steht. Dagegen liefert die Vererbung von einer zusätzlichen Einheit der Ressource nur indirekt einen Vorteil. Die Grenzproduktivität der Ressource steigt nur durch Verknappung des Inputfaktors im Zeitverlauf. Denn je mehr heute vom erschöpfbaren Faktor im Verhältnis zu künftigen Zeitpunkten gefördert wird, desto höher ist der Grenzvorteil, den die Ressource in Zukunft erwirtschaftet. Die Wachstumsrate des Grenzproduktes von  $R$  ist der gesellschaftliche Vorteil, der durch die Konservierungsstrategie bewirkt wird.

### *2.1.2 Formale Herleitung des gesellschaftlichen Optimums<sup>16</sup>*

Ein Optimum kann sich nur einstellen, wenn der Extraktionspfad der natürlichen Ressource der Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung genügt, d.h. sich die beiden beschriebenen Vorteile entsprechen und eine optimale Verteilung des Vermögens zwischen Sachkapital und Ressourcen vorliegt. Es kann dann, wie bereits erwähnt, keine Generation besser ausgestattet werden, ohne eine andere dabei schlechter zu stellen.<sup>17</sup>

Allerdings ist Gleichung (3) nicht aussagekräftig, was sowohl die optimale als auch faire Aufteilung des Konsums zwischen der heutigen und künftigen Generation betrifft, d.h. wie viel Kapital den folgenden Volkswirtschaften vererbt werden soll. Die Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung beschreibt lediglich das Verhältnis zwischen Sach- und natürlichem Kapital in situ, das für ein Wohlfahrtsoptimum künftiger Generationen notwendig, aber noch nicht hinreichend ist. Um die-

---

<sup>16</sup> Vgl. Perman, Ma, McGilvray, Common (2003), S. 481-485.

<sup>17</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 23-24.

ses Problem zu lösen, muss von einer (normativ nicht leicht begründbaren<sup>18</sup>) sozialen Wohlfahrtsfunktion aller Generationen – wobei kein Ende der Generationenfolge angenommen wird – ausgegangen werden. Aus der diskreten Betrachtungsweise einer utilitaristischen Wohlfahrtsfunktion mit je gleichen Gewichten  $W = U_0 + \frac{U_1}{(1+\rho)} + \frac{U_2}{(1+\rho)^2} + \dots + \frac{U_T}{(1+\rho)^T}$ , bei welcher der jeweilige Nutzen zu den Zeitpunkt  $t=1$  bis  $t=T$  (mit  $T \rightarrow \infty$ ) auf den heutigen Zeitpunkt mit der Rate  $\rho$  abdiskontiert wird, ergibt sich unter der Annahme von Zeitstetigkeit die Wohlfahrtsfunktion:

$$W = \int_{t=0}^{t=\infty} N(t)U(c(t))e^{-\rho t} dt \quad (4)$$

mit  $N(t)$  als Anzahl der Bevölkerung zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  in einer Gesellschaft,  $c(t) = \frac{C(t)}{N(t)}$  als pro Kopf Konsum zu einem Zeitpunkt  $t$ ,  $U$  als Nutzen und  $\rho$  als gesellschaftliche Diskontrate zwischen und innerhalb der Generationen.

Es gilt nun die Wohlfahrt aller Generationen zu maximieren, indem die optimalen Werte der Variablen  $C_t$  und  $R_t$  im Zeitverlauf  $t = 0, \dots, \infty$  gefunden werden. Die Maximierung geschieht unter der Nebenbedingung eines festen Bestandes  $S_0$ , der in einer bestimmten Zeitdauer von  $\tau=0$

bis  $\tau=t$  abgebaut wird:  $S_t = S_0 - \int_{\tau=0}^{\tau=t} R_t dt$ . Dies ergibt bei einer zeitlichen Differenzierung folgende

Restriktion:

$$\dot{S}_t = -R_t \quad (5)$$

mit  $\dot{S}_t = \frac{dS}{dt}$ . Zusätzlich muss die gesamtwirtschaftliche Budgetrestriktion erfüllt sein: Gleichung (2) impliziert

$$\dot{K}_t = Y_t(K_t, C_t) - C_t - g(S_t)R_t \quad (6)$$

wobei im weiteren Verlauf die Extraktionskosten unberücksichtigt bleiben:  $g(S_t)=0$ . Folgende Gleichungen charakterisieren das gesellschaftliche Optimum<sup>19</sup>:

$$U_{C,t} = \omega_t \quad (7.1)$$

$$P_t = \omega_t Y_{R,t} \quad (7.2)$$

$$\dot{P}_t = \rho P_t \quad (7.3)$$

$$\dot{\omega}_t = \rho \omega_t - Y_{K,t} \omega_t \quad (7.4)$$

<sup>18</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 369. Hier wird die Problematik des Diskontfaktors dargestellt, der zum einen nicht ohne weiteres angenommen werden darf und zum zweiten in seinem konkret anzunehmenden Wert bei verschiedenen Studien bzw. Autoren unterschiedlich bemessen wird.

<sup>19</sup> Herleitung im Anhang, S. 54.

$Y_{R,t}$  bzw.  $Y_{K,t}$  sind die jeweiligen Grenzprodukte und  $U_{C,t}$  ist der gesellschaftliche Grenznutzen.  $\omega_t$  und  $P_t$  stellen die im Zeitablauf variierenden Schattenpreise der beiden Inputfaktoren dar und werden in Nutzeinheiten gemessen.

Gleichungen (7.1) und (7.2) sind statische Effizienzbedingungen, die erfordern, dass der zusätzliche Nettonutzen für die Gesellschaft bei jeder Art der Nutzung der Ressource (als Produktionsfaktor oder in situ) gleich ist. Gleichung (7.1) zeigt beispielsweise, dass der soziale Grenznutzen in jeder Periode dem Schattenpreis des Kapitals entsprechen muss. Demnach kann eine marginale Einheit des Outputs in Höhe von  $U_C$  zusätzlich konsumiert werden oder der Erweiterung des Kapitalstocks in Höhe von  $\omega_t$  Nutzeinheiten dienen. Gleichung (7.2) drückt den Sachverhalt aus, dass der Wert des Grenzproduktes der natürlichen Ressource im Optimum gleich dem marginalen Wert bzw. Schattenpreis des Ressourcenstocks sein muss. Zu  $\omega_t$  muss angemerkt werden, dass Outputeinheiten und Kapitaleinheiten entlang des optimalen Pfades identisch sind, denn jede nicht konsumierte Outputeinheit wird dem Kapital beigefügt, was  $\omega_t$  gleichzeitig zum Wert einer marginalen Outputeinheit macht.

Die dynamischen Effizienzbedingungen (7.3) und (7.4) beschreiben optimale Entwicklungspfade für die Schattenpreise und stellen sicher, dass der Ertrag bzw. die Rendite jedes Inputfaktors über die Zeit konstant und gleich der sozialen Diskontrate ist. Wenn (7.3) bei einer beiderseitigen

Division durch  $P$  zu  $\frac{\dot{P}_t}{P_t} = \rho$  wird, kann gezeigt werden, dass der Schattenpreis der natürlichen erschöpfbaren Ressource im Optimum in Höhe der sozialen Diskontrate wächst. Die Umformung von (7.4) zu  $\frac{\dot{\omega}_t}{\omega_t} + Y_{K,t} = \rho$  impliziert, dass der Ertrag des Sachkapitals (die Wertsteigerung und die Grenzproduktivität) ebenfalls gleich der sozialen Diskontrate sein muss.

## 2.2 Hotelling-Regel

Eine andere Möglichkeit, ein Modell für Ressourcenabbaupfade herzuleiten, resultiert aus der Betrachtungsweise, wie sich Ressourcenbesitzer – insbesondere Ölscheichs – im Idealfall bezüglich der Erdölförderung verhalten. Bei Sinn (2008a) wird die Hotelling-Regel als „positives Pendant“<sup>20</sup> zum normativen Modell von Solow und Stiglitz betrachtet. Allerdings sei angemerkt, dass auch hier einige normative Komponenten für eine Theorie, die beschreiben soll, wie Märkte reibungslos funktionieren, nicht zu vernachlässigen sind.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> Sinn (2008a), S. 23.

<sup>21</sup> Vgl. Perman, Ma, McGilvray, Common (2003), S. 511-520.

### 2.2.1 Intuitiv-ökonomischer Erklärungsansatz der Hotelling-Regel<sup>22</sup>

Ausgegangen wird von einem Portfolioproblem der Ressourcenbesitzer. Diese können einerseits ihre Ressourcen in den Lagerstätten lassen und die Extraktion in die Zukunft verschieben. Die andere Möglichkeit besteht darin, Erdöl und Gas heute zu fördern und die entstehenden Gewinne am Kapitalmarkt anzulegen. Werden Ressourcen extrahiert, verknappen sie sich immer weiter und der Marktpreis der verbleibenden Brennstoffe erhöht sich, was zu einer direkten Wertsteigerung der Lagerstätten führt. Dieser kontinuierlichen Wertsteigerung steht die Kapitalmarktrendite auf angelegte Gewinne, wenn heute extrahiert wird, als Anreizinstrument gegenüber.

Das Portfolioproblem impliziert, dass die Ressourcenanbieter die Gesamtrendite ihres Vermögens maximieren. Sie werden die Förderung der erschöpfbaren Ressourcen in die Zukunft verlegen, wenn die Wertsteigerung ihrer Lagerstätten über dem Kapitalmarktzins liegt. Dadurch verknappt sich jedoch das heutige Angebot an Ressourcen und der heutige Preis steigt relativ zum zukünftigen, was eine sofortige Extraktion wieder attraktiver macht. Andererseits werden die Anbieter die Extraktion heute forcieren, wenn der umgekehrte Fall vorliegt, d.h. wenn der Zinssatz die Wertsteigerung der Lager übersteigt. Hierbei wirkt eine heutige Ausweitung des Angebots jedoch als eine Senkung des heutigen Preises verglichen mit den zukünftigen, was die sofortige Extraktion wieder unattraktiv macht.

Im Gleichgewicht sind die Anbieter indifferent zwischen einer Verschiebung der Extraktion in die Zukunft und einer sofortigen Förderung in Verbindung mit einer Kapitalmarktanlage. Es muss gelten, dass die Wertsteigerung der Lagerstätten gleich der Kapitalmarktrendite ist. Ohne Extraktionskosten bedeutet dies, dass sich die Preissteigerung der extrahierten Ressource der Kapitalmarktrendite angleicht, denn der Preis der extrahierten Ressource entspricht dann dem Wert der Ressource im Lager.

Diese Gleichgewichtsbedingung wird Hotelling-Regel genannt und erfasst alle Marktformen, insbesondere die des Monopols, Oligopols und der vollständigen Konkurrenz.<sup>23</sup>

### 2.2.2 Intuitiv-formaler Erklärungsansatz des Maximierungsproblems

Hinter der oben beschriebenen Intuition steht ein formales Gewinnmaximierungskalkül der Ressourceneigner. Im nachfolgend beschriebenen Modell werden folgende Annahmen (ähnlich den

---

<sup>22</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 22-23.

<sup>23</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 22-23.

Prämissen und Nebenbedingungen bei der Beschreibung des sozialen Optimums in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2) getätigt:<sup>24</sup>

1. Extraktionskosten pro Einheit der Ressource steigen mit zunehmender Verknappung des Bestandes  $S$  (vgl. Abschnitt 2.1.1):  $g'(S) < 0$
2.  $R$  ist die geförderte Menge an Ressourcen zu einem gewissen Zeitpunkt. Bei der Extraktion schwindet der Bestand  $S$ :  $R_t = -\dot{S}_t$
3. Externalitäten, die aus Konsum, Extraktion oder unsicheren Eigentumsrechten der Ressource herrühren, werden im Grundmodell nicht beachtet.
4. Der Ressourcenstock ist fix, was eine sehr stringente Annahme darstellt. Neue Entdeckungen oder technologischer Fortschritt, der neue Entdeckungen erst ermöglicht, werden ausgeschlossen.
5. Es liegen weder Steuern noch Subventionen beim Verkauf und bei der Extraktion der Ressourcen vor.

Der Extraktionspfad der Ressource wird so gewählt, dass der heutige Barwert aus allen künftigen Gewinnen  $(P_t - g(S_t))R_t$  (mit  $P_t$  als Weltpreis für fossile Brennstoffe pro geförderte Einheit) maximiert wird. Wird zum Zeitpunkt  $t$  eine Einheit an fossilem Brennstoff extrahiert und am Kapitalmarkt angelegt, so entsteht dem Ressourcenbesitzer für diese Einheit ein Gewinn von  $P_t - g(S_t)$  und der Rendite  $i_t[P_t - g(S_t)]$  mit  $i_t$  als Marktzins zu dem investiert werden kann. Wird die Extraktion um eine Periode verschoben, erhält der Ressourcenbesitzer immer noch einen Gewinn von  $P_t - g(S_t)$  pro geförderter Einheit  $R$ , allerdings fehlt die Rendite  $i_t$ , da keine Kapitalmarktanlage erfolgt. Dennoch profitiert der Anbieter von der Preissteigerung zwischen den beiden Perioden  $\dot{P}_t$ , denn der Preis der Ressource steigt mit der Zeit durch die allgemeine Verknappung fossiler Brennstoffe. Im Optimum müssen beide Vorteile – derjenige der Förderung inklusive Anlageoption und derjenige der Konservierung – einander entsprechen, damit kein zusätzlicher Vorteil allein durch die Wahl einer der beiden Alternativen entsteht.

$$i_t = \frac{\dot{P}_t}{(P_t - g(S_t))} \quad (8)$$

Gleichung (8) – auch als Hotelling-Regel bekannt – impliziert für den speziellen Fall fehlender Extraktionskosten  $g=0$ , dass die Preissteigerungsrate für den erschöpfbaren Inputfaktor  $R$  dem

---

<sup>24</sup> Annahmen 3-5 beziehen sich auf Perman, Ma, McGilvray, Common (2003), S. 507-508, 520.

<sup>25</sup> Herleitung im Anhang, S 55.



Marktzins entspricht.<sup>26</sup> Unter Zuhilfenahme der vereinfachten Gleichung (8) mit  $i_t = \frac{\dot{P}_t}{P_t}$  und der Annahme eines zeitsteten Zinses kann folgende Umformung vorgenommen werden,

$$\dot{P}_t = i_t P_t \text{ und } \dot{P}_t = P_0 e^{it} \quad (9)$$

wenn der Preiswachstumspfad zeitstetig in Abhängigkeit des Anfangspreises  $P_0$  in  $t_0$  betrachtet wird. Zwei potentielle, die Hotelling-Regel erfüllende, exponentielle Wachstumspfade des Ressourcenpreises, die mit dem Zinssatz stetig ansteigen, sind in Abbildung 3 dargestellt.<sup>28</sup>

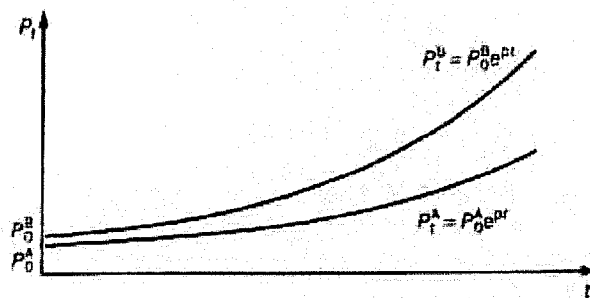


Abbildung 3: Zwei Wachstumspfade, welche die Hotelling-Regel erfüllen

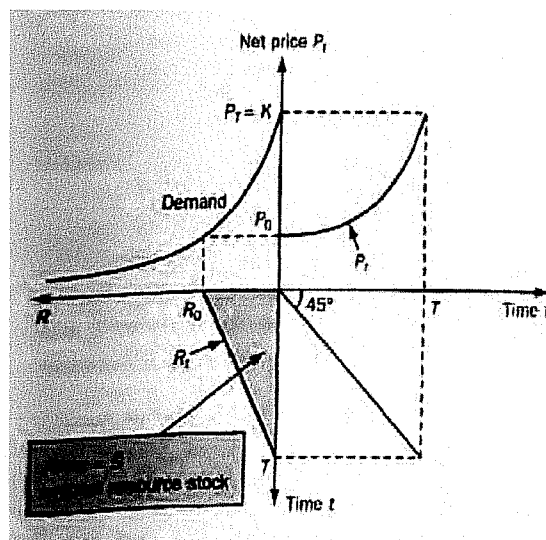


Abbildung 4: Graphische Erläuterung optimaler Ressourcenabbaupfade

Abbildung 4 integriert den optimalen Hotelling-Pfad in eine ganzheitliche Marktsichtweise. Der optimale Wachstumspfad  $P_t$  ist im ersten Quadranten in Abhängigkeit der Zeit  $t$  abgebildet. Im

<sup>26</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 366-367. Im allgemeinen Fall wächst jedoch zumindest die Ressourcenrendite  $P_t - g(S_t)$  mit dem Marktzins, vgl. Pittel (2010), S. 8-10.

<sup>27</sup> Die Differenzgleichung  $\dot{x}_t = ax_t$  ist gemäß der Formel  $x = x_0 e^{at}$  zu lösen.

<sup>28</sup> Vgl. Abschnitt 2.3: Für Abbildung 4 kann  $\rho = i$  angenommen werden (da Markt- und soziales Optimum zusammenfallen).

oberen linken Quadranten wird die inverse Nachfrage nach der Ressource  $P_t(R)$  dargestellt. Beim Maximalpreis  $P_T=K$ , auch „Choke Price“ genannt, ist die nachgefragte Menge zum Zeitpunkt  $T$  gleich Null und der Preiswachstumspfad endet. Zum Zeitpunkt  $T$  muss – soweit der optimale Abbaupfad, der die Hotelling-Regel erfüllt, gewählt wird – der volle Bestand  $S$  abgebaut sein, da bei einer weiteren Preissteigerung mangels Nachfrage keine fossilen Brennstoffe mehr verkauft werden können. Das folgt aus der Tatsache, dass die Hotelling-Regel nur eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für den optimalen Abbaupfad ist: Der anfängliche Preis muss so gewählt werden, dass bis zum Choke Preis der gesamte Bestand  $S$  abgebaut wird.

Die Kurve des dritten Quadranten zeigt, wie der Strom der extrahierten Menge im Zeitverlauf variiert. Bei  $P_0$  ist die Nachfrage, wie auch die abgebaute Menge maximal. Der Kurvenverlauf der abgebauten Menge ist abhängig von der funktionalen Form der Nachfragekurve sowie dem Preisanstieg und muss nicht wie in Abb. 4 linear verlaufen. Wichtig ist jedoch, dass die Fläche unter der Kurve in jedem Fall die aggregierte extrahierte Menge der Ressource darstellt, im Optimalfall  $S$ . Die 45°-Linie des rechten unteren Quadranten stellt eine Hilfslinie dar, um die Verbindung zwischen dem Preispfad und dem Ressourcenabbaupfad herzustellen. Ein wichtiger Zusammenhang ist, dass ein steilerer Preispfad mit anfänglich höheren Ressourcenextraktionsraten verbunden ist.

### 2.3 Zusammenhang zwischen Solow-Stiglitz und Hotelling

Wenn von einem vollkommenen Markt – mit perfektem Wettbewerb und ohne andere Verzerrungen – ausgegangen werden kann, ist es, wie bereits im Abschnitt 2.1.2 angedeutet, möglich, die Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung in die Hotelling-Regel zu überführen und umgekehrt. Im Marktgleichgewicht gleicht das Grenzprodukt der extrahierten Ressource ihrem Preis und das Grenzprodukt des Kapitals dem Zinssatz – wie aus Gewinnmaximierungsproblemen von Firmen unter vollständiger Konkurrenz bekannt.<sup>29</sup> Aus  $Y = f(K, R, t)$  als produziertes Konsum- oder Investitionsgut und den Inputpreisen  $P$  für die Ressource und  $i$  für Kapital folgt

$$Y_R = f_R = P \text{ und } Y_K = f_K = i \quad (10)$$

Somit wird mit Verzicht auf sämtliche Zeitindices aus Gleichung (3), die mit

$$f_K = \frac{\dot{f}_R}{(f_R - g(S))} \text{ gegeben ist, Gleichung (8) mit } i = \frac{\dot{P}}{(P - g(S))}. \text{ Gezeigt wird, dass Gleichung (8)}$$

das positive Pendant zur sozialen Effizienzbedingung aus gesamtgesellschaftlicher Sicht in Gleichung (3) darstellt, natürlich nur unter der Annahme eines vollkommenen Marktes. Wie schon

---

<sup>29</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 25. Herleitung im Anhang, S. 55.

im ersten Hauptsatz der Wohlfahrtstheorie<sup>30</sup> propagiert, sind die Modelle von Solow-Stiglitz sowie von Hotelling nur zwei Seiten der gleichen Medaille, denn beide Modelle münden in einer Bedingung, die von einem pareto-optimalen Abbaupfad für erschöpfbare Ressourcen erfüllt werden muss. Dieser Sachverhalt ist unabhängig davon, ob die Soziale-Planer-Lösung oder eine Marktlösung ins Visier genommen wird.

Um die formale Herleitung des gesellschaftlichen Optimums aus Abschnitt 2.1.2 weiterzuführen, soll an dieser Stelle eine weitere Herangehensweise an den Hotelling-Pfad ergänzt werden. Bei der Umformung von Gleichung (7.3) zu  $\dot{P}_t = \rho P_t$  und weiter zu  $P_t = P_0 e^{\rho t}$ , zeigt Perman (2003), dass die Hotelling-Regel auch aus einem gesellschaftlichen Optimum hergeleitet werden kann. Demnach beträgt die Wachstumsrate des Ressourcenpreises  $\rho$ . Wenn man bedenkt, dass der Marktzins  $i$  aus Gleichung (8) auf einem vollkommenen Markt nichts anderes als die soziale Diskontrate darstellt, wird hiermit der Beweis angeführt, dass Solow-Stiglitz und Hotelling auseinander hervorgehen. Ressourcen sind nichts anderes als Wertanlagen für die Gesellschaft, ähnlich Wertpapieren. Deshalb gilt auch, je ungeduldiger eine Gesellschaft ist, d.h. je stärker heutige im Verhältnis zu künftigen Konsummöglichkeiten gewichtet werden und je höher  $\rho$ , desto größer müssen die Preiswachstumsraten natürlicher Ressourcen sein, was einen steileren Abbaupfad der Ressourcen impliziert (siehe auch die Erläuterung zu Abbildung 4).<sup>31</sup>

#### 2.4 Verschiedene Arten von Marktversagen

Nach der ausführlichen Betrachtung beider Modelle ohne die Annahmen von Externalitäten bzw. Marktversagen, werden Gleichungen (3) und (8) als notwendige Bedingung für ein gesellschaftliches Optimum vorausgesetzt. Unter Miteinbezug von Eigentumsrechten und des Treibhauseffektes wird die Abweichung des jeweiligen Marktversagens im Vergleich zum optimalen Zustand bewertet.<sup>32</sup>

---

<sup>30</sup> Der erste Hauptsatz der Wohlfahrtstheorie besagt, dass jedes Wettbewerbsgleichgewicht pareto-effizient ist, insofern vollständiger Wettbewerb vorliegt. Es ist identisch zur Sozialen-Planer-Lösung, mit Ausnahme bei Marktversagen.

<sup>31</sup> Vgl. Perman, Ma, McGilvray, Common (2003), S. 485.

<sup>32</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 26.

### 2.4.1 Unsichere Eigentumsrechte<sup>33</sup>

Fossile Brennstoffe konzentrieren sich in Ländern, in denen politische Verhältnisse oft instabil sind. Kohlelagerstätten sind unter anderem in China, Methangas und 75% der Weltölreserven liegen in Venezuela, Kasachstan, Russland, dem mittleren Osten, Libyen und anderen Regionen mit zerrütteten politischen Verhältnissen, Konflikten und zuweilen unsicheren Eigentumsrechten.

Unsichere Eigentumsrechte führen zu einer beschleunigten Extraktion in der Gegenwart. Ölscheichs und andere Potentaten fürchten, dass ihre Nachkommen die Macht verlieren – jüngst durch eine Demokratisierungswelle bestätigt - und keine Gewinne aus den extrahierten Ressourcen nach dem Machtverlust fließen. Deshalb ist es ein Anreiz, das Öl heute zu fördern und es gewinnbringend am Kapitalmarkt anzulegen. Die Wertzuwächse der Ölfelder in Höhe des Zinssatzes kompensieren den Aufschub der Extraktion nicht vollständig. Der Extraktionspfad beginnt nun mit einer erhöhten Extraktionsrate, die im Zeitverlauf schneller abnimmt. Das heutige höhere Angebot und die zukünftig stärkere Verknappung der Brennstoffe führen zu einem stärkeren Preisanstieg im Zeitverlauf als bei einem flacheren Extraktionspfad. Damit ist garantiert, dass der jährliche Lagerstättenzuwachs die Anlagemöglichkeit (den Zins) und das Enteignungsrisiko kompensiert und nicht nur den Zins, wie in Gleichung (8). Es folgt:

$$i + \pi = \frac{\dot{P}}{(P - g(S))} \quad (11)$$

mit  $\pi$  als Wahrscheinlichkeit der Enteignung der Ressourcenbesitzer. Diese Extraktionsbedingung genügt nun nicht mehr dem intertemporalen Pareto-Optimum von Gleichungen (3) und (8), da bei einer Verlangsamung der Förderung von Brennstoffen der Konsum künftiger Generationen erhöht werden könnte, ohne denjenigen heutiger Volkswirtschaften zu verringern. Es findet eine Abweichung vom optimalen Pfad statt:

$$i < \frac{\dot{P}}{(P - g(S))} \quad (12)$$

was aus Gleichung (11) abgeleitet werden kann. Aufgrund des Marktversagens müsste rein formal ein sozialer Planer wohlfahrtssteigernd eingreifen. Eine Stärkung der Eigentumsrechte lässt sich in der Realität schwerlich durchführen.

Allerdings erweist sich diese theoretische Elaboration empirisch als nicht bestätigt, denn in der Tat extrahieren demokratische Regimes mehr Öl, Gas und Kohle als Diktatoren. Das könnte daran liegen, dass Investoren vor politischen Risiken zurückschrecken und nur gemäßigt in absolu-

---

<sup>33</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 27.

<sup>34</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 370. Zeitindices werden beim weiteren Vorgehen vernachlässigt.

tistisch regierten Ländern investieren, insofern die Förderung von Ressourcen in Lagerstätten unter der Erde betroffen ist.<sup>35</sup>

#### 2.4.2 Pareto-Optimalität und Treibhauseffekt<sup>36</sup>

Bei der Integration des Treibhauseffektes in die Modellbasis wird angenommen, dass selbst auf perfekten Märkten (mit funktionierenden Eigentumsrechten) Ressourcen zu schnell gefördert werden. Die durch den Treibhauseffekt verursachten externen Kosten zur Schadensbehebung – Schätzungen gehen von einem nicht unerheblichen Anteil des weltweiten Sozialproduktes aus<sup>37</sup> – werden durch das ursprüngliche Optimierungsproblem des Abbaupfades nicht erfasst. Der neue pareto-optimale Abbaupfad der erschöpfbaren Ressourcen wird durch einen langsameren Verbrauch der Brennstoffe gekennzeichnet, da davon ausgegangen wird, dass der Schadstoffausstoß einen weltweiten Temperaturanstieg verursacht.

Der Kapitalstock erzeugt ein positives Grenzprodukt und bietet damit einen Anreiz, Ressourcen schnell zu extrahieren. Je höher diese Grenzproduktivität ist, desto schneller muss im Optimum die Grenzproduktivität des Ressourceneinsatzes anwachsen. Das verlangt einen hohen Einsatz der Ressource am Anfang und einem steil abfallenden Pfad des Ressourcenabbaus im Zeitverlauf. Der in der Atmosphäre akkumulierte CO<sub>2</sub>-Bestand, der mit dem produzierten Output Y und mit der Extraktion der fossilen Brennstoffe anwächst, hat eine negative Grenzproduktivität, da er Schäden durch Klimaerwärmung verursacht. Je stärker das negative Grenzprodukt, desto langsamer sollte der Bestand S im Pareto-Optimum abgebaut werden. Um diesen Tatbestand in der Produktionsfunktion ergänzend zu erfassen, wird der Bestand S als positiver Beitrag integriert, da Ressourcen in den Lagerstätten kein umweltschädliches CO<sub>2</sub> verursachen.

$$Y = f(K, R, S, t) \quad (13)$$

S steht demnach für die Umweltqualität im Sinne der Abwesenheit von Schadstoffen in der Atmosphäre und generiert ein positiv abnehmendes Grenzprodukt:  $f_S > 0$  und  $f_{SS} < 0$ . Wenn nun zwischen Vor- und Nachteilen abgewogen wird, muss bei beiden Effekten, dem positiven Produktionsbeitrag der Ressource und der negativen Klimaschädigung, welche einander entgegenwirken, ein Optimum gefunden werden, bei dem der Grenzvorteil gleich dem Grenzschaten ist. Wenn heute extrahiert und der durch die Ressource produzierte zusätzliche Output investiert wird, erwirtschaftet eine Einheit der Ressource – wie bereits bei der Erläuterung der Solow-Stiglitz-

---

<sup>35</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 371.

<sup>36</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 28. Vgl. auch Abschnitte 2.1.1 und 2.2.2.

<sup>37</sup> Vgl. Stern (2006), S. 9. Im Stern-Report werden bei einer globalen Temperaturerhöhung um 5°C gesamtwirtschaftliche Kosten in Höhe von 5-10% des weltweit aggregierten Bruttoinlandproduktes veranschlagt.

Effizienzbedingung gezeigt –  $f_R - g(S)$  sowie den zusätzlichen Output  $f_K(f_R - g(S))$ . Beide Komponenten stehen der Gesellschaft nach Ablauf der Periode als Konsummöglichkeit zur Verfügung. Mit dem Treibhauseffekt tritt allerdings eine Schmälerung des Konsums um  $f_S$  ein, da der Einsatz der Ressource Schäden anrichtet, die es mittels eines Teils des erwirtschafteten zusätzlichen Kapitals bzw. Outputs zu beheben gilt:  $f_S$  wird von  $f_R - g(S) + f_K(f_R - g(S))$  subtrahiert. Verschiebt man die Extraktion um eine Periode, steigt der Konsum nach der Periode um  $f_R - g(S)$  und um den Anstieg des Grenzproduktes  $\dot{f}_R$  aufgrund der Verknappung der Ressource. Im Optimum der Sozialen-Planer-Lösung sind beide zusätzlichen Konsummöglichkeiten dieselben, wie Gleichung (14) demonstriert (siehe auch Gleichung (3)).

$$f_K = \frac{\dot{f}_R + f_S}{f_R - g(S)} \quad (14)$$

Das impliziert einen flacheren Extraktionspfad, da die Klimaschädigung durch die Förderung der Brennstoffe internalisiert wird. Für gegebene Werte von  $K$ ,  $S$  und  $R$  sollte  $\dot{f}_R$  abnehmen und das umso mehr, je größer der Grenzscha den durch den Ressourcenverbrauch ist. Unter Berücksichtigung der Annahme eines vollständigen Wettbewerbs kann mittels der Hotelling-Regel in Gleichung (8) gezeigt werden, dass der Marktzins im neuen Optimum über der Wertsteigerungsrate der Ressourcen in den Lagerstätten liegen sollte, wenn  $f_S > 0$  angenommen wird.

$$i > \frac{\dot{P}}{(P - g(S))} \quad (15)$$

Es liegt nicht wie bei fehlenden Eigentumsrechten eine vom Optimum abweichende Marktunstimmigkeit vor, sondern der Markt selbst kann den optimalen Pfad nicht erreichen, da die negative Externalität des Treibhauseffektes nicht internalisiert wird. Wenn der Extraktionspfad in die Richtung der effizienten Bedingung abflacht, wird ein geringerer Anteil des Sozialproduktes zum Beheben von Klimaschäden beansprucht und der Konsum künftiger Generationen kann, ohne dass der Konsum der heutigen Generation sinkt, steigen - trotz der geringeren gegenwärtigen Produktion an Sachkapital.

Abschließend kann man feststellen, dass unsichere Eigentumsrechte eine schnellere Extraktion mit sich bringen, obwohl die Förderung von Brennstoffen aufgrund des Treibhauseffektes verlangsamt werden sollte.

## Teil II

### 2.5 Das grüne Paradoxon

Die vorangegangene Analyse optimaler Abbaupfade eines erschöpfbaren Inputfaktors in normativer und positiver Hinsicht wird im Folgenden um eine politische Dimension erweitert. Um der Externalität des Treibhauseffektes entgegen zu wirken, werden heute zahlreiche Maßnahmen eingeleitet, welche die Nachfrageseite der Rohstoffe betreffen. Ob, wann und in welchem Ausmaße dieser Ansatz Probleme birgt, wird im nächsten Abschnitt besprochen.

#### 2.5.1 Energiepreisänderungen und die Reaktion der Ressourcenbesitzer<sup>38</sup>

Die meisten Regierungen versuchen den Klimawandel mit Hilfe einer Steuer auf den Kohlenstoffeinsatz zu verlangsamen. Die implizite Annahme ist, dass der Preisfad der Ressourcen fixiert ist und die Steuer die Nachfrage effektiv reduziert, da sie die fossilen Brennstoffe verteuert. Die verringerte Nachfrage wirkt sofort auf das Angebot und die gehandelte Menge sinkt. Bei dieser Argumentation wird jedoch der Aspekt intertemporaler Dynamik vernachlässigt. Selbst wenn heute auf die reduzierte Nachfrage mit einer Einschränkung des Angebots reagiert wird, weitet sich das Angebot in Zukunft aus, da der Ressourcenstock  $S$  im intertemporalen Optimum vollständig verkauft werden muss. Wann welche Menge an Ressourcen angeboten wird, hängt von der erwarteten Entwicklung der Nachfragereduzierung ab: Eine exogene gegenwärtige Nachfrageminderung, die heute die Preise drückt, impliziert, dass die Extraktion in die Zukunft verlagert wird und der Klimawandel wird verlangsamt. Anders verhält es sich bei einer für die Zukunft angekündigten Nachfragereduktion. Anbieter werden die Extraktion heute forcieren, da sie in Zukunft weniger verkaufen können, was den Klimawandel beschleunigt.

Erhebt beispielsweise eine Regierung eine zeitinvariante Wertsteuer auf die Nutzung fossiler Brennstoffe, erzeugt die Wertsteuer einen konstanten relativen Preiskeil. Wird die Abwesenheit von Extraktionskosten angenommen, sodass unter Zuhilfenahme der Hotelling-Regel die Äquivalenz von Preissteigerungsrate und Zins gilt, so steigt der absolute Preiskeil mit einer Rate in Höhe des Zinssatzes, da eine Wertsteuer vorliegt. Da der Barwert des absoluten Preiskeils bei Erfüllung dieser Bedingung konstant bleibt, gibt es keine Auswirkung auf den Extraktionspfad.

---

<sup>38</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 29-34.

Eine konstante Ad-valorem-Steuer hat demnach keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Klimawandels.

Wird jedoch durch die zunehmende Verschärfung des Klimawandels eine stringenter Politik, die sich in einer zunehmenden Erhöhung des Steuersatzes erweist, betrieben, werden Ressourcenbesitzer ihre Verkäufe in der Gegenwart erhöhen, um der zukünftigen Steuerbelastung zu entgehen. Ist diese Tendenz stark genug, kann trotz einer Intensivierung der Nachfragesenkung der Klimawandel beschleunigt werden, was als grünes Paradoxon bezeichnet wird. Anders als bei einer statischen Betrachtungsweise hängt der Angebotspfad nicht von der Höhe der Steuer ab, sondern von ihrer Veränderung im Zeitverlauf.

### 2.5.2 Formale und graphische Erläuterung des grünen Paradoxons<sup>39</sup>

Was genau eine Steuererhebung verursacht und inwieweit sie klimaneutral sein kann, wird im Folgenden eruiert.

Geht man von einer Steuer  $\tau^*$  auf Gewinne der Ressourcenbesitzer aus, so belaufen sich die Steuereinnahmen auf  $\tau^*Z$  mit  $Z$  als Bemessungsgrundlage:  $Z \equiv (P - g(S))R$ . Sei  $\theta^* \equiv 1 - \tau^*$  per definitionem. Die konstante Gewinnsteuer, bei Sinn (2008b) auch als „Cash flow tax“ bezeichnet, ändert den Extraktionspfad nicht, da sie eine Belastung über die Zeit darstellt, die das Optimierungskalkül der Anbieter nicht berührt.<sup>40</sup>

Im nächsten Schritt wird eine Wertsteuer betrachtet.  $\tau$  ist nun der Steuersatz auf den Konsumentenpreis  $P$ , womit ein Steuerkeil zwischen Konsumenten- und Produzentenpreis getrieben wird. Letzterer beträgt unter Zuhilfenahme obiger Definition,  $\theta \equiv 1 - \tau$ ,  $\underline{P} = \theta P$ . Eine Ad-valorem-Steuer auf den Verkaufspreis wäre schwer einzuführen und wird deshalb nicht in die Analyse miteinbezogen. Es wären allerdings die gleichen Effekte wie bei einer Konsumentensteuer zu beobachten. Ohne Extraktionskosten hat die Wertsteuer den gleichen Effekt wie die Gewinnsteuer, denn in diesem Fall sind die Steuern äquivalent. Der einzige Effekt äußert sich darin, dass die Gewinne von den Besitzern an den Staat umverteilt werden. Der Abbaupfad bleibt jedoch unverändert.

Bei Vorliegen von Extraktionskosten ist diese Art der Steuer nicht mehr neutral. Um formal ihre Wirkung herauszuarbeiten, wird das Maximierungskalkül der Ressourcenbesitzer

---

<sup>39</sup> Sinn (2008a), S. 29-33 und Sinn (2008b), S. 377-382. Von Zeitindices wird abgesehen.

<sup>40</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 377. Herleitung im Anhang, S. 56. Ein konstanter Wert für  $\theta^*$  spielt bei der Gewinnmaximierung in  $t$  keine Rolle, da die Gewinnmaximierung als statisches Problem in jeder Periode erfasst werden kann.



$\max \Pi = \theta PR - g(S)R$  zur äquivalenten Gleichung  $\Pi = PR - \frac{g(S)R}{\theta}$  umgeformt. Gleichung (11)

wird im Lichte der Steuereinführung zu

$$i + \pi = \frac{\dot{P}}{(P - g(S)/\theta)} \quad (16)$$

Eine Wertsteuer wirkt, da  $\theta < 1$ , wie eine Erhöhung der Extraktionskosten. Bei exogen gegebenen Werten für  $i$ ,  $\pi$  und  $P$ , impliziert Gleichung (16) ein geringeres Preiswachstum  $\dot{P}$  nach der Steuereinführung. Das wiederum hat zur Folge, dass der Abbaupfad flacher wird (vgl. Graphik 4) und die Extraktion zugunsten des heutigen Klimas in zukünftige Perioden verschoben wird, verglichen mit dem Fall ohne Steuern.

Diese punktuelle Betrachtungsweise muss um eine intertemporale Komponente erweitert werden. Dafür nimmt Sinn (2008b) an, dass eine potentielle Gewinnsteuer im Zeitverlauf wächst, sodass

$$\theta^*(t) = \theta^*(0) e^{\hat{\theta}^* t} \quad (17)$$

mit  $\hat{\theta}^*$  als konstantem Parameter. Ressourcenbesitzer maximieren wiederum den Barwert ihrer Gewinne zu jedem Zeitpunkt. Im Optimum verwenden sie nun die Diskontrate  $i + \pi - \hat{\theta}^*$  anstatt nur  $i + \pi$ .

$$i + \pi - \hat{\theta}^* = \frac{\dot{P}}{(P - g(S))} \quad (18)$$

Mit einem ansteigenden Steuersatz  $\tau^*$  – was ein fallendes  $\theta^*$  und somit  $\hat{\theta}^* < 0$  zur Folge hat – wird  $\dot{P}$  bei ansonsten konstant anzunehmenden Parametern und Variablen ansteigen, was einen steileren Extraktionspfad impliziert.

Bei einer Ad-valorem-Steuer, die immer weiter verschärft wird, kristallisieren sich zwei Effekte mit entgegengesetzter Wirkung heraus: Die Wirkung einer Erhöhung der Extraktionskosten verlangsamt den Klimawandel, während eine im Zeitverlauf forcierte Steuer den Klimawandel beschleunigt. Für den Fall einer neutralen Steuer – bei der sich die beiden Effekte ausgleichen – muss die Wachstumsrate des Steuersatzes bzw. des relativen Preiskeils  $\hat{\tau}$  gleich dem Produkt der anzusetzenden Diskontrate mit dem relativen Kostenanteil der Ressourcenförderung am Umsatz sein:

$$\hat{\tau} = \frac{(i + \pi)g(S)}{P(R, t)} \quad (19)$$

<sup>41</sup> Herleitung im Anhang, S. 56.

<sup>42</sup> Herleitung im Anhang S. 56.

wobei, wie bereits bekannt, die Extraktionskosten pro Einheit  $R$  vom Restbestand in situ abhängen und der Preis eine Funktion des Abbaustroms  $R$  ( $R$  als Menge vor einer Änderung des Abbaupfades)<sup>43</sup> und der Zeit  $t$  ist. Liegen keine Extraktionskosten vor, so ist eine zeitinvariante Steuer optimal. Wird Gleichung (19) verletzt, indem  $\hat{t} > \frac{(i + \pi)g(S)}{P(R, t)}$ , so forciert man den Klimawandel, obwohl mit der erhobenen Steuer genau das Gegenteil beabsichtigt wird. Dieser Sachverhalt wird – hier nochmals deutlich erwähnt - als „grünes Paradoxon“ bezeichnet.

Erläutert man die Intuition des grünen Paradoxons graphisch, bildet Gleichung (19) den Ausgangspunkt: Im Falle einer Verletzung der beschriebenen Neutralitätsbedingung erhöht sich das Preiswachstum  $\dot{P}$ . (Siehe auch Gleichung (18) bei einer Gewinnsteuer: Wenn  $\hat{\theta}^*$  in absoluten Beträgen gemessen zu niedrig ist und das Steuerwachstum demnach zu hoch ausfällt, steigt  $\dot{P}$  bei Konstanz aller anderen Variablen.)

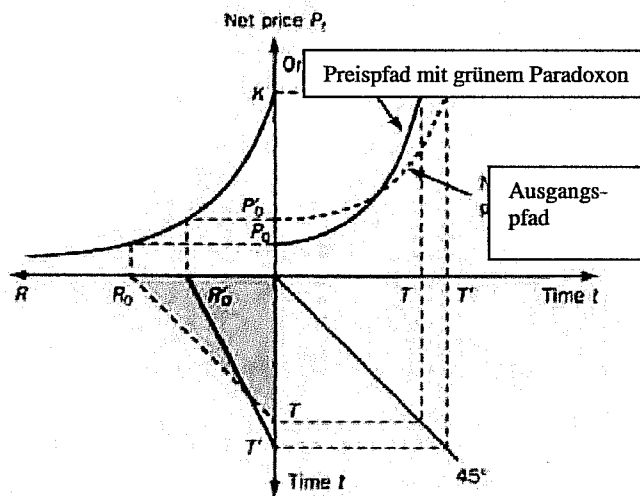


Abbildung 5: Änderung des Preiswachstumspfades

Somit wird der Preisfad steiler, wie in Abbildung 5 im rechten oberen Quadranten dargestellt. Bei gleichbleibender Nachfrage impliziert das wiederum einen steileren Extraktionspfad  $R_0$  im dritten Quadranten. „Steiler“ heißt in diesem Fall, dass zum Anfangszeitpunkt ein höherer Ressourcenabbau stattfindet ( $R_0$  schneidet die Abszisse bei einem höheren Wert als  $R'_0$ ) und dass der Bestand  $S$  schon zu einem früheren Zeitpunkt vollständig extrahiert wird. Dieser Sachverhalt ist am Schnittpunkt von  $R_0$  mit der Zeitachse zu erkennen, der unterhalb des Schnittpunktes von  $R'_0$

<sup>43</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 32.

mit der Ordinate liegt. Durch die erhobene Steuer wird die Ressource schneller abgebaut als ohne grüne Politik. Der Klimawandel verschärft sich, wie bereits formal erläutert.

### 2.5.3 Populäre Politikmaßnahmen im Lichte des grünen Paradoxons<sup>44</sup>

Um das grüne Paradoxon zu umgehen, müsste die Politik glaubhaft versichern, ihre Nachfrageeinschränkung nicht weiter zu forcieren. Staaten haben jedoch meist die gegenteilige Absicht, was bedeutet, dass sich das grüne Paradoxon auch dann ergeben könnte, wenn Extraktionskosten vorliegen.<sup>45</sup> Die Beispiele immer grüner werdender Politik<sup>46</sup> beschränken sich keinesfalls nur auf die Besteuerung des Kohlenstoffverbrauchs, sondern äußern sich in zahlreichen Nachfrage reduzierenden Programmen, wie der Förderung eines Emissionshandelssystems, Subventionierung von Biosprit, Windkraft, Photovoltaik etc. Zudem befürchten die Ressourcenanbieter die Ausweitung internationaler Umweltabkommen, die, falls sie verbindlich gelten, zu einer künftigen globalen Nachfrageminderung führen. All diese Maßnahmen können bei Vorliegen des grünen Paradoxons zu einer Verschärfung des Klimawandels führen.

Als Beispiel immer grüner werdender Politik soll eines der ambitionierten Projekte der EU näher beleuchtet werden: das Emissionshandelssystem, das durch eine Mengensteuerung bzw. Mengenfizierung sicherzustellen versucht, dass die Nachfrage das Angebot dominiert. Ausgangspunkt der Widerlegung dieser These ist Abbildung 6.

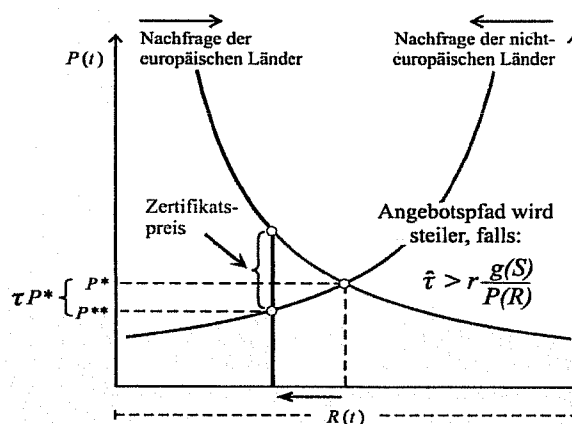


Abbildung 6: Emissionshandel und gehandelte Ressourcenmenge zum Zeitpunkt  $t$

<sup>44</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 34-38.

<sup>45</sup> Vgl. Gleichung (19), wenn  $\hat{\tau} > \frac{(i + \pi)g(S)}{P(R, t)}$

<sup>46</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 34.

Die Abbildung zeigt für eine gegebene Periode  $t$  das auf den Markt geworfene (hier ohne intertemporale Dynamik) fixe Angebot  $R(t)$  an erschöpfbaren fossilen Brennstoffen. Die spezifische inverse Nachfrage der „grünen“ europäischen Länder wird von links nach rechts – mit dem Preis  $P(t)$  in Abhängigkeit der nachgefragten Menge  $R(t)$  – abgetragen. Die Nachfragekurve aller nicht-europäischen Länder, die sich dem EU-ETS<sup>47</sup> nicht verpflichtet haben, ist von rechts nach links in der Graphik abgetragen.

Die Breite des Diagramms zeigt die Extraktionsmenge, die am Weltmarkt ohne politische Maßnahmen in  $t$  realisiert worden wäre. Mit Einführung des Emissionshandels wird die nachgefragte Menge in der EU beschränkt, was durch den senkrechten Ast der linken Nachfragekurve veranschaulicht wird. Dies zieht eine Senkung des Weltmarktpreises von  $P^*$  auf  $P^{**}$  nach sich. Durch den Preisverfall nehmen nun alle nicht-europäischen Staaten diejenige Menge an Rohstoffen ab, welche die EU weniger kauft. Die Anzahl der in Europa gehandelten Zertifikate spielt global keine Rolle, da das fixe Angebot  $R(t)$  auf dem Weltmarkt vollständig verkauft wird, mit und ohne politische Intervention. Die EU-Länder stellen sich im neuen Gleichgewicht sogar schlechter, da sie für eine Einheit  $R$   $P^{**}$  zuzüglich des Zertifikatepreises zahlen, was den ursprünglichen Preis  $P^*$  übersteigt.

Soweit zur statischen einperiodischen Betrachtung. Wirklich relevant ist intertemporal betrachtet, wie sich der Zeitpfad des Weltmarktpreises entwickelt, der eng mit dem Zeitpfad des absoluten Preiskeils  $\tau P^*$  verknüpft ist. Denn ein zukünftiger Preisverfall gibt den Anbietern Anreize ihre Extraktion heute statt in Zukunft stattfinden zu lassen. Für jede Periode ergibt sich ein wie in Abbildung 6 dargestellter Preiskeil. Wird die grüne Politik, sprich die Nachfrageminderung, mit fortschreitender Zeit verschärft, wird der Preiskeil im Zeitverlauf größer und es ergibt sich möglicherweise das grüne Paradoxon. Der Abbaupfad wird steiler, wenn der relative Preiskeil  $\tau$  mit einer zu hohen Rate wächst (siehe Gleichung (19)). Der Klimawandel wird dann gerade durch eine kontinuierliche Verschärfung des ETS beschleunigt. Bei Sinn (2008a) wird diese theoretische Möglichkeit als sehr wahrscheinliches Szenario angenommen. Das liegt unter anderem an den Ankündigungen der EU, das Reduktionsziel für den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von 8% gegenüber dem Basisjahr von 1990, welches bis 2012 beschlossen wurde, auf 20% auszuweiten. Das grüne Paradoxon ist *eine* mögliche Erklärung, warum diese ambitionierte Politik kein Abfallen in der Kurve des globalen  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes (Abbildung 1) hervorgerufen hat.

---

<sup>47</sup> ETS = Emission Trading System (Emissionshandelssystem)

## 2.6 Modellkritik

Die Modellkritik soll im folgenden Abschnitt vor allem dazu beitragen, Schwächen und Unvollkommenheiten des Sinn'schen Modells aufzudecken. Die Kernthese der angeführten Kritiker ist, dass manche Annahme im Modell des grünen Paradoxons zu restriktiv gehandhabt wird. Zwar kann die Stärke des grünen Paradoxons darin gesehen werden, dass es einen plausiblen Nebeneffekt grüner Politik entlarvt, doch scheint es mit einem von den komplexen realen Gegebenheiten abstrahierenden Partialmodell eher ein „Menetekel als eine Prognose“<sup>48</sup> zu sein. Vor allem Abschnitte 2.6.1 bis 2.6.5 gehen auf diese Problematik ein, indem die tatsächlichen Marktverhältnisse dem Modellansatz gegenüber gestellt werden. Abschnitte 2.6.6 bis 2.6.7 beinhalten dagegen theoretische Ergänzungen oder Kritikansätze am Modell.

### 2.6.1 Marktdeterminanten hinsichtlich Ressourcen und Reserven<sup>49</sup>

Um die herrschenden Marktverhältnisse bei fossilen Energieträgern zu charakterisieren, muss eine Unterscheidung zwischen Ressourcen und Reserven getroffen werden. Reserven sind diejenigen fossilen Brennstoffe in den Lagerstätten, die bei den aktuellen Brennstoffpreisen profitabel unter Einbezug der heutigen technischen Förderungsmöglichkeiten abgebaut werden können. Dagegen sind beim Ressourcenabbau höhere Preise oder eine bessere Technologie erforderlich, um als Anbieter rentabel zu wirtschaften. Des Weiteren sind die Investitionen für die Entdeckung und Erschließung neuer Ölfelder beträchtlich, wohingegen die variablen Extraktionskosten bei der Förderung des Brennstoffs unbedeutend sind. Nun liegt bei Reserven die Entdeckung und Erschließung in der Vergangenheit und die getätigten Investitionen gelten als versunkene Kosten. Die Kredite für diese Investitionen müssen mit den Gewinnen aus der Extraktion abgezahlt werden, unabhängig von den klimapolitischen Entscheidungen einzelner Länder. Beim Ressourcenabbau liegen Entdeckung und Erschließung noch in der Zukunft, hier könnten demnach politische Komponenten ins Spiel kommen. Allerdings bestehen die Probleme der Anbieter primär in unsicheren Eigentumsrechten und in Forschungs- und Entwicklungsausgaben für eine kostengünstigere Extraktion.

Ob eine Ressource erschlossen wird, hängt wie im Modell propagiert von den gerade genannten Faktoren und den Kapitalopportunitätskosten ab. Eine CO<sub>2</sub>-Steuer verändert die relativen Preise

---

<sup>48</sup> Tol, Anthoff (2009), S. 146.

<sup>49</sup> Vgl. Tol, Anthoff (2009), S. 111-113.

zwischen fossilen Brennstoffen und anderen Energieträgern: Vor allem erneuerbare Energien und die Kernenergie profitieren von dieser Politikmaßnahme. Daher nehmen Tol und Anthoff (2009) unter Beachtung einer weiteren Prämisse von Skaleneffekten im Energiebereich an, dass die Steuer durch verstärkte Nutzung alternativer Energieträger zu einer Emissionsreduktion führen kann – was wiederum dem grünen Paradoxon widerspricht.

Der Hauptkritikpunkt an Sinns Modell ist allerdings wie bereits erwähnt, dass weder zwischen fixen und variablen Kosten, noch zwischen versunkenen und Mehrkosten unterschieden wird. Dazu kommt, dass nicht zwischen Reserven und Ressourcen differenziert wird. Zur Verteidigung lässt sich jedoch sagen, dass Reserven nur ein minimales Problem für den Klimawandel darstellen, da die Verbrennung aller Reserven im Vergleich zur potentiellen Ressourcenverwertung wenig Treibhausgas freisetzt.

### 2.6.2 Back-Stop-Ressourcen<sup>50</sup>

In den Modellprämissen des grünen Paradoxons wird in der Tat angenommen, dass es keine perfekten Substitute für fossile Brennstoffe gibt. Auch Biokraftstoffe können Öl, Kohle und Gas nur unvollständig ersetzen, da die Flächen für den benötigten Anbau (z.B. für Raps) begrenzt sind. Die erneuerbaren Energien weisen ebenfalls noch keine Konstanz in Bezug auf ein dauerhaftes Energieangebot, frei von externen Umweltabhängigkeiten, auf. Daher ist es richtig, dass es zum heutigen Zeitpunkt noch keine perfekten Substitute gibt. Doch bei dieser starren Annahme werden künftige Innovationen, wie z.B. die Herstellung synthetischer Brennstoffe oder akkurate Energiespeicher für elektrische Energie<sup>51</sup>, vollständig ausgeblendet. Falls es in Zukunft gute Substitute bzw. Back-Stop-Ressourcen<sup>52</sup> geben sollte, wird der Ressourcenbestand  $S$  aus wirtschaftlichen Gründen nicht vollständig gefördert werden, wenn die Herstellung der Alternativen billiger als die Förderkosten fossiler Energieträger ist. Bei Existenz einer Back-Stop-Technologie wäre somit eine Preisobergrenze für erschöpfbare Ressourcen gegeben und der Preiswachstumspfad stagniert beim Preis des Substituts.<sup>53</sup>

Weiter sollte bei den Abbaupfaden verschiedener Ressourcen auch berücksichtigt werden, inwieweit die fossilen Brennstoffe sich gegenseitig substituieren können. Der seit 2001 steigende

---

<sup>50</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 117 ff.

<sup>51</sup> Der Spiegel (2011), S. 78.

<sup>52</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 142. Eine Back-Stop-Ressource ist eine Energiequelle sowie perfektes Substitut und kann im Gegensatz zu erschöpfbaren Ressourcen zu konstanten oder fallenden Grenzkosten angeboten werden (Van der Ploeg, Withagen (2010), S. 1).

<sup>53</sup> Siehe Anhang, S. 59, Abbildung i.

Öl- und (der an den Ölpreis gekoppelte<sup>54</sup>) Gaspreis hat die Kohleintensivierung wieder rentabel gemacht.<sup>55</sup> Der hohe Ölpreis hat zwar Lagerstätten hoher Förderkosten wirtschaftlich gemacht, doch im Gegenzug wurde in China und in den USA in die Verflüssigung von Kohle investiert, um von den Ölimporten aus dem Nahen und Mittleren Osten unabhängig zu werden. Dazu kommt, dass ein drastischer Einbruch des Ölpreises in mittlerer Zukunft nicht wahrscheinlich erscheint, was die Verwendung von Kohle rentabel macht. Damit setzt Kohle eine implizite Preisobergrenze für Öl und Gas und fungiert ebenfalls als Back-Stop-Ressource<sup>56</sup>, was einen erheblichen Einfluss auf den Abbau teuer zu erschließender Ölquellen hat. Tatsächlich kann argumentiert werden, dass nicht der ganze Bestand an Erdöl gefördert werden muss. Kohlevorkommen übersteigen die Ölvorkommen allerdings um ein Vielfaches. Stein- und Braunkohlevorkommen verteilen sich auf die USA, Europa, Russland, China und Indien – Länder mit unterschiedlichen politischen Profilen. Im Modell des grünen Paradoxons sollte zwischen verschiedenen Arten fossiler Brennstoffe noch stärker unterschieden werden - auch in Anbetracht dessen, dass China, Russland und Indien versuchen könnten, ihre Kohle schneller zu nutzen, wenn die Europäer eine forcierte Klimapolitik betreiben.<sup>57</sup> Das aus der Angebotsseite resultierende Problem der immer schnelleren Erderwärmung ist auch auf andere Länder auszudehnen, vor allem wenn man bedenkt, dass Kohle eine noch „schmutzigere“ Energiequelle als Öl und Gas ist.<sup>58</sup>

### 2.6.3 Externalitäten aus F&E bei erneuerbaren Technologien<sup>59</sup>

Dass es keine perfekten Substitute für fossile Energieträger gibt, die als Back-Stop-Technologie fungieren, ist eine Behauptung in Sinns Modell, die aktuell zutrifft. Die Konsequenz des grünen Paradoxons, z.B. die Investitionen in erneuerbare Energien nicht übermäßig anzukurbeln, lässt einen übersehen, dass Wind- oder Sonnenenergie „lernende Technologien“<sup>60</sup> sind. Erstens kann ihre Nutzung und Energieeffizienz durch vermehrte Forschung ausgebaut werden.<sup>61</sup> Zum zweiten verringern sich die Kosten bei Ausbau und Weiterentwicklungen. Diese Kostenreduktionen

---

<sup>54</sup> Vgl. Strom Magazin (2011).

<sup>55</sup> Vgl. Van der Ploeg, Withagen (2010), S. 4. Die Kohleverwendung ist erst ab einem bestimmten Ölpreis rentabel, da Kohle zunächst verflüssigt werden muss, um Öl zu substituieren, was zu den (eher geringen) Kohleabbaukosten hinzugerechnet werden muss.

<sup>56</sup> Vgl. Van der Ploeg, Withagen (2010), S. 4. Da die Kohlereserven sich in absehbarer Zukunft nicht erschöpfen, kann diese Energiequelle als potentielle Back-Stop-Ressource bzw. als Ölsubstitut angesehen werden.

<sup>57</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 125.

<sup>58</sup> Vgl. Van der Ploeg, Withagen (2010), S. 2. Der bei Öl und Gas auf 1 standardisierte „Emission ratio“  $\psi$  zeigt, wie umweltschädlich eine Back-Stop-Technologie im Vergleich zu Öl / Gas ist.  $\psi$  für Kohle ist größer als 1. Kohle ist daher eine noch umweltschädlichere Ressource als Öl / Gas.

<sup>59</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 142-143.

<sup>60</sup> Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 142.

<sup>61</sup> Vgl. Kemfert (2009), S. 155.

findet nicht nur auf dem heimischen Markt statt, vielmehr werden erneuerbare Energien durch die in Deutschland oder Europa getätigten Investitionen auch für Schwellenländer billiger. Je mehr in den vermeintlich grünen Ländern in erneuerbare Technologien investiert wird, desto schneller sinken die Kosten des Klimaschutzes für Länder, die nicht bereit sind, die Investitionen zu tätigen. Daher ist es sinnvoll Wind-, Wasser- und Solarenergie zu fördern, um mit dieser positiven Externalität ein globales Klimaabkommen voranzutreiben bzw. die Vermeidungskosten von Treibhausgasemissionen zu senken.

#### 2.6.4 Unsichere Erwartungen<sup>62</sup>

In Sinns Modell ist das Risiko der Anbieter (losgelöst von den politischen Risiken, welchen Ölscheichs in ihren Ländern unterliegen) der unsicheren Nachfrage vor allem europäischer Staaten zu verdanken. Da eine künftig verminderte Nachfrage den Verkauf von Öl, Kohle und Gas unsicherer macht, werden die Ressourcenbesitzer eher heute als morgen extrahieren. Allerdings können der Bestand an fossilen Brennstoffen, die Extraktionskosten wie auch die Nachfrageentwicklung auch ohne die Unsicherheit grüner Politik langfristig kaum abgeschätzt werden. Es gibt für den Ölhandel z.B. keine Forwardmärkte, auf denen sich die Anbieter und Nachfrager absichern könnten. Weiter folgt der Ölpreis nicht der vorhergesagten Entwicklung im Modell. Er schwankt und schwankte im Zeitverlauf sehr stark und weist über einen großen Zeitraum keine exponentielle Entwicklung auf, vor allem wenn der reale inflationsbereinigte Preis betrachtet wird (rote Linie). Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, ändert sich der Ölpreis besonders bei politischen Ereignissen und folgt somit einem volatilen Zeitpfad statt gleichmäßig in Höhe der Kapitalmarktrendite zu wachsen.<sup>63</sup>

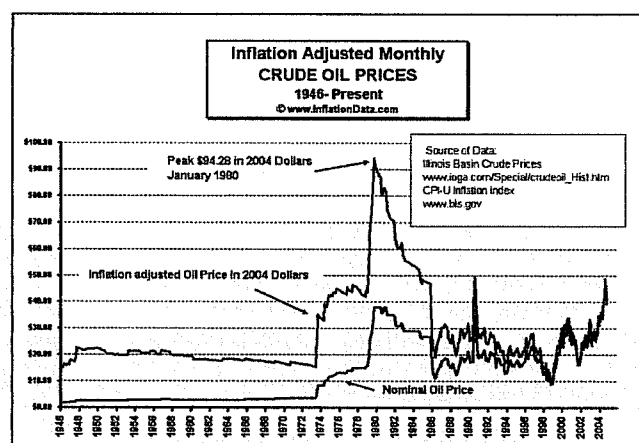


Abbildung 7: Ölpreisentwicklung

<sup>62</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 127.

<sup>63</sup> Vgl. Dasgupta, Heal (1979), S. 440-448.



Die Erwartungsbildung auf Ressourcen- und Kapitalmärkten hat jedoch große Auswirkungen auf die Investitionen in die Exploration neuer Ölquellen. Beispielhaft kann hier der Sachverhalt zu Rate gezogen werden, als Libyens Präsident Gaddafi im Lande operierende ausländische Firmen bedrohte und diese als Reaktion die Extraktionsraten erhöhten. Daran kann gezeigt werden, dass steigende externe Risiken zu einer beschleunigten Exploration der Ölfelder führen.<sup>64</sup> Dieser Tatbestand müsste im Modell des grünen Paradoxons ergänzt werden, denn ansonsten würde der Anschein erweckt, dass jede Erhöhung der Extraktionsgeschwindigkeit allein auf die Umweltpolitik der EU zurückgeführt werden kann. Politische Eruptionen und umweltpolitische Effekte müssen voneinander unterschieden werden.

### 2.6.5 Kippelemente<sup>65</sup>

Ein Sachverhalt, der eng mit der Erwartungshaltung der Marktteilnehmer verbunden ist, sind Erwartungen hinsichtlich der Kippelemente im Ökosystem. Solche Kippelemente führen zu schlagartigen Änderungen in der Natur zu Lasten eines funktionierenden Systems. Wenn die durch die Treibhausgasemissionen verursachten Schäden sprunghaft ansteigen, kann das eine Versiegelung der Böden rechtfertigen. Das ist der Fall, wenn die zusätzlichen Schäden den Grenznutzen des Schadstoffausstoßes übersteigen.

Heute werden solche Schäden und Vorteile mit Hilfe von Kosten-Nutzen-Analysen gegeneinander aufgewogen. Doch die Schäden, wie z.B. die Versauerung der Ozeane (d.h. ab einem gewissen Punkt können die Meere kein weiteres CO<sub>2</sub> aufnehmen und als Puffer dienen), können nur schwer in eine Schadensfunktion integriert werden, da sie zum einen monetär nicht einfach zu bewerten sind und zum zweiten genaue Schwellenwerte von Kippelementen nicht bekannt sind. Nun kommt es darauf an mit welchem Gewicht die Ressourcenanbieter solche ökologischen Vorfälle bewerten. Je mehr sich das Ökosystem den erwarteten Schwellenwerten des Kippelements nähert, desto stärker müssen die Befürchtungen vor einer Bodenversiegelung, d.h. einem erzwungenen Verzicht auf weitere Extraktion, sein. Folglich würde auch die Extraktionsgeschwindigkeit steigen - und das nicht wegen der unsicheren Umweltpolitik Europas, sondern aufgrund der Tatsache, dass die Gewinne aus dem Ressourcenverkauf die Schäden der Treibhausgase nicht mehr kompensieren können.

---

<sup>64</sup> Vgl. Dasgupta, Heal (1979), S.449.

<sup>65</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 18 ff.

## 2.6.6 Einfluss anderer Marktformen<sup>66</sup>

Das in Abschnitt 2.5 vorgestellte Modell des grünen Paradoxons differenziert nicht zwischen verschiedenen Marktformen, welche die Angebotsseite aufweisen kann. Das grüne Paradoxon nimmt vor allem die Ölscheichs und Potentaten im Nahen und Mittleren Osten ins Visier. Die OPEC, welche einen großen Teil dieser Staaten abdeckt, drei Viertel der weltweiten Ölreserven besitzt, agiert keinesfalls – wie in den vorangegangenen Modellen unterschwellig unterstellt – auf einem Markt perfekten Wettbewerbs, sondern als Kartell.<sup>67</sup> Der Unterschied, der zwischen einem „Quasi“-Monopol und perfekter Konkurrenz gemacht werden muss, lässt sich am besten graphisch anhand von Abbildung 8 erklären. Zunächst einige Vorbemerkungen. Ein Monopol – oder auch ein (stabiles) Kartell, das monopolähnlich agiert – maximiert seinen Gewinn im Zeitverlauf, genau wie ein Wettbewerber unter vollständiger Konkurrenz. Der Monopolist kann jedoch seinen Verkaufspreis frei bestimmen. Im Optimum des Monopolisten sei der Grenzertrag gleich den Grenzkosten. Der Grenzertrag liegt hierbei unterhalb des Preises, da der alleinige Anbieter auch die marginale Preissenkung bzw. den Preisverfall bei einer Mengenausdehnung um eine Einheit berücksichtigen muss. Wie schon bei vollständiger Konkurrenz muss der Grenzertrag mit dem Kapitalmarktzins  $i$  wachsen, um den Gewinn über den Zeitverlauf zu maximieren.<sup>68</sup>

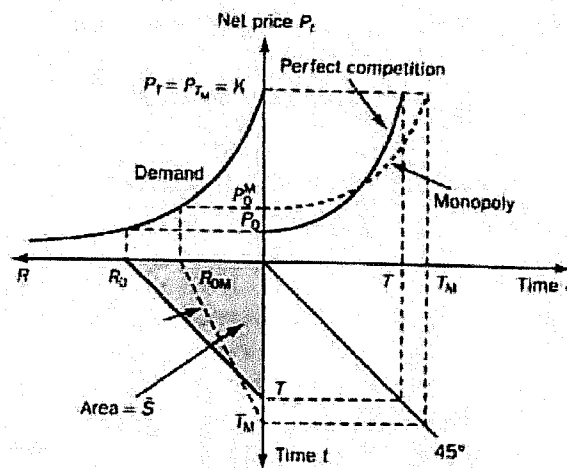


Abbildung 8: Optimaler Ressourcenabbau beim Monopolisten

Wenn diese Bedingungen in das Preiswachstum integriert werden, sieht man, dass der Monopolist aufgrund des Effektes des Preisverfalls durch eine Mengenausdehnung im Optimum einen

<sup>66</sup> Vgl. Perman, Ma, McGilvray, Common (2003), S. 518-520.

<sup>67</sup> Vgl. Libyen.com (2003).

<sup>68</sup> Formale Erläuterung im Anhang, S. 57.

flacheren Preiswachstumspfad  $P^M$  (erster Quadrant) als unter vollständiger Konkurrenz,  $P$ , wählt. Dies führt zu einem flacheren Extraktionspfad  $R_{OM}$  im linken unteren Quadranten, d.h. Extraktion findet vermehrt zu zukünftigen Zeitpunkten statt ( $T_M > T$ ). Um jedoch den gesamten Bestand  $S$  bis zum Zeitpunkt  $T_M$  optimal in Bezug auf den möglichen Gewinn zu verkaufen, muss der Anfangspreis des Monopolisten  $P_0^M$  höher als bei perfektem Wettbewerb (hier liegt der Anfangspreis bei  $P_0$ ) sein, da das Preiswachstum langsamer bis zum Choke-Price vor sich geht. Dadurch schneiden sich beide Kurven. Des Weiteren wird unabhängig von der Marktform der Gesamtbestand  $S$  gefördert: Die Flächen bei beiden Extraktionspfaden im dritten Quadranten haben den gleichen Inhalt, der die gesamte Fördermenge im Extraktionszeitraum darstellt. Wenn Sinn sich daher speziell auf Förderstaaten der OPEC und allgemein auf einen Ressourcenmarkt ohne kompetitive Charakteristik bezieht, sollte er monopolistische oder zumindest oligopolistische Modellansätze und nicht nur unsichere Eigentumsrechte miteinbeziehen. Denn diese Marktformen haben den entscheidenden klimarelevanten Vorteil, dass die Extraktion eher in der Zukunft stattfindet und die Erderwärmung vergleichsweise langsamer vor sich geht. Selbstverständlich gilt die angeführte Kritik auch für die Hotelling-Regel.

### 2.6.7 Ethische Rechtfertigung des Diskontfaktors

Der Kritikpunkt, dass die Zeitpräferenzrate bei Kosten-Nutzen-Analysen für Volkswirtschaften willkürlich gewählt ist, ist keine spezielle Kritik an den vorgestellten Modellen von Solow, Stiglitz und Sinn, sondern eine Fragwürdigkeit in Bezug auf alle intertemporalen Entscheidungskalküle des Utilitarismus. Es bleibt zu bezweifeln, ob der Nutzen künftiger Generationen weniger Wert ist als derjenige der heutigen Gesellschaft.<sup>69</sup> Natürlich gäbe es einige Probleme ohne Zeitpräferenzrate: Durch den technologischen Fortschritt wäre es ohne Zeitpräferenz optimal, dass die heutige Generation das gesamte Kapital für künftige anspart, da die Grenzproduktivität des Kapitals zu späteren Zeitpunkten höher ist. Zudem wird rein deskriptiv festgestellt, dass Individuen künftigen Nutzen weniger Gewicht geben als dem gegenwärtigen. Ohne Diskontierung würde dieser Sachverhalt nicht berücksichtigt.

Dennoch gibt es vor allem ethische Probleme bei der Festsetzung des genauen Wertes der Zeitpräferenzrate. Denn im gesellschaftlichen Optimum hat diese direkte Auswirkung auf den optimalen Extraktionspfad erschöpfbarer Ressourcen. Je niedriger die Gewichtung künftiger Nutzen, desto stärker fallen Schäden zu anderen Zeitpunkten schon gegenwärtig ins Gewicht und eine

---

<sup>69</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 369.

langsamere Extraktion der Ölfelder wird optimal. Sinn hält eine Zeitpräferenzrate, die auf den Marktzins zurückgeführt werden kann, für einzig normativ legitim. Dennoch muss eingesehen werden, dass Risiken mit einer kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit und einem großen Schadensausmaß – wie beispielsweise das Kippen eines Ökosystems – sehr geringe soziale Diskont-raten rechtfertigen können.<sup>70</sup>

---

<sup>70</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 118-119.

## Teil III

### 3. Diskussion von Politikmaßnahmen auf Basis des grünen Paradoxons

Im dritten Teil dieser Arbeit wird von einer rein theoretischen Analyse der Ressourcenextraktion abgesehen. Die sich direkt aus der Theorie ableitenden Politikmaßnahmen zu einer Entschleunigung des Klimawandels sowie eine Beurteilung hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit sollen im Zentrum der Betrachtung stehen. Der hier vorgestellte politische Handlungsbedarf wird bei Sinn (2008a) und Sinn (2008b) thematisiert und ergibt sich aus den Modellkomponenten des grünen Paradoxons. Wichtig ist, dass die Grundthese des Modells – die fehlende Wirksamkeit nachfragepolitischer Maßnahmen – vorausgesetzt wird. Die Funktionen einer CO<sub>2</sub>-Steuer bzw. Pigou-Steuer und auch eines Emissionshandels werden daher nicht erläutert. Die im Folgenden vorgeschlagenen Maßnahmen berücksichtigen die Angebotsseite des Ressourcenmarktes, wie auch die zeitliche Dimension, welche Ressourcenbesitzer in ihr Maximierungskalkül mit einbeziehen.<sup>71</sup> Zum zweiten wird dieser Teil durch Maßnahmenvorschläge zur Verbesserung von internationalen Umweltabkommen, wie auch durch technische Vorschläge zur CO<sub>2</sub>-Bindung oder Sequestrierung ergänzt. Jede der Politikimplikationen wird kurz dargestellt und anschließend kritisch hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit beurteilt.

#### 3.1 Sicherung der Eigentumsrechte<sup>72</sup>

Um die Anreize für Ressourcenbesitzer zu erhöhen, die fossilen Brennstoffe in den Lagerstätten zu lassen, ist die Stärkung ihrer Eigentumsrechte förderlich. Deshalb kann sich die Unterstützung der Demokratisierungsbewegung in den arabischen Ländern in Hinblick auf langfristig stabile Regierungen und somit auf sichere Eigentumsrechte als hilfreich erweisen. Denn die Angst vor Enteignung und Machtabtretung lässt die Potentaten die Extraktion in die Gegenwart verlagern, da der Wertanstieg der Ressourcen in situ zusätzlich zur Kapitalanlagemöglichkeit das politische Risiko des Machtverlustes kompensieren muss. Wie Gleichung (11) impliziert, würde eine Senkung des Enteignungsrisikos zu einem flacheren Extraktionspfad führen. Aber die Garantie solcher Eigentumsrechte ergibt sich nur als theoretische Alternative aus dem Modell. Praktisch umsetzbar ist die Maßnahme – außer in Form der erwähnten Unterstützung bei Demokratisierungs-

---

<sup>71</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 38-39.

<sup>72</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 38 ff und Sinn (2008b), S. 385.

bestrebungen - wohl kaum. Außerdem sei angemerkt, dass es nicht allein durch unsichere Eigentumsverhältnisse zu einer höheren Diskontrate als im sozialen Optimum kommt. Auch Kreditrationierung, allgemein unsichere Zukunftserwartungen und unzureichend funktionierende Zukunftsmärkte für Primärenergieträger können die Ursache für verfrühte Investitionen und Extraktion sein.<sup>73</sup>

### 3.2 Steuerpolitische Instrumente beim Verbrauch fossiler Brennstoffe<sup>74</sup>

Eine finanzpolitische Maßnahme, die den Abbaupfad der erschöpfbaren Ressourcen abflachen soll, ist die Einführung einer im Zeitverlauf sinkenden Wertsteuer auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe. Aber auch diese Alternative ist realitätsfremd, wenn man bedenkt, dass keine Regierung sich dazu verpflichten würde, eine Steuer mit der Zeit zu senken, vor allem angesichts der in Zukunft immer brisanter werdenden Erderwärmung.

Eine auf den ersten Blick besser umsetzbare Möglichkeit stellt eine Mengensteuer mit konstantem Satz auf den Verbrauch fossiler Energieträger dar. Da der Barwert einer konstanten Steuer im Zeitverlauf sinkt, werden die Ressourcenbesitzer die Förderung verlangsamen. Unter bestimmten Annahmen zeigt Sinn (2008a), dass solch eine Steuer sogar effizient sein kann: Wenn eine Einheit geförderter Kohlenstoff in allen Folgeperioden denselben Grenzscha-den  $b$  verursacht, dann ist der Barwert des Grenschadens bei gegebenem konstanten Zins  $i$  zu allen Zeitpunkten  $b/i$ . Damit könnte ein konstanter absoluter Steuerkeil  $b/i$  die negative Externalität des Treibhauseffekts, die aus einer zu schnellen Förderung entsteht, internalisieren.

Doch erstens ist der Grenzscha-den nicht konstant, sondern steigt im Zeitverlauf an, weil akkumuliertes  $\text{CO}_2$  zu einer weiteren Forcierung der Erderwärmung führt.<sup>75</sup> Die Berechnung eines Barwertes wäre hier sehr komplex, da zu jedem Zeitpunkt alle noch künftig ausstehenden Grenschäden berücksichtigt werden müssten, was praktisch nicht implementierbar ist. Zum zweiten besteht auch die Möglichkeit, dass der wachsende politische Druck angesichts der Erderwärmung den Steuersatz künftig steigen lässt. Das wiederum wird von den Anbietern heute unter Berücksichtigung einer gewissen Wahrscheinlichkeit antizipiert.

---

<sup>73</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 138.

<sup>74</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 38 ff und Sinn (2008b), S. 382-383.

<sup>75</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 38 ff.

### 3.3 Quellensteuer<sup>76</sup>

Eine andere Option, politisch in die Angebotsseite einzugreifen, ergibt sich direkt aus der Hotelling-Regel. Um die Extraktionsgeschwindigkeit zu verlangsamen, muss die Kapitalanlagemöglichkeit weniger attraktiv gestaltet werden. Durch eine Quellensteuer auf Kapitalerträge sollen Ressourcenbesitzer das Interesse verlieren, möglichst schnell zu extrahieren und ihre Gewinne dann am Kapitalmarkt anzulegen. Sieht man von unsicheren Eigentumsrechten ab ( $\pi=0$ ), kann Gleichung (8) bei einer Quellensteuer  $\tau_{it}$  zu

$$i_t(1 - \tau_{it}) = \frac{\dot{P}_t}{(P_t - g(S_t))} \quad (20)$$

erweitert werden. Das Pareto-Optimum wird erreicht, wenn die Steuer in jeder Periode den Treibhauseffekt internalisiert:

$$\tau_{it} = \frac{f_{St}}{i_t(P_t(R_t) - g(S_t))} \quad (21)$$

Um die Steuer erfolgreich umzusetzen, müssten sämtliche Steueroasen der Welt abgeschafft werden, was sich wiederum aufgrund der Schwierigkeit bei der Bildung von Abkommen zumindest bisher als unrealistisch erweist. Sinn (2008a) verteidigt diese Steuer zwar, da auch ein „falscher“ (gesellschaftlich nicht optimaler) Steuersatz stets in die „richtige“ Richtung wirkt, d.h. zu einer geringeren Abbaugeschwindigkeit führt. Das ist wohl richtig. Trotz dessen ist die Besteuerung von Kapital in der Regel zu gering, da jedes Land im nicht-kooperativen Gleichgewicht den Anreiz hat, den Steuersatz niedrig zu halten, um mehr Kapital zu attrahieren.<sup>78</sup> Diesen Sachverhalt zu ändern ist mit großer Schwierigkeit verbunden. Zwei weitere Argumente gegen eine Quellenbesteuerung liefern Edenhofer und Kalkuhl (2009), indem sie es für fraglich halten, ob eine Quellensteuer unter 100% die Einhaltung des Kohlenstoffbudgets garantieren kann: Die Möglichkeit zu hoher Extraktionsraten im Vergleich zum sozial optimalen Pfad wären auch auf diese Weise möglich. Dieser Einwand ist wichtig, wenn man von Kippelementen im Ökosystem ausgeht, bei denen ein CO<sub>2</sub>-Schwellenwert in der Atmosphäre nicht überschritten werden darf. Zusätzlich können Kapitaleinkommen der Ressourcenanbieter kaum mit einem anderen Steuersatz als das Kapital gewöhnlicher Anleger besteuert werden. Durch Schließung bestehender Steueroasen kann der Extraktionspfad lediglich abgeflacht werden. Gestaltungsspielräume, um die Steuer bezüglich des Klimawandels effizient zu gestalten sind unmöglich, denn eine starke

---

<sup>76</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 38 ff und Sinn (2008b), S. 384.

<sup>77</sup> Herleitung im Anhang, S. 58.

<sup>78</sup> Vgl. Haufler (2001), S. 1-6. In Folge des Steuerwettbewerbs wird zu wenig Steueraufkommen generiert, was zu einem „race to the bottom“ führen kann.

Steuererhöhung hätte auch immer den Effekt, gesamtwirtschaftliche Investitionen und damit das Wirtschaftswachstum zu bremsen.<sup>79</sup>

### 3.4 Subventionslösung

Eine weitere politische Alternative, die sich ebenfalls aus dem Sinn'schen Modell ergibt, versucht positive Externalitäten aus der Nichtförderung fossiler Brennstoffe durch Subventionierung der Ressourcen in den Lagerstätten zu internalisieren. Die Verlangsamung der Förderung dient den Ressourcenanbietern als Einnahmequelle von Subventionen. Dabei müssen die zahlenden Staaten die Subvention in geeigneter Höhe wählen, sodass der Vorteil aus einer Verlangsamung des Klimawandels gleich dem Nachteil aus den Zahlungen an die Ölbesitzer ist. Formal hieße das, dass nachfragende Länder den Ressourcenbesitzern Beträge in Höhe von  $f_3 S$  pro Periode zahlen, um ihre Ressourcen in situ zu halten. Diese Zahlungen führen zum effizienten Ergebnis und die negative Externalität wird internalisiert, da die normative Gleichung (14) durch die Subventionen erfüllt wird. Da  $f_3$  sowie auch  $S$  im Zeitverlauf variieren, wird eine für die Nachfrager vorteilhafte Zahlung real schwer berechenbar.<sup>80</sup> Doch wie auch die vorherigen Lösungen ist solch eine Option zwar effizient, aber politisch nicht vermittelbar, da Ressourcenbesitzer zusätzlich zu hohen Gewinnen Subventionen bekämen – die Rente also bei den Anbietern bliebe.<sup>81</sup>

### 3.5 Weltmonopson<sup>82</sup>

Um doch noch eine wirksame Politik gegen die Angebotsmacht der Ressourcenbesitzer zu finden, müsste eine Nachfragepolitik durchgesetzt werden, bei der alle Länder gemeinsam ein Emissionshandelssystem einführen und die Menge an geförderten Brennstoffen diktiert wird. Bei einem globalen Abkommen stellt sich das Problem eigennützigem Verhalten (der Emissionserhöhung bei gleichzeitigem Vermeiden grüner Länder) nicht partizipierender Länder nicht. Ein weltumspannendes Monopson könnte die heutigen Ressourcenbesitzer quasi enteignen, denn kein Industriezweig wäre in der Lage ohne Bezugsschein bzw. Zertifikat kohlenstoffhaltige Brennstoffe zu beziehen. Das Angebot jeder Periode würde durch die Anzahl an Zertifikaten festgelegt. Dadurch könnte die Gefahr des Klimawandels eher gebannt werden als mit einer Steuerlösung, mit der eine Mengensteuerung real immer schwierig ist. Auch ohne das Zertifika-

---

<sup>79</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 130.

<sup>80</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 383.

<sup>81</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 39.

<sup>82</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 42 und Sinn (2008b), S. 385-386.



tesystem hätte ein Monopson allgemein die für den Klimawandel angenehme Nebenwirkung, die Nachfrage einzuschränken und gleichzeitig den Produzentenpreis zu drücken. Durch den aufoktroyierten Preispfad der Nachfrager sollte sich zudem die Preissicherheit bei Energieträgern erhöhen.

Allerdings muss bei der Bildung eines Weltmonopsons beachtet werden, dass der Zusammenschluss so schnell vonstatten geht, dass Ressourcenanbieter keine Zeit haben, ihre restlichen Ressourcen noch vor dem Bündnis abzuverkaufen. Ansonsten würden die Ankündigung eines Super-Kyoto-Protokolls<sup>83</sup> gleich dem Alleingang der EU zu einem grünen Paradoxon führen. Wenn man die zähen globalen Verhandlungen zahlreicher Klimagipfel als Ausgangspunkt der Betrachtung nimmt, scheint ein schnell zustande kommendes Monopson aussichtslos. Die EU versucht im Alleingang klimapolitisch voranzuschreiten. Es scheint heute nicht der Fall zu sein, dass ihre Vorbildfunktion helfen könnte, andere Staaten ins Boot zu holen.<sup>84</sup> Zumal wird das Scheitern internationaler Abkommen auch theoretisch vorhergesagt, wenn die Anreize als Land eine Free-rider-Position einzunehmen stärker sind, als einer Allianz beizutreten.<sup>85</sup>

### *3.5.1 Kartellstabilisation*

Ein in sich stabiler globaler Emissionshandel stößt wie gezeigt an seine Grenzen der Umsetzbarkeit. Dennoch bildete die EU ihr eigenes Emissionshandelssystem und auch in den USA legen die neusten Entwicklungen nahe, dass ein Emissionshandel denkbar ist. Um ein globales Nachfragekartell unter Beteiligung aller Länder zu stabilisieren, kann beispielsweise Technologiepolitik mit der Klimafrage verknüpft werden. Dieses „Issue linkage“, vereinfacht vor allem Kooperationen, bei denen der Anreiz zu Free-riding sehr stark ist<sup>86</sup>. Konkret können sich Staaten, die einem Abkommen beipflichten, beschließen, dass die Nutzung der sauberen Technologien nur denen zugute kommt, die sich an der Emissionsminderung beteiligen. Wissen und Technologie sind öffentliche Güter mit positiven externen Effekten. Da viele Länder in der Free-rider-Position verharren, sind die Investitionen in diese öffentlichen Güter unabhängig vom Klimawandel stets zu niedrig. Einigen Ländern gelingt es jedoch vor allem in der Grundlagenforschung die Verbreitung neuer Erkenntnisse in Bann zu halten. Somit sind Voraussetzungen gegeben, dass die Nutzung der Forschungsergebnisse nur innerhalb des Abkommens bleibt. Der „Klimaclub“ käme speziell bei der Weiterentwicklung an erneuerbaren Energieträgern, Kohlen-

---

<sup>83</sup> Sinn (2008a), S. 42.

<sup>84</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 386.

<sup>85</sup> Vgl. Barrett (1994), S. 1 ff.

<sup>86</sup> Vgl. Carraro, Marchiori (2003), S. 1.

stoffabscheidung und –einlagerung sowie bei der Nuklearforschung in den Genuss der Technologienutzung. Um den Anreiz eines Beitrittes zu erhöhen, könnte die Klimagemeinschaft Zölle auf emissionsintensive Produkte erheben und damit nicht kooperierende Trittbrettfahrer bestrafen. Allgemein erhöht Issue linkage die Stabilität von Koalitionen, wie auch in spieltheoretischen Analysen gezeigt wird. In Anbetracht dessen scheint ein Bündnis der Nachfrageseite doch die eheste Chance, dem Klimawandel entgegenzuwirken. Es könnten beim Issue linkage viele Interessen miteinander verknüpft werden, wie der Klimaschutz und industrielle, technologische und wirtschaftliche Themen.<sup>87</sup>

### *3.6 CO<sub>2</sub>-Bindung und Sequestrierung*

Andere Möglichkeiten, den Klimawandel zu entschleunigen, betreffen die CO<sub>2</sub>-Elimination aus der Atmosphäre. Eine davon ist die Speicherung von CO<sub>2</sub> unter der Erde, auch Sequestrierung genannt. Die Option beinhaltet das bei Verbrennungsprozessen angefallene CO<sub>2</sub> mittels Pipelines zurück zu den unterirdischen ursprünglichen Lagerstätten zu leiten und unter hohem Druck flüssig zu speichern. So plausibel die Vorstellung klingt, zum einen ist sie sehr teuer, weil viel Energie zur Verflüssigung des Treibhausgases aufgewandt werden muss. Zum anderen übersteigt das Volumen des verflüssigten CO<sub>2</sub> das des verbrannten Kohlenwasserstoffs. Daher müssten zusätzlich weitere Lager erschlossen werden, was in siedlungsnahen Speichern erhebliche Gefahr für die Bevölkerung bedeuten würde: Jedes Leck wäre sehr gefährlich, da CO<sub>2</sub> schwerer als Sauerstoff ist. Dieses Risiko ergäbe sich auch für das maritime Leben bei einer Sequestrierung in der Tiefsee. In Anbetracht dieser Schwierigkeiten wird die Sequestrierung wohl nicht zum erhofften Klimaretter.<sup>88</sup>

Es sei jedoch angemerkt, dass mit Hilfe der Sequestrierung z.B. bei der Nutzung von Biomasse sogar negative Emissionen entstehen könnten. Die Energie aus Pflanzen ist grundsätzlich CO<sub>2</sub>-neutral, wenn man von gerodeten Waldflächen und fossilen Energieträgern beim Anbau und bei der Verarbeitung der Pflanzen absieht. Daher erzeugt jede Sequestrierung bei diesem Verfahren mit Biomasse negative Emissionen, die wichtig sein können, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre in Zukunft auf 440 ppm<sup>89</sup> zu stabilisieren.<sup>90</sup>

---

<sup>87</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 135-139.

<sup>88</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 43-44 und Sinn (2008b), S. 387.

<sup>89</sup> Einheit des Konzentrationsmaßes für Gase: ppm = parts per million.

<sup>90</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 140-141.

Eine andere Option, Treibhausgase aus der Atmosphäre zu entfernen, kann durch CO<sub>2</sub>-Bindung geschehen. Wälder tragen den größten Teil dazu bei, da Bäume den reduzierten Kohlenstoff speichern. Der Nettoverlust an Wald beträgt jährlich ca. 100.000 km<sup>2</sup>. Damit trägt die Waldrodung zu 18% der anthropogenen Treibhausemissionen bei. Sogar der Beitrag des weltweiten Verkehrs liegt unterhalb von 18%. Daher wäre eine Nettoaufforstung statt Abholzung ein signifikanter Beitrag zur Verringerung der Erderwärmung. Mittels politischer sowie ökonomischer Instrumente ist ein solches Unterfangen sehr schwierig, weil die Gründe für die Abholzung von Wäldern vielschichtig sind: Zwei wichtige Faktoren sind unsichere Eigentumsrechte an Waldflächen und die Entwicklungen auf Agrarmärkten (Waldrodung dient der Erschließung neuer Anbauflächen). Denn für Bauern wird es immer wirtschaftlicher neue Flächen für den Anbau von Bioethanol oder Biodiesel zu erschließen, vor allem in Anbetracht des schneller als die Preise für Getreide und Mais steigenden Ölpreises. Eine internationale Waldüberwachung ist kaum umsetzbar, da politische und institutionelle Voraussetzungen fehlen. Versuche, Wälder in ein internationales Emissionshandelssystem zu integrieren – die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wären hier relativ gering – scheitern an der Messbarkeit der Emissionen sowie an der Permanenz der vermiedenen Entwaldung.

Eine Alternative dazu besteht darin, einen internationalen Fonds für Waldschutzmaßnahmen einzurichten.<sup>91</sup> In kleinerem Umfang existieren private Fonds auch schon. Es gibt beispielsweise Programme, bei denen Aufforstung und Landwirtschaft auf der gleichen Anbaufläche kombiniert werden. Außerdem wird den betroffenen Bauern in Form von Mikrokrediten geholfen, ihre angebaute Ware zu vermarkten. Das Ziel ist, Bauern eine wirtschaftliche Perspektive zu geben und dies mit dem Klimaschutz kompatibel zu gestalten.<sup>92</sup>

---

<sup>91</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 139-140.

<sup>92</sup> Vgl. Umweltfinanz (2011).

#### 4. Zusammenfassung und Fazit

Auf die allgemeine Fragestellung, inwieweit Abbaupfade natürlicher erschöpfbarer Ressourcen optimalerweise und in der realen Umsetzung aussehen und wie die Extraktion über eine gewisse Zeitdauer politisch manipulierbar ist, können die in dieser Arbeit diskutierten dynamischen Modelle am besten Auskunft geben. Charakteristisch für die Ressourcenökonomik ist, dass sie die statische Betrachtungsweise hinter sich lässt und stattdessen einer dynamischen Analyse nachgeht.

Beginnend mit einem neoklassischen Modell von Solow und Stiglitz wird ein gesellschaftliches Optimum für den Extraktionspfad erschöpfbarer fossiler Energieträger hergeleitet. Der durch die Planung eines benevolenten Diktators generierte Abbaupfad stellt für alle Generationen eine pareto-optimale - d.h. eine intertemporale Besserstellung einzelner Generationen ist nicht mehr möglich - (und damit normativ begründbare) Lösung dar. Es wird genauer ein optimales Verhältnis zwischen Sachkapital- und Ressourceneinsatz für die volkswirtschaftliche Produktion zu jedem Zeitpunkt  $t$  gewählt. Das „positive Pendant“<sup>93</sup> zur normativen Solow-Stiglitz-Bedingung stellt die Hotelling-Regel dar. Ausgangspunkt ist jedoch nicht das gesellschaftliche Optimierungskalkül, sondern das intertemporale Portfolioproblem der Ressourcenbesitzer. Es wird der Barwert aller auf den gegenwärtigen Zeitpunkt abdiskontierten Gewinne im Zeitablauf maximiert. Beiden Modellen ist gemein, die jeweiligen Vorteile einer gegenwärtigen Extraktion (die Ressource generiert ein positives Grenzprodukt bzw. steht dem Ressourcenbesitzer zum Verkauf inklusive Kapitalmarktanlage zur Verfügung) und einer Ressourcenkonservierung (hier wird der Wert der Lager durch die Ressourcenverknappung im Zeitablauf gesteigert) gegeneinander abzuwägen. Im Optimum der Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung, wie auch der Hotelling-Regel sind beide Grenzvorteile gleich hoch und es kann keine weitere Besserstellung erfolgen.

Ohne Marktunvollkommenheiten ergibt sich auf der modellhaften Basis, dass die Solow-Stiglitz-Effizienzbedingung direkt in die Hotelling-Regel überführt werden kann.<sup>94</sup> Wie oft in ökonomischen Modellen - in direkter Anlehnung an den ersten Hauptsatz der Wohlfahrtstheorie - wird auch hier gezeigt, dass der Markt bei Abwesenheit von Marktversagen selbst die effiziente Lösung erreichen kann und der soziale Planer des Solow-Stiglitz-Modells „überflüssig“ ist.

---

<sup>93</sup> Vgl. Sinn (2008a), S. 23.

<sup>94</sup> Vgl. Gleichung (10).

Dennoch werden bei den beschriebenen Modellen auch Marktineffizienzen miteinbezogen. Zum einen führen unsichere Eigentumsrechte bei den Ressourcenanbietern zu einer Verlagerung der Extraktion in die Gegenwart, da nicht nur die entgangene Marktrendite, sondern auch das Risiko der Enteignung durch den Wertanstieg der Ressourcen in situ kompensiert werden muss. Zum zweiten wird im Rahmen der beiden Modelle auch die Externalität des Treibhauseffektes thematisiert: Unter Berücksichtigung der Schäden, die durch die Ressourcenverwertung entstehen, sollte der gesellschaftlich optimale Abbaupfad und somit auch der Preispfad der Ressourcen flacher verlaufen.

Den Kern der Arbeit bildet jedoch nicht die Theorie optimaler Extraktionspfade, sondern der Sachverhalt, wie Extraktionspfade auf Politikmaßnahmen reagieren. Ausgangspunkt ist die Hotelling-Regel, d.h. das zu erwartende Verhalten der Ressourcenanbieter. Sinn untersucht in seinem Modell nachfrageorientierte Klimapolitik, bei der mittels Steuern und Emissionshandel sowie Subventionierung erneuerbarer Energieträger versucht wird, die Nachfrage und somit die gegenwärtige Extraktion von Ressourcen zu reduzieren. Diesem statischen Politikansatz wird vorgeworfen, die intertemporale dynamische Komponente zu vernachlässigen. Sinn betont in seinen Aufsätzen, dass beispielsweise bei einer Wertsteuer ein zu starkes Wachstum des relativen Steuerkeils im Zeitverlauf zu einem beschleunigten Ressourcenabbau führen kann.<sup>95</sup> Dieser Sachverhalt wird als grünes Paradoxon bezeichnet, da eine mit der Zeit immer striktere Klimapolitik zu einer Beschleunigung des Klimawandels führt. Das grüne Paradoxon kann auch auf andere grüne Politikmaßnahmen angewandt werden und ist nicht speziell auf die grüne Steuerpolitik beschränkt.

Selbstverständlich abstrahiert das Sinn'sche Modell – wie alle anderen ökonomischen Modelle auch – stark von realen Wirtschaftsprozessen. Die wichtigsten zu nennenden Kritikpunkte sind hierbei die mangelnde Differenzierung zwischen Ressourcen und Reserven, die Missachtung allgemein unsicherer Erwartungen bezüglich künftiger Ressourcenmärkte und die Kreditrationierung bei der Erschließung und Förderung neuer Lagerstätten. Andere Kritik bezieht sich auf die fehlende Berücksichtigung von Back-Stop-Ressourcen im Modell. Des Weiteren kann grüne Politik nicht als bloß nutzlos abgestempelt werden: Beispielsweise sind erneuerbare Technologien „lernende Technologien“<sup>96</sup>, die durch Ausbau und Förderung in ihrer Effizienz gesteigert und in ihrem Entwicklungs- und Herstellungskostenbedarf optimiert werden können. Außerdem

---

<sup>95</sup> Dies ist der Fall, wenn die Effizienzbedingung in Gleichung (19) verletzt wird:  $\hat{\tau} > \frac{(i + \pi)g(S)}{P(R, t)}$ .

<sup>96</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 142.

trägt Forschung und Entwicklung im grünen Sektor in Form von positiven Externalitäten global dazu bei, dass auch arme Länder von erneuerbaren Technologien Gebrauch machen können. Direkt das Modell betreffende Kritik hält sich in Grenzen: Der wichtigste Kritikansatz betrifft die fehlende Unterscheidung zwischen verschiedenen Marktformen – was sich jedoch leicht in die Theorie einbetten ließe.

Wenn z.B. die europäische Klimapolitik, welche sich der Nachfrageseite der Ressourcen widmet, in Sinns Modell kritisiert wird, dann darf daraus nicht gefolgert werden, dass Sinn den Klimawandel nicht ernst nehme. Er beschreibt das globale Treibhausproblem sogar als eine der großen Herausforderungen der Menschheit.<sup>97</sup> Weiter werden aus den Modellkomponenten des grünen Paradoxons direkt Handlungsimplicationen für die Politik abgeleitet, welche die Angebotsseite miteinbeziehen. Diese Empfehlungen betreffen die vermehrte Sicherung von Eigentumsrechten, fiskalische Maßnahmen, wie eine im Zeitverlauf sinkende Wertsteuer, eine zeitinvariante Mengensteuer, Subventionierung von Ressourcen in Lagern und eine Quellensteuer auf Kapitalerträge. Bei näherem Hinsehen erweisen sich die Vorschläge allerdings als wenig politiktauglich, was ihre Umsetzbarkeit betrifft. Zwar scheint die Formation eines globalen Monopsons – was wiederum die Nachfrageseite betrifft – in Verbindung mit anderen Politikfeldern (Issue Linkage) als plausibelster Lösungsansatz, kann aber nicht als „die“ Lösung mangels fehlender Umsetzung angesehen werden. Auch technische Lösungsvorschläge, den CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre durch Bindung oder Sequestrierung direkt zu senken, sind entweder schwierig umsetzbar oder noch unausgereift.

Sinns Aufsätze sind ambivalent zu betrachten: Auf der einen Seite muss ihm zweifellos zugestanden werden, eine nicht unerhebliche Nebenwirkung der forcierten Umweltpolitik, vor allem auf Initiative der europäischen Staaten, erkannt zu haben. Er erweitert eine statische um eine dynamische und eine rein nachfrageorientierte um eine angebotsorientierte Sichtweise; Soweit zur analytischen Seite der Theorie, die sehr wohl auf empirische Befunde eines stetig anwachsenden CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zutrifft (vgl. Abbildung 1). Auf der anderen Seite fehlen jedoch profunde Vorschläge, wie dem Klimawandel – der sehr bald ein akutes Problem darstellt – entgegenge wirkt werden kann: Die praxisorientierten Politikimplikationen, die aus der kritischen Analyse hervorgehen, überzeugen wenig. Vor allem, wenn man bedenkt, dass durch das vorliegende Modell des grünen Paradoxons auch die heutigen Maßnahmen, wie die Besteuerung fossiler Energieträger, der EU-Emissionshandel oder der Ausbau erneuerbarer Energien, ausgehebelt werden.

---

<sup>97</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 145.

Daraus ergibt sich abschließend der Kritikpunkt, ob Sinn mit der These der Nutzlosigkeit bzw. sogar negativen Auswirkung grüner Politik nicht falsch liegt und die Vorreiterrolle Deutschlands und der europäischen Union nicht maßlos unterschätzt. Denn ohne Umweltbewegung wäre der Klimaschutz nie in der heutigen Brisanz diskutiert worden.<sup>98</sup> Wenn man außerdem dem Gedankenexperimenten nachgeht, dass (Umwelt-)Ereignisse auf der Welt plötzlich doch zu einer anderen Gesinnung in vielen Ländern führen und zu einem schneller zustande kommenden Kyoto-Protokoll beitragen könnten, dann wären Länder hilfreich, die bereits Erfahrungen in Punkto grüner Politik gemacht haben und diese auch umsetzen können. Ein Umdenken ist dringend nötig, denn die endlichen fossilen Energieträger werden mittelfristig den aufstrebenden Wirtschaftsnationen, wie China, Indien und anderen Schwellenländern nicht dienen können, wenn ein bestimmter globaler Lebensstandard erreicht werden soll. Denn Ressourcenlager erschöpfen sich mit zunehmender Geschwindigkeit und durch die Verknappung der Rohstoffe werden die Preise für diese Art der Energie enorm steigen. Die Welt wird sich daher einer Wende bei der Energieversorgung nicht entziehen können.

---

<sup>98</sup> Vgl. Edenhofer, Kalkuhl (2009), S. 144.

## Literaturverzeichnis

Barrett, S. (1994): Self-Enforcing International Environmental Agreements, *Oxford Economic Papers* 46, *Special Issue on Environmental Economics*. Oxford. S. 878-894.

Carraro, C., Marchiori, C. (2003): Endogenous Strategic Issue Linkage in International Negotiations, *FEEM Working Paper Nr. 40*,  
<http://www.ssrn.com/abstract=419060> or doi:10.2139/ssrn.419060, [26.04.2011].

Dasgupta, P.S., Heal, G.M. (1979): *Economic Theory and Exhaustible Resources*, 1. Auflage. Welwyn.

Dohmen, F., Jung, A., Schwägerl, C. (2011): Die schmutzige Brücke. In: *Der Spiegel*, 12/2011, S. 74-78.

Edenhofer, O., Kalkuhl, M. (2009): Das „grüne Paradoxon“ – Menetekel oder Prognose?. In: Beckenbach, F., Weimann, S., Minsch, J., Nutzinger, H.G., Witt, U. (Hrsg.): *Jahrbuch ökologischer Ökonomik. Diskurs Klimapolitik*. Marburg. S. 115-151.

Ellerman, A.D., Joskow, P.L. für das Pew Center on Global Climate Change (2008): *The European Union's Emissions Trading System in Perspective*, <http://www.pewclimate.org/eu-ets>, [26.04.2011].

Haufler, A. (2001): *Taxation in global economy*, 1. Auflage. Cambridge.



Kemfert, C. (2009): Kommentar zu Hans-Werner Sinn: Public Policies against global warming. In: Beckenbach, F., Weimann, S., Minsch, J., Nutzinger, H.G., Witt, U. (Hrsg.): Jahrbuch ökologischer Ökonomik. Diskurs Klimapolitik. Marburg. S. 152-160.

Libyen.com (2003): Die Organisation Erdöl exportierender Länder, <http://libyen.com/Wirtschaft/OPEC>, [26.04.2011].

Montenegro, A., Brovkin, V., Eby, M., Archer, D., Weaver, A.J. (2007): Long term fate of anthropogenic carbon, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L19707, doi:10.1029/2007GL030905, <http://www.agu.org/pubs/crossref/2007/2007GL030905.shtml>, [26.04.2011].

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (2010): Umweltbericht 2010, [http://www.umwelt.niedersachsen.de/live/live.php?navigation\\_id=25865&article\\_id=88659&psmand](http://www.umwelt.niedersachsen.de/live/live.php?navigation_id=25865&article_id=88659&psmand), [26.04.2011].

Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., Common, M. (2003): Natural Resource and Environmental Economics, 3. Auflage. Harlow.

Pittel, K. (2010): Erschöpfbare natürliche Ressourcen, [http://www.vwl.unimuenchen.de/personen/professoren/cesifo/pittel/pittel\\_umw\\_ws10/index.htm](http://www.vwl.unimuenchen.de/personen/professoren/cesifo/pittel/pittel_umw_ws10/index.htm), [26.04.2011].

Sinn, H.W. (2008a): Das grüne Paradoxon: Warum man das Angebot bei der Klimapolitik nicht vergessen darf, *Ifo Working Paper No. 54*, <http://www.cesifo-group.de/DocDL/IfoWorkingPaper-54.pdf>, [26.04.2011].

Sinn, H.W. (2008b): Public policies against global warming: a supply side approach, *Int Tax Public Finance* 15: S.360-394, <http://www.ideas.repec.org/.../v15y2008i4p360-396.html>, [26.04.2011].

Stern, N. (2006): Stern Review – Der wirtschaftliche Aspekt des Klimawandels. Ausführliche Zusammenfassung, [www.wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kosten\\_des\\_Klimawandels](http://www.wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kosten_des_Klimawandels), [26.04.2011].

Strom Magazin (2011): Der Gaspreis steigt – wegen der Ölpreiskopplung, <http://www.strom-magazin.de/gaspreis/>, [26.04.2011].

Tol, S.J., Anthoff, D. (2009): Kämpft alle Klimapolitik mit dem grünen Paradoxon?. In: Beckenbach, F., Weimann, S., Minsch, J., Nutzinger, H.G., Witt, U. (Hrsg.): Jahrbuch ökologischer Ökonomik. Diskurs Klimapolitik. Marburg. S. 109-114.

Umweltfinanz (2011): Gewachsene Strukturen für ökologische Forstwirtschaft in Costa Rica, [http://www.umweltfondsvergleich.de/fondsportraits/091229\\_waldfonds\\_bauminvest2\\_wald\\_fonds.php](http://www.umweltfondsvergleich.de/fondsportraits/091229_waldfonds_bauminvest2_wald_fonds.php), [26.04.2011].

Van der Ploeg, F., Withagen, C. (2010): Is There Really a Green Paradox?, *Ifo Working Paper No. 2963*, <http://ideas.repec.org/p/ces/ceswps/2963.html>, [26.04.2011].

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Jährliche weltweite Kohlendioxidemission – Quelle: Sinn (2008a), S. 6, Abb. 1.

Abbildung 2: Vollständig unelastisches Angebot – Quelle: Sinn (2008a), S. 10, Abb. 3.

Abbildung 3: Zwei Wachstumspfade, welche die Hotelling-Regel erfüllen – Quelle: Perman (2003), S. 486, Figure 14.3.

Abbildung 4: Graphische Erläuterung optimaler Ressourcenabbaupfade – Quelle: Perman (2003), S. 517, Figure 15.3.

Abbildung 5: Änderung des Preiswachstumspfades - Quelle: Perman (2003), S. 524, Figure 15.12.

Abbildung 6: Emissionshandel und gehandelte Ressourcenmenge zum Zeitpunkt  $t$  - Quelle: Sinn (2008a), S. 36, Abb.6.

Abbildung 7: Ölpreisentwicklung - Quelle: Wottreng (2011).

Abbildung 8: Optimaler Ressourcenabbau beim Monopolisten - Quelle: Perman (2003), S. 519, Figure 15.4.

Abbildung i: Preisobergrenze für den Preiswachstumspfad bei Back-Stop-Ressourcen – Quelle: Pittel (2010), S. 11.

## Variablenverzeichnis

$Y = f(\dots)$	Produktionsfunktion bzw. Output an Konsum- und Investitionsgütern
$K$	Sachkapital
$R$	Natürliche Ressource
$t$	Zeitvariable
$f_K (=Y_K); f_{KK}$	Grenzprodukt von $K$ ; 2. Ableitung der Produktionsfunktion nach $K$
$f_R (=Y_R); f_{RR}$	Grenzprodukt von $R$ ; 2. Ableitung der Produktionsfunktion nach $R$
$f_t$	1. Ableitung der Produktionsfunktion nach $t$
$\sigma$	Substitutionselastizität der Produktionsfunktion
$\alpha, \beta, \theta$	Parameter der CES-Produktionsfunktion
$C_t; c_t$	Konsumvariable in Abhängigkeit von $t$ ; Pro-Kopf-Konsum
$g$	Extraktionskosten pro Einheit $R$
$g'(S)$	1. Ableitung der Extraktionskosten nach $S$
$S; \dot{S}_t = -R_t$	Ressourcen(rest)bestand in den Lagerstätten; Bestandsänderung
$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$	Notation der Differenzierung einer Variablen nach $t$
$W$	(Hier utilitaristische) soziale Wohlfahrtsfunktion

$U_t$	Gesellschaftlicher Nutzen in Abhängigkeit von $t$
$\rho$	Soziale Diskontrate
$N(t)$	Anzahl der Bevölkerung in Abhängigkeit von $t$
$U_{C,t}; U_{K,t}$	Grenznutzen des Konsums und des Kapitals in Abhängigkeit der Zeit
$\omega_t; P_t$	Schattenpreis des Kapitals, Schattenpreis der Ressource
$i_t$	Marktzins in Abhängigkeit von $t$
$P; P_0$	Ressourcenpreis; Preis zum Zeitpunkt $t=0$
$\pi$	Wahrscheinlichkeit der Enteignung der Ressourcenbesitzer
$f_S; f_{SS}$	1. und 2. Ableitung der Produktionsfunktion nach $S$
$\tau$	In $\tau = t$ ist $S$ vollständig abgebaut; $\tau$ als Wertsteuersatz
$\tau^*$	Gewinnsteuersatz
$Z$	Bemessungsgrundlage bei einer Gewinnsteuer (=Gewinn)
$\theta^*; \theta$	$\theta^* \equiv 1 - \tau^*$ ; $\theta \equiv 1 - \tau$
$\underline{P}$	Produzentenpreis
$\Pi$	Gewinn einer produzierenden Firma; Gewinn der Ressourcenanbieter
$\hat{\theta}^*$	Konstanter Parameter beim Wachstum von $\theta^*$
$\hat{\tau}$	Wachstum des (Wert-)Steuersatzes

$m_t$  Grenzertrag des Monopolisten bei der Gewinnmaximierung nach R

$\eta(R)$  Preiselastizität der Nachfrage nach R

$$\gamma_t = 1 + \frac{1}{\eta(R_t)}$$

## Anhang

### 1. Herleitung Gleichung (3)

Sofortiges Fördern und die Konservierungsstrategie müssen zu den gleichen gesellschaftlichen Grenzvorteilen führen:  $f_R - g(S) + f_K(f_R - g(S)) = f_R - g(S) + \dot{f}_R$ ,

wobei  $f_R$  das Grenzprodukt der Vorperiode ist. Daraus folgt  $f_K(f_R - g(S)) = \dot{f}_R$  und weiter

$$f_K = \frac{\dot{f}_R}{(f_R - g(S))} \quad (3)$$

### 2. Herleitung der Gleichungen (7.1) bis (7.4)<sup>99</sup>

Das Maximierungsproblem lautet: Maximiere  $W = \int_{t=0}^{t=\infty} U(C_t)e^{-\rho t} dt$  unter geeigneter Wahl von  $R_t$

und  $K_t$ . (Im Unterschied zum Hauptteil wird der Nutzen des *Pro-Kopf*-Konsums nicht mit  $N(t)$  multipliziert, sondern gleich der gesellschaftliche Nutzen des aggregierten Konsums verwendet.)

Die Nebenbedingungen  $\dot{S}_t = R_t$  und

$\dot{K}_t = Y_t(K_t, R_t) - C_t$  müssen eingehalten werden. Zusätzlich muss im Optimum gelten, dass der Kapitalstock sowie der Ressourcenstock am Ende des Planungshorizontes aufgebraucht sind:

$K_t = \infty = 0$  und  $S_t = \infty = 0$ .

Der „Current-value Hamiltonian“ (für dynamische Optimierungsprobleme) ist

$$H_{C_t} = U(C_t) + P_t(-R_t) + \omega_t(Y_t(K_t, R_t) - C_t) \quad (7)$$

Mit  $P_t$  und  $\omega_t$  als Co-state-Variablen, d.h. Schattenpreise, in Nutzeinheiten für den Ressourcen- sowie den Kapitalstock zum Zeitpunkt  $t$ . Die Bedingungen für ein Maximum ergeben sich aus

Gleichung (7):

$$\frac{\delta H_{C_t}}{\delta C_t} = U_{C_t} - \omega_t = 0 \Leftrightarrow U_{C_t} = \omega_t \quad (7.1)$$

$$\frac{\delta H_{C_t}}{\delta R_t} = -P_t + \omega_t Y_{R,t} = 0 \Leftrightarrow P_t = \omega_t Y_{R,t} \quad (7.2)$$

$$\dot{P}_t = -\frac{\delta H_{C_t}}{\delta S_t} + \rho P_t \Leftrightarrow \dot{P}_t = \rho P_t \quad (7.3)$$

<sup>99</sup> Vgl. Perman, Ma, McGilvray, Common (2003), S. 503-504.

$$\dot{\omega}_t = -\frac{\delta H_{C_t}}{\delta K_t} + \rho \omega_t \Leftrightarrow \dot{\omega}_t = \rho \omega_t - Y_{K,t} \omega_t \quad (7.4)$$

(7.1) und (7.2) ergeben sich aus den „max H“-Bedingungen:  $\frac{\delta H_{C_t}}{\delta u}$  mit  $u$  als Kontrollvariable

(hier  $R_t$  und  $C_t$ ). (7.3) und (7.4) sind Bewegungsgleichungen der Form  $|\dot{\mu} = \rho \mu - \delta H_c / \delta x|$  mit  $x$  als State-Variable (hier  $S_t$  und  $K_t$ ) und  $\mu$  als Co-State-Variable (hier  $P_t$  und  $\omega_t$ ).

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, kann aus Effizienzbedingung (7.3) die Hotelling-Regel abgeleitet werden (wenn von Extraktionskosten abgesehen und  $i=\rho$  angenommen wird):

(7.3) wird zu  $\frac{\dot{P}_t}{P_t} = \rho = i$ . Alternativ kann die Hotelling-Regel auch über das dynamische Gewinnmaximierungsproblem der Ressourcenbesitzer hergeleitet werden. Bei Absenz von Marktvollkommenheiten ( $i \neq \rho$ ) führt die gesellschaftliche und die individuelle Optimierung zum gleichen Ergebnis.

### 3. Herleitung Gleichung (8)

Die Strategien heute zu extrahieren sowie die Ressource eine Periode lang in der Lagerstätte zu belassen müssen für den Ressourcenbesitzer den gleichen marginalen Vorteil bringen – ähnlich wie bei der Herleitung von Gleichung (3):  $i_t[P_t - g(S_t)] = \dot{P}_t$ . Daraus folgt

$$i_t = \frac{\dot{P}_t}{(P_t - g(S_t))} \quad (8)$$

### 4. Herleitung der Bedingungen aus Gleichung (10)

Ein Unternehmen steht bei vollständiger Konkurrenz vor dem Maximierungskalkül

$$\Pi = P_G Y(K, R) - iK - PR.$$

Es wird angenommen, dass das Kapital  $K$  und die natürliche Ressource  $R$  die einzigen Inputfaktoren sind und  $i$  und  $P$  ihre jeweiligen Preise repräsentieren. Da vollkommener Wettbewerb vorausgesetzt wird, kann die einzelne Unternehmung den Verkaufspreis des Gutes  $P_G$  nicht beeinflussen. Zudem wird  $P_G$  auf 1 normiert. Gewinnmaximierung nach  $K$  und  $R$  impliziert:

$$\frac{\delta \Pi}{\delta K} = \frac{\delta Y}{\delta K} - i = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\delta \Pi}{\delta R} = \frac{\delta Y}{\delta R} - P = 0 \quad (10)$$



5. Beweis der fehlenden Auswirkung einer konstanten Gewinnmaximierungskalkül der Ressourcenbesitzer (vgl. S. 23)

Ressourceneigner stehen in jeder Periode  $t$  vor dem durch das Maximierungsproblem

$\Pi = (1 - \tau^*)Z = (1 - \tau^*)(P - g(S))R$ , wobei  $Z$  die Bemessungsgröße ist. Es folgt bei der Maximierung über die geförderte Ressourcennutzung

$$\frac{\delta \Pi}{\delta R} = (1 - \tau^*)(P - g(S)) = 0. \text{ Weiter gilt im Optimum } P = g(S)$$

auf die marginale Bedingung, die im individuellen Optimum nicht auf die Extraktionsgeschwindigkeit.

6. Erläuterung zu Gleichung (16)

Auch in einem Gleichgewicht mit Steuern muss der Grenzwert der inklusive Kapitalanlage gleich dem Grenzvorteil bei Konsum sein (vgl. Herleitung Gleichung (8)):

$$(i + \pi)(P - \frac{g(S)}{\theta}) = \dot{P}, \text{ wobei Zeitindices unberücksichtigt}$$

sichere Eigentumsverhältnisse miteinbezieht. Daraus folgt

$$i + \pi = \frac{\dot{P}}{(P - g(S)/\theta)}$$

7. Herleitung Gleichung (19)

Wird die Formel für den Produzentenpreis  $\underline{P} = P(1 - \tau)$  nach

$$\underline{P} = \dot{P}(1 - \tau) - \dot{\tau}P$$

Da der Preiswachstumspfad von den Produzenten optimal gegeben ist

Regel bei Steuern den Produzentenpreis. Aus Gleichung (16) folgt

$$i + \pi = \frac{\dot{P}}{(P - g(S))}$$

Aus (19a) und  $\underline{P} = P(1 - \tau)$  in (19b) folgt

$$i + \pi = \frac{\dot{P}(1 - \tau) - \dot{\tau}P}{(P(1 - \tau) - g(S))}$$

Es ergeben sich nachfolgende Umformungen:

$$i + \pi = \frac{\dot{P}(1-\tau)}{(P(1-\tau) - g(S))} \cdot \frac{P}{P} - \frac{iP}{(P(1-\tau) - g(S))} \cdot \frac{\tau}{\tau}$$

$$i + \pi = \frac{P(1-\tau)}{(P(1-\tau) - g(S))} \hat{P} - \frac{\tau P}{(P(1-\tau) - g(S))} \hat{\tau}$$

mit  $\hat{P} = \frac{\dot{P}}{P}$  sowie  $\hat{\tau} = \frac{\dot{\tau}}{\tau}$ .

$$\hat{P} = (i + \pi) \left( \frac{P(1-\tau) - g(S)}{P(1-\tau)} \right) + \hat{\tau} \frac{P\tau}{P(1-\tau)}$$

$$\hat{P} = (i + \pi) \left( 1 - \frac{g(S)}{P(1-\tau)} \right) + \hat{\tau} \frac{\tau}{(1-\tau)} \quad (19d)$$

Weiter gilt im Falle einer für den Extraktionspfad neutralen Steuer, dass der absolute Steuerkeil  $\tau P$  in Höhe der Diskontrate wächst. Daraus folgt:  $\hat{\tau} + \hat{P} = i + \pi$ . Bei Erfüllung dieser Bedingung ist der abdiskontierte Einkommensverlust pro Einheit der extrahierten Ressource über die Zeit konstant.<sup>100</sup> Daraus folgen die Umformungen:

$$\hat{P} = (\hat{\tau} + \hat{P}) \left( 1 - \frac{g(S)}{P(1-\tau)} \right) + \hat{\tau} \frac{\tau}{(1-\tau)}$$

$$(\hat{\tau} + \hat{P}) \frac{g(S)}{P(1-\tau)} = \left( 1 + \frac{\tau}{1-\tau} \right) \hat{\tau}$$

$$(\hat{\tau} + \hat{P}) \frac{g(S)}{P} = \hat{\tau}$$

$$\hat{\tau} = \frac{(i + \pi)g(S)}{P(R, t)} \quad (19)$$

### 8. Monopole und optimale Preiswachstumspfade (S. 33)<sup>101</sup>

Im Folgenden wird aus Gründen der Vereinfachung der Monopolfall und nicht der Fall eines Oligopols in Bezug auf das Preiswachstum und den Ressourcenabbau betrachtet. Ähnlich einer Firma unter vollständiger Konkurrenz versucht der Monopolist den heutigen Barwert aller künftigen Gewinne zu maximieren. Wird von Extraktionskosten abgesehen, muss der Grenzertrag

$$m_t = \frac{\delta}{\delta R_t} \{P(R_t, t)R_t\} = P(R_t, t) + R_t \frac{\delta P}{\delta R_t} \quad (33.1)$$

im Optimum mit einer Rate in Höhe des Marktzinses  $i$  anwachsen (Hotelling-Regel):  $\frac{\dot{m}_t}{m_t} = i$

<sup>100</sup> Vgl. Sinn (2008b), S. 379.

<sup>101</sup> Vgl. Dasgupta, Heal (1979), S. 323-333 für folgende mathematische Fundierung.

(i gilt zunächst als zeitinvariant). Sei weiter  $\eta(R) = \frac{dR}{dP} \frac{P(R)}{R} \leq 0$  die Preiselastizität der Nachfrage nach der Ressource. Dann gilt für den Grenzertrag aus Gleichung (33.1):

$$m_t = P_t \left(1 + \frac{1}{\eta(R_t)}\right) \quad (33.2)$$

Sei  $\gamma_t = \left(1 + \frac{1}{\eta(R_t)}\right)$ . Dann ergeben die Differenzierung von Gleichung (33.2)  $\frac{\dot{m}_t}{m_t} = \frac{\dot{P}_t}{P_t} + \frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t}$  und

die Hotelling-Regel  $\frac{\dot{m}_t}{m_t} = i$ :

$$\frac{\dot{P}_t}{P_t} = i - \frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t} \quad (33.3)$$

Unter Wettbewerbsbedingungen (ebenfalls ohne Beachtung der Extraktionskosten) gilt die Hotelling-Regel aus Gleichung (8):  $\frac{\dot{P}_t}{P_t} = i$ . Dieser Preiswachstumspfad unterscheidet sich um den

Faktor  $\frac{\dot{\gamma}_t}{\gamma_t}$  (für  $\dot{\gamma}_t \neq 0$ ) im Vergleich zum Monopol. Es gilt, dass  $\text{Sign } \dot{\gamma}_t = \text{Sign } \frac{d\eta}{dR}$ . Da in der

Regel für die (z.B. lineare) Nachfrage angenommen werden kann, dass der absolute Wert der

Preiselastizität für eine sinkende Menge R ansteigt, gilt  $\frac{d\eta}{dR} > 0$ . In diesem Fall ist  $\dot{\gamma}_t > 0$  - da die

extrahierte Menge in zukünftigen Perioden immer weiter verknappt wird - und es folgt  $\frac{\dot{P}_t}{P_t} < i$ .

Der Preispfad verläuft beim Monopolisten über die Zeit flacher als bei einer Unternehmung, die

vollständigem Wettbewerb ausgesetzt ist. Damit verläuft die Ressourcenextraktion ebenfalls

gemäßiger: Der Abbaupfad ist flacher und erstreckt sich über einen längeren Zeitraum (vgl. Ab-

bildung 8). Es kann festgehalten werden, dass die Marktformen des Monopols sowie des Oligo-

maßstab gesetzt wird.

### 9. Herleitung Gleichung (21) aus Gleichung (20)

Ausgangspunkt ist Gleichung (20):

$$i_t(1 - \tau_{it}) = \frac{\dot{P}_t}{(P_t - g(S_t))} \quad (20)$$

Auflösen nach  $\tau_{it}$  ergibt:

$$\tau_{it} = 1 - \frac{\dot{P}_t}{i_t(P_t - g(S_t))} = \frac{i_t(P_t - g(S_t)) - \dot{P}_t}{i_t(P_t - g(S_t))} \quad (20a)$$

Weiter folgt aus Gleichung (14):

$$f_K = \frac{\dot{f}_R + f_S}{f_R - g(S)} \quad (14)$$

Bei Auflösen nach  $f_S$ :

$$f_S = (f_R - g(S))f_K - \dot{f}_R \quad (14a)$$

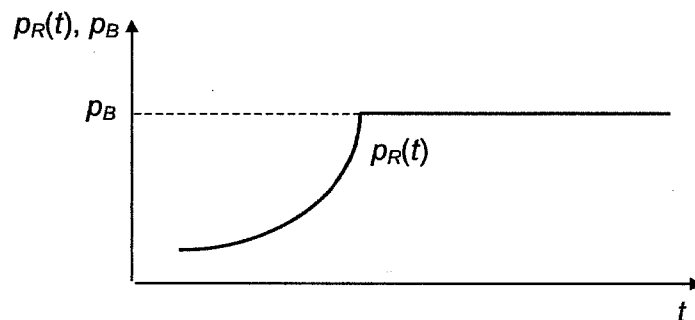
Es gilt zudem die Annahme kompetitiver Märkte:

$$f_R = P \text{ und } f_K = i \quad (14b)$$

Aus (14a), (14b) und (20a) sowie unter Berücksichtigung der Zeitindices und dass  $P_t$  eine Funktion von  $R_t$  ist, folgt

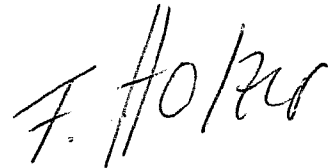
$$\tau_{it} = \frac{f_{St}}{i_t(P_t(R_t) - g(S_t))} \quad (21)$$

10. Abbildung i: Preisobergrenze für den Preiswachstumspfad bei Back-Stop-Ressourcen



mit  $P_B$  als Preisobergrenze und konstanten Grenzkosten der Back-Stop-Technologie.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt, noch nicht einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht habe.



Felicitas Holzer

München, den 29.04.2011