

**DIE VERBREITUNG NEUER TECHNOLOGIEN AM  
BEISPIEL VON BIODIESEL IN  
DEUTSCHLAND**

**Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades  
der Wirtschaftswissenschaften (Dr. oec.)  
Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften  
Universität Hohenheim**

Institut für Volkswirtschaftslehre  
Fg. VWL, insb. Umweltökonomie sowie Ordnungs-,  
Struktur- und Verbraucherpolitik  
vorgelegt von Isabell Benignus  
aus Stuttgart  
2010

Die vorliegende Arbeit wurde im Juni 2010 an der Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Universität Hohenheim als Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften eingereicht und im August 2010 angenommen.

Datum der mündlichen Doktorprüfung: 04.08.2010

Dekan: Prof. Dr. Hachmeister

Prüfungsvorsitz: Prof. Dr. Pyka

Erstgutachter: Prof. Dr. Ahlheim (Betreuer)

Zweitgutachter: Prof. Dr. Schulz

# DANKSAGUNG

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Ahlheim für die interessante Aufgabenstellung, die weit genug gefasst war, mir nicht die Freiheit bei der Ausgestaltung der Arbeit zu nehmen. Seine stete Diskussionsbereitschaft in den regelmäßigen Talk&Eat Lehrstuhltreffen, vielfältige Unterstützung und mitunter notwendige Diplomatie haben den Erfolg des Promotionsvorhabens getragen.

Für die Übernahme des Zweitgutachtens und die fachliche Begleitung und Unterstützung seit meiner Studienzeit bin ich Herrn Prof. Dr. Werner F. Schulz dankbar.

Meinen ehemaligen Lehrstuhlkollegen, insbesondere Dr. Ulrike Lehr, Dr. Oliver Frör und Andreas Zahn, sei für ihre immerwährende Diskussions- und Hilfsbereitschaft in allen Phasen der Promotion gedankt.

Durch ihre bereitwillige Unterstützung bei der orthografischen Überarbeitung der Dissertation haben Markus Lechner und Carolin Röser wesentlich zur Lesbarkeit der Arbeit beigetragen. Ihnen gilt nicht nur mein Dank sondern auch der des geneigten Lesers.

Nicht zuletzt gebührt mein besonderer Dank meinen beiden Familien. Eure Unterstützung gab mir Kraft, euer Vorbild war mir Ansporn. Meinem Freund Alexander Nolte danke ich für seine unbezahlbare Geduld und sein lächelndes Verständnis. Du bist mit mir den Weg durch die Gezeiten der Promotion gegangen, durch Freude und durch Leid. Danke.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	EINFÜHRUNG IN DAS THEMA.....	1
1.2	ZIELSETZUNG UND PROBLEMSTELLUNG .....	2
1.3	GANG DER UNTERSUCHUNG .....	4
<b>2</b>	<b>VOLKSWIRTSCHAFTLICHE DIFFUSIONSFORSCHUNG.....</b>	<b>6</b>
2.1	DER INNOVATIONSZYKLUS .....	7
2.2	EINORDNUNG DES NEOKLASSISCHEN MODELLANSATZES IN DIE VOLKSWIRTSCHAFTLICHE DIFFUSIONSFORSCHUNG .....	9
2.3	KATEGORISIERUNG DER EINFLUSSFAKTOREN DER DIFFUSION VON BOKRAFTSTOFFEN .....	12
2.4	ZUSAMMENFASSUNG .....	16
<b>3</b>	<b>DIE DIFFUSION VON BOKRAFTSTOFFEN IM NEOKLASSISCHEN MODELLRAHMEN....</b>	<b>18</b>
3.1	DIE PREISBILDUNG UND PREISENTWICKLUNG ERSCHÖPFBARER RESSOURCEN .....	19
3.1.1	<i>Der optimale Abbau erschöpfbarer Ressourcen im Zeitverlauf.....</i>	<i>20</i>
3.1.2	<i>Aspekte der Verknappung von Erdöl.....</i>	<i>31</i>
3.2	NEOKLASSISCHE ANALYSE DER DIFFUSION EINER BACKSTOPTECHNOLOGIE.....	44
3.2.1	<i>Überlegungen zur Adoption neuer Technologien in Unternehmen.....</i>	<i>45</i>
3.2.2	<i>Diffusion bei steigenden Grenzproduktionskosten .....</i>	<i>47</i>
3.2.3	<i>Diffusion bei konstanten Grenzproduktionskosten .....</i>	<i>59</i>
3.3	ZUSAMMENFASSUNG .....	76
<b>4</b>	<b>BOKRAFTSTOFFE ALS ALTERNATIVE ZU FOSSILEN KRAFTSTOFFEN.....</b>	<b>78</b>
4.1	ÜBERBLICK .....	79
4.2	ROHSTOFFE UND HERSTELLUNG AUSGEWÄHLTER BOKRAFTSTOFFE.....	82
4.2.1	<i>Bioethanol .....</i>	<i>82</i>
4.2.2	<i>Biodiesel.....</i>	<i>96</i>
4.2.3	<i>Biokraftstoffe der nächsten Generation.....</i>	<i>104</i>
4.3	DIE PRODUKTEIGENSCHAFTEN VON BOKRAFTSTOFFEN .....	108
4.3.1	<i>Relativer Vorteil.....</i>	<i>109</i>
4.3.2	<i>Kompatibilität .....</i>	<i>111</i>
4.3.3	<i>Komplexität .....</i>	<i>115</i>
4.3.4	<i>Erprobbarkeit und Beobachtbarkeit.....</i>	<i>115</i>
4.4	ZUSAMMENFASSUNG .....	116
<b>5</b>	<b>DIE STAATLICHE FÖRDERUNG VON BOKRAFTSTOFFEN.....</b>	<b>119</b>
5.1	DIE FÖRDERUNGSWÜRDIGKEIT VON BOKRAFTSTOFFEN .....	120
5.1.1	<i>Die Klimawirkung von Biokraftstoffen.....</i>	<i>120</i>
5.1.2	<i>Ressourcenschonung und Ressourcenverbrauch.....</i>	<i>133</i>
5.1.3	<i>Förderung der Landwirtschaft und Arbeitsplatzeffekte.....</i>	<i>137</i>
5.1.4	<i>Versorgungssicherheit und Erdölabhängigkeit.....</i>	<i>138</i>
5.1.5	<i>Food vs. Fuel - Die Rivalität um landwirtschaftliche Flächen.....</i>	<i>141</i>
5.1.6	<i>Schlussfolgerungen.....</i>	<i>148</i>

5.2	DIE FÖRDERUNG VON BIODIESEL IN DEUTSCHLAND.....	150
5.2.1	<i>Instrumente zur Förderung der Diffusion von Innovationen.....</i>	<i>150</i>
5.2.2	<i>Rahmenbedingungen der Förderung von Biokraftstoffen in Deutschland.....</i>	<i>151</i>
5.2.3	<i>Förderung auf der Produktionsseite.....</i>	<i>153</i>
5.2.4	<i>Förderung auf der Verwendungsseite.....</i>	<i>159</i>
5.2.5	<i>Schlussfolgerungen.....</i>	<i>163</i>
5.3	DIE FÖRDERUNG VON BIOETHANOL IN BRASILIEN.....	165
5.3.1	<i>Die Einführung des Programms Proálcool.....</i>	<i>165</i>
5.3.2	<i>Die Förderung von Bioethanol in den vier Programmstufen.....</i>	<i>166</i>
5.3.3	<i>Erfolgsfaktoren des Programms Proálcool.....</i>	<i>169</i>
5.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	170
<b>6</b>	<b>DER MARKT FÜR BIODIESEL IN DEUTSCHLAND.....</b>	<b>173</b>
6.1	MARKTVOLUMEN UND MARKTENTWICKLUNG.....	174
6.2	DER PREIS ALS BESTIMMUNGSFAKTOR DER BIODIESELNACHFRAGE.....	180
6.2.1	<i>Die Datenbasis der Untersuchung.....</i>	<i>181</i>
6.2.2	<i>Die Bedeutung einer unelastischen Kraftstoffnachfrage für die Untersuchung.....</i>	<i>183</i>
6.2.3	<i>Analyse des Preis-Mengen Zusammenhangs bei Biodiesel.....</i>	<i>184</i>
6.3	DIE WIRKUNG DER STAATLICHEN FÖRDERUNG AUF DIE BIODIESELABSATZMENGEN.....	187
6.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	189
<b>7</b>	<b>POLITISCH-ÖKONOMISCHE ZUSAMMENFASSUNG DER UNTERSUCHUNG.....</b>	<b>191</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>199</b>

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1	Die Objekte im Diffusionssystem.....	13
Abbildung 3.1	Der optimale Preis- und Extraktionspfad einer erschöpfbaren Ressource.....	25
Abbildung 3.2	Monopol- und Wettbewerbsextraktion im Vergleich .....	29
Abbildung 3.3	Zusammensetzung des Diesel Tankstellenpreises und Ölpreiseinfluss .....	32
Abbildung 3.4	Notierungen Erdöl (Brent) und Diesel.....	32
Abbildung 3.5	Klassifikation der Erdölvorräte .....	34
Abbildung 3.6	Schätzungen zum Umfang der verbleibenden Ölreserven 2007.....	35
Abbildung 3.7	Entwicklung der sicheren Erdölreserven nach Regionen .....	36
Abbildung 3.8	Entwicklung der sicheren Erdgasreserven nach Regionen .....	36
Abbildung 3.9	Langfristige Angebotskurve für Erdöl.....	37
Abbildung 3.10	Regionale Entwicklung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen .....	39
Abbildung 3.11	Erdölproduktion 1988 bis 2007 .....	42
Abbildung 3.12	Spotpreise Erdöl (Brent) Europa 1987-2008 .....	42
Abbildung 3.13	Extraktions- und Produktionsmengen bei zunehmenden Grenzkosten.....	53
Abbildung 3.14	Endogener Planungshorizont bei Einführung einer Backstop-technologie.....	61
Abbildung 3.15	Endogener Planungshorizont bei Einführung einer Backstop-technologie.....	66
Abbildung 3.16	Preisfad des reinen Monopolisten im Vergleich zum Referenzszenario .....	74
Abbildung 4.1	Klassifikation von flüssigen Biokraftstoffen .....	79
Abbildung 4.2	Die größten Hersteller von synthetischem Ethanol .....	82
Abbildung 4.3	Produktion von Kraftstoffbioethanol in Brasilien .....	83
Abbildung 4.4	Ethanolproduktion in den USA .....	85
Abbildung 4.5	Regionale Produktion von Bioethanol in Brasilien .....	88
Abbildung 4.6	Anlageninvestitionen Deutschland .....	93
Abbildung 4.7	Anlageninvestitionen Brasilien.....	93
Abbildung 4.8	Durchschnittliche Wöchentliche Börsennotierungen Raps .....	101
Abbildung 4.9	Entwicklung der Herstellkosten für Biodiesel.....	103
Abbildung 5.1	Emissionsfaktoren von Biokraftstoffen im Lebenszyklus .....	121

Abbildung 5.2	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten von Biodiesel und Erdölpreis (Brent) .....	128
Abbildung 5.3	EEX Year Futures Coal .....	131
Abbildung 5.4	EEX Year Futures GUD Natural Gas .....	131
Abbildung 5.5	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten von Biokraftstoffen und im EU Emissionshandel .....	132
Abbildung 5.6	Entwicklung des Call-on-OPEC .....	140
Abbildung 5.7	Bestimmungsfaktoren und Wirkungszusammenhänge in der Landnutzung .....	142
Abbildung 5.8	Entwicklung der Lebensmittelpreise (2002 bis 2004 = 100) .....	145
Abbildung 5.9	Index der EU Ölsaaten Importe (200 =100) .....	146
Abbildung 5.10	Veränderung Landnutzung in den USA .....	147
Abbildung 5.11	Instrumente zur Diffusionsförderung .....	150
Abbildung 5.12	Bioethanol- und Zuckerproduktion in Brasilien .....	167
Abbildung 5.13	Verkaufsmenge Bioethanolfahrzeuge im Vergleich .....	168
Abbildung 6.1	Tankstellenpreise für Diesel und Biodiesel .....	174
Abbildung 6.2	Dieselpreis und Preis des Biodieseläquivalents .....	175
Abbildung 6.3	Entwicklung der Produktionskapazitäten für Biodiesel in Deutschland .....	177
Abbildung 6.4	Biodiesel Produktionskapazitäten in Abhängigkeit vom Mineralölabsatz .....	179
Abbildung 6.5	Biodieselabsatzmengen nach Erhebungsmethode .....	183
Abbildung 6.6	Preisdifferenz und Marktanteil Biodiesel (UFOP Erhebungsmethodik) .....	185
Abbildung 6.7	Preisdifferenz und Marktanteil Biodiesel (BAfA Erhebungsmethodik) .....	185
Abbildung 6.8	Entwicklung der Marktanteile von Biodiesel .....	186
Abbildung 6.9	Preisdifferenz der Tankstellenpreise Diesel und Biodieseläquivalent .....	187

# TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.1	Biokraftstoffe für Dieselmotoren: Herkunft und Marktanteile 2005 und 2007.....	80
Tabelle 4.2	Biokraftstoffe für Ottomotoren: Herkunft und Marktanteile 2005 und 2007.....	80
Tabelle 4.3	Bioethanolpotential in Deutschland und EU-25.....	87
Tabelle 4.4	Bioethanolproduktion in Brasilien .....	88
Tabelle 4.5	Herstellkosten von Bioethanol in Deutschland und Brasilien.....	95
Tabelle 4.6	Biodieselpotential in Deutschland und EU-25 .....	98
Tabelle 4.7	Herstellkosten für Biodiesel in Deutschland.....	102
Tabelle 4.8	Kraftstoffenergieertrag verschiedener Biokraftstoffe .....	104
Tabelle 4.9	Technische Eigenschaften von Ethanol und Benzin .....	109
Tabelle 4.10	Technische Eigenschaften von Biodiesel und Diesel.....	110
Tabelle 5.1	CO <sub>2</sub> -Vermeidung im Lebenszyklus von Bioethanol als Reinkraftstoff .....	123
Tabelle 5.2	CO <sub>2</sub> -Vermeidung im Lebenszyklus von Biodiesel als Reinkraftstoff.....	124
Tabelle 5.3	Emissionen von Diesel und Biodiesel im Lebenszyklus.....	128
Tabelle 5.4	Steuersätze für Biokraftstoffe in Deutschland.....	162
Tabelle 5.5	Verwendungsquoten für Biokraftstoffe in Deutschland.....	163
Tabelle 6.1	Biodieselabsatz in der EU .....	173
Tabelle 6.2	Anbauflächen und Rapsernten in EU-27 und Deutschland.....	176



# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Einführung in das Thema

„The Stone Age did not end for lack of stone, and the Oil Age will end long before the world runs out of oil.“ Mit diesen Worten kommentierte der damalige Ölminister von Saudi-Arabien, Scheich Zaki YAMANI, die Ölkrise in den 1970er Jahren (THE ECONOMIST 2003). Der Kommentar des Scheichs ist heute aktueller denn je. Biokraftstoffverbände versprechen eine umfangreiche Ablösung mineralischer Kraftstoffe durch Biokraftstoffe. Damit verkörpern Biokraftstoffe die Lösung für zwei der brisantesten Zukunftsthemen in Deutschland: die hohe Abhängigkeit der Energieversorgung sowie den prognostizierten Klimawandel. Der Einsatz von Biokraftstoffen ist aber durchaus nicht unumstritten. Biokraftstoffe stehen im Verdacht, zu einer Wasser- und Lebensmittelknappheit insbesondere in Entwicklungsländern zu führen; der Anbau von Energiepflanzen in Monokulturen kann irreversible Bodenerosionen zur Folge haben.

Ob nun positiv oder negativ, Biokraftstoffe werden nur dann eine spürbare Wirkung entfalten können, wenn ihr Marktanteil in den nächsten Jahren deutlich zunimmt. Ganz im Gegensatz zu ihrer hohen Popularität, ist die Verbreitung von Biokraftstoffen bislang noch eher gering. Lediglich in Brasilien wird bereits rund die Hälfte des Kraftstoffbedarfs durch Bioethanol gedeckt. In Europa und den USA hingegen ist der Anteil von Biokraftstoffen am Kraftstoffmarkt noch niedrig. In Deutschland beträgt er derzeit beispielsweise noch unter 10%. Die Diskrepanz zwischen der Wahrnehmung von Biokraftstoffen und ihrem tatsächlichen Marktanteil motiviert zu der hier vorliegenden Untersuchung der Verbreitung neuer Technologien am Beispiel von Biokraftstoffen in Deutschland.

Trotz ihrer vergleichsweise geringen Marktanteile haben sich die europäischen Biokraftstoffmärkte in den letzten Jahren dynamisch entwickelt. Allein der europäische Biodieselmärkte ist zwischen 2006 und 2007 um knapp die Hälfte gewachsen. Dies ist insbesondere auf die verstärkte Förderung von Biokraftstoffen zurückzuführen. Bislang zeigen alle Beispiele einer erfolgreichen Biokraftstoffindustrie, welche große Bedeutung die staatliche Förderung für deren Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit hatte. Auch in den USA wurden Biokraftstoffe in den letzten Jahren verstärkt gefördert. Das führte dazu, dass die USA ihre Bioethanolproduktion in den vergangenen 10 Jahren verfünffacht haben und mittlerweile der größte Produzent von Bioethanol weltweit sind. Selbst die großen Mineralölkonzerne haben zur Entwicklung neuer Biokraftstoffe Forschungsprogramme ins Leben gerufen, die Forschungsaktivitäten von ExxonMobil belaufen sich allein auf mehrere Hundert Millionen Euro.

Diese Untersuchung fällt in eine Zeit, die sich als entscheidend für die weitere Verbreitung von Biokraftstoffen erweisen kann. Das öffentliche Interesse an Biokraftstoffen ist so groß

wie noch niemals zuvor und entsprechend hoch fällt auch die Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen aus. Biokraftstoffe konkurrieren nicht mehr nur mit mineralischen Kraftstoffen. Letztlich geht es auch darum, welcher Biokraftstoff und welches Motorenkonzept sich gegen die Vielzahl der anderen durchsetzen werden. In dieser Aktualität und Dynamik des Marktgeschehens liegt eine weitere Motivation zu dieser Untersuchung.

## 1.2 Zielsetzung und Problemstellung

Das Ziel dieser Untersuchung besteht in der politisch-ökonomischen Analyse der Verbreitung von Biokraftstoffen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt dabei auf der anwendungsorientiert-politischen Darstellung und Erklärung der Verbreitung von Biokraftstoffen in Deutschland. Hieraus ergeben sich im Wesentlichen drei Untersuchungsschwerpunkte, die nun kurz beschrieben werden.

Zum Ersten gilt es, die für die Verbreitung von Biokraftstoffen relevanten Diffusionshemmnisse zu identifizieren und auf ihre Wirkungsweise hin zu analysieren. Bei der Vielzahl verschiedener Diffusionshemmnisse ist eine Systematisierung und Kategorisierung im Vorfeld unumgänglich. So werden die Diffusionshemmnisse dem Diffusionsobjekten Produkt, Hersteller, Adopter und politischen Rahmenbedingungen zugeordnet. Die herstellereinspezifischen Diffusionsfaktoren werden dabei mittels eines neoklassischen Diffusionsmodells untersucht. Diese theoretische Analyse ergänzt die ansonsten eher praktisch-politische Ausrichtung der Arbeit. Mit Hilfe eines solchen neoklassischen Diffusionsmodells lässt sich zum einen die Bedeutung der unterschiedlichen Preisbildungsmechanismen erneuerbarer und erschöpfbarer Ressourcen auf die Verbreitung einer neuen Technologie untersuchen. Zum anderen wird auch der Einfluss von Marktkonzentration auf den Markteintritt der neuen Technologie und ihre anschließende Verbreitung untersucht. Durch die modellbasierte Untersuchung dieser beiden Diffusionsfaktoren wird es möglich, die Verbreitung von Biokraftstoffen gegen andere Verbrauchsgüter abzugrenzen. Die Besonderheit von Biokraftstoffen im Vergleich zu anderen Verbrauchsgütern liegt in der Konzentration auf dem Kraftstoffmarkt, auch im Hinblick auf die Konstellation des Weltmarktes für Erdöl, und dem auf dem Markt geltenden Preisbildungsmechanismus. Neben den herstellereinspezifischen Diffusionsfaktoren liegt ein besonderer Fokus der Untersuchung auf den produktbezogenen Diffusionshemmnissen. Hier zeigt sich die enge Verbindung zwischen der Erfindung und ihrer Verbreitung. Die Diffusionshemmnisse werden durch die Eigenschaften und Qualität der neuen Technologie bestimmt. Dabei zeigen Biokraftstoffe bei genauer Betrachtung ein sehr heterogenes Bild, so dass die Beurteilung der produktbezogenen Diffusionshemmnisse immer nur im Hinblick auf einen bestimmten Biokraftstoff vorgenommen werden kann.

Zum Zweiten werden im Anschluss staatliche Instrumente zur Förderung von Biokraftstoffen vorgestellt. Im Wesentlichen zielen diese darauf ab, die verschiedenen Diffusionshemmnisse abzubauen. Die Grundlage für diesen zweiten Untersuchungsgegenstand bildet die Analyse der Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen. Diese legt dabei einen besonderen Fokus auf den Beitrag von Biokraftstoffen zur Erreichung der Klimaziele. Neben der eigentlichen Bewertung des Klimaschutzpotentials verschiedener Biokraftstoffe, beinhaltet diese Analyse insbesondere eine Abschätzung der Kosteneffizienz der Zielerreichung. Die Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen müsste dann verneint werden, wenn das Klimaziel mit anderen Instrumenten kostengünstiger erreicht werden könnte. In diesem Zusammenhang kommt der in dieser Untersuchung durchgeführten Berechnung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Biokraftstoffen eine besondere Bedeutung zu. In ähnlicher Weise wird auch der Beitrag von Biokraftstoffen zu weiteren Zielen untersucht, die üblicherweise mit Biokraftstoffen assoziiert werden, sowie die Rivalität um landwirtschaftliche Flächen thematisiert.

Nach der grundsätzlichen Bestätigung der Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen, werden dann die Instrumente dargestellt und analysiert, die sich zur Förderung von Biokraftstoffen eignen. Abhängig von der Zielsetzung der Förderung kommen dabei in Deutschland und Brasilien andere Instrumente zum Einsatz. Unterschiedliche Zielsetzungen können beispielsweise die kurzfristige Steigerung der Biokraftstoffanteile sein, der Aufbau von Produktionskapazitäten zur Erzielung von Skaleneffekten oder die Förderung von Forschung und Entwicklung zur Sicherung einer nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen. Zur Erreichung dieser Ziele eignen sich nicht alle Förderinstrumente in gleichem Maße. Entsprechend unterschiedlich sind die Biokraftstoffstrategien von Deutschland und Brasilien gestaltet.

Zum Dritten gilt es nach diesen Vorarbeiten, die Wirkung der staatlichen Förderung von Biokraftstoffen hinsichtlich ihres Erfolgs zu überprüfen. Untersucht wird dabei die Wirkung der steuerlichen Behandlung von Biodiesel auf die Verbreitung des Biokraftstoffs. Die grundlegenden Ergebnisse lassen sich jedoch auch auf andere Biokraftstoffe übertragen. Die Untersuchung wird dabei in zwei Teilschritten durchgeführt. Zunächst wird in einem ersten Schritt die Absatzwirkung des Tankstellenpreises für Biodiesel untersucht. Nachdem diese grundsätzlich bestätigt worden ist, kann in einem zweiten Schritt der Einfluss der steuerlichen Behandlung auf die Tankstellenpreise von Biodiesel untersucht werden. Im Ergebnis kommt die Untersuchung so zu einer Beurteilung der Effizienz von Steuerbefreiungen als Instrument der Förderung von Biokraftstoffen.

Im Hinblick auf das sehr weite Themengebiet dieser Untersuchung wurden im Verlauf dieses Dissertationsvorhabens einige Einschränkungen der Betrachtungen nötig. Geographisch beschränkt sich die Untersuchung dabei auf die Biokraftstoffmärkte in Deutschland und Brasilien und berücksichtigt die jeweiligen Gegebenheiten beim Anbau der Energiepflanzen und der Produktion von Biokraftstoffen. Weiterhin wird ausschließlich die Diffusion von Bio-

kraftstoffen als Substitut für mineralische Kraftstoffe beim privaten und gewerblichen Transport untersucht. Im Wesentlichen bedeutet dies ein Einsatz von Biokraftstoffen im Straßenverkehr. In der Luftfahrt oder der Schifffahrt spielen Biokraftstoffe bislang praktisch keine Rolle. Durch diese Beschränkung auf den Transport werden andere Nutzungsmöglichkeiten von Biokraftstoffen ausgeschlossen. Eine weitere Verbreitung von Biokraftstoffen wäre beispielsweise auch durch die Zufeuerung in Kraftwerken denkbar, soll hier jedoch vernachlässigt werden.

### 1.3 Gang der Untersuchung

Im Anschluss an diese Einleitung wird zunächst in **Kapitel 2** die volkswirtschaftliche Diffusionsforschung dargestellt und in den weiteren Rahmen der Diffusionsforschung eingeordnet. Hierdurch wird insbesondere auch die Relevanz der vorliegenden Untersuchung deutlich. Dem Kapitel kommt auch insofern eine besondere Bedeutung für die weitere Untersuchung zu, als hier die Systematisierung und Kategorisierung der verschiedenen Diffusionsfaktoren vorgenommen wird. Detailliert werden diese in den folgenden Kapiteln untersucht und so stellt Kapitel 2 das verbindende Element der anschließenden Ausführungen dar.

**Kapitel 3** fokussiert so diejenigen Diffusionsfaktoren, die dem Biokraftstoffmarkt eigen sind und ihn von anderen Märkten unterscheiden: der vorherrschende Preisbildungsmechanismus und die Marktkonzentration. Entsprechend nimmt die Diffusion von Biokraftstoffen auch einen anderen Verlauf und die Ergebnisse des Kapitels sind nicht übertragbar auf andere Verbrauchsgüter. Der Beginn und der Verlauf der Diffusion von Biokraftstoffen werden mittels eines neoklassischen Diffusionsmodells untersucht.

Eher anwendungsorientiert werden in **Kapitel 4** die verschiedenen Produkteigenschaften von Biokraftstoffen detailliert untersucht und einem Vergleich mit den Eigenschaften mineralischer Kraftstoffe unterzogen. Das schließt die Untersuchung der Rohstoffbasis und des Herstellungsprozesses ein. Auf diese Weise lassen sich die produktspezifischen Diffusionsfaktoren von Biokraftstoffen identifizieren und bewerten. Der erste Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit wird im Wesentlichen durch die Ausführungen in den Kapiteln 2 bis 4 bearbeitet.

**Kapitel 5** macht den Schritt zum zweiten Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Untersucht wird zunächst die Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen, bevor dann die staatlichen Instrumente zur Förderung der Diffusion dargestellt und analysiert werden. Abhängig von den unterschiedlichen Gegebenheiten und der Intention der Zielsetzung ergibt sich hier ein anderer Instrumenteneinsatz. Dies wird insbesondere durch den Vergleich der deutschen Biokraftstoffstrategie mit dem brasilianischen Proálcool Programm deutlich.

**Kapitel 6** schließlich untersucht den Erfolg der steuerlichen Behandlung von Biodiesel hinsichtlich dessen Verbreitung in Deutschland. Diesem dritten Untersuchungsgegenstand vorangestellt werden die Beschreibung des deutschen Biokraftstoffmarkts sowie die Darstellung seiner Entwicklung in den vergangenen Jahren.

Die Arbeit schließt mit einer politisch-ökonomischen Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse in **Kapitel 7**.

## 2 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE DIFFUSIONSFORSCHUNG

Der Begriff Diffusion umfasst eine Vielzahl verschiedenster Vorgänge in nahezu allen Disziplinen der Wissenschaft. Von Diffusion spricht man bei der Verbreitung von Nachrichten, wie beispielsweise der Nachricht vom Fall der Berliner Mauer, ebenso wie bei der Ausbreitung von Bakterien in einer Petrischale. Entsprechend werden Diffusionsphänomene auch in den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen untersucht. Geistes- wie auch Naturwissenschaftler forschen auf diesem Gebiet.

Ihren Ursprung fand die Diffusionsforschung im frühen 20. Jahrhundert jedoch in der Anthropologie (KORTMANN 1994: 33). Analysiert wurde hierbei hauptsächlich die „intersozietale Ausbreitung zivilisatorischer Errungenschaften“ (KAAS 1973b: 5). Der Anteil anthropologischer Veröffentlichungen auf diesem Forschungsgebiet nahm im Zeitverlauf jedoch deutlich ab und ist heute vergleichsweise gering. Bis Mitte der 1990er Jahre war die Diffusionsforschung dann hauptsächlich durch agrarwissenschaftliche Ansätze geprägt und agrarwissenschaftliche Untersuchungen umfassten rund 25% aller Veröffentlichungen in der Diffusionsforschung (HINTEMANN 2000: 22). Heute dominieren die Diffusionsforschung jedoch Untersuchungen unter Marketing Aspekten. Im Mittelpunkt steht dabei die Ableitung absatzpolitischer Maßnahmen zur Beeinflussung des Diffusionsprozesses.

Entsprechend dieser Vielfältigkeit ist die Diffusionsforschung von besonders fachübergreifendem Charakter. Wenngleich der wissenschaftliche Fortschritt und die Ausdifferenzierung der Erkenntnisbereiche eine zunehmende Spezialisierung erforderlich gemacht haben, so konnte sich die Diffusionsforschung in ihrer Forschungstradition doch bis heute einen besonders hohen Grad interdisziplinärer Zusammenarbeit bewahren.

So kann auch die Verbreitung von Biokraftstoffen zum Untersuchungsgegenstand in unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen der Diffusionsforschung werden. Im Wesentlichen wird die Diffusion von Biokraftstoffen in agrarwissenschaftlichen Veröffentlichungen und unter Marketingaspekten diskutiert. In dieser Arbeit wird die Verbreitung von Biokraftstoffen unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Gleichwohl wird es auch hierbei Überschneidungen mit anderen Wissenschaftsdisziplinen geben, etwa wenn der Beitrag von Biokraftstoffen zur Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands untersucht wird.

Die volkswirtschaftliche Ausrichtung dieser Arbeit macht die Auseinandersetzung mit der volkswirtschaftlichen Diffusionsforschung notwendig. Die theoretische Analyse der Diffusion einer Innovation wird im nächsten Kapitel anhand eines neoklassischen Modellansatzes durchgeführt. Diesen gilt es zuvor in die volkswirtschaftliche Diffusionsforschung einzuordnen und seine Bedeutung auch gegenüber anderen volkswirtschaftlichen Modellansätzen herauszustellen. Die Diffusion einer Innovation spielt sich stets im Rahmen eines Diffusionssys-

tems ab. Dessen Elemente können jeweils die Diffusion fördern oder aber sie hemmen. Zunächst jedoch wird zum besseren Verständnis des Diffusionsprozesses sowie zur Schaffung einer einheitlichen terminologischen Basis der Innovationszyklus dargestellt.

## 2.1 Der Innovationszyklus

In der Diffusionsforschung existiert eine Vielzahl unterschiedlicher wissenschaftlicher Ansätze, die allerdings einer gemeinsamen terminologischen Grundlage entbehren. Über die Begriffe „Invention“, „Innovation“ und „Diffusion“ bestehen verschiedene Auffassungen, so dass für diese Untersuchung zunächst eine eindeutige Begriffsklärung vorgenommen werden muss.

Allgemein gesprochen bezeichnet der Begriff Innovation das aus einer Invention resultierende neue Produkt bzw. das neue Produktionsverfahren. Daher wird üblicherweise in Bezug auf den Gegenstand der Neuerung zunächst zwischen Produktinnovationen und Prozessinnovationen unterschieden. Produktinnovationen schließen neben neuen Gütern auch Verbesserungen in der Qualität von Gütern ein. Demgegenüber bedeuten Prozessinnovationen eine Verbesserung des Produktionsverfahrens und damit eine größere Leistung der Produktionsmittel (OTT 1992: 964). Die Trennung zwischen diesen beiden Kategorien ist jedoch oftmals nicht eindeutig zu vollziehen. Wie HINTEMANN (2000: 15) anmerkt, muss für die Herstellung neuer Produkte häufig auch der Produktionsprozess geändert werden. Umgekehrt kann eine Verbesserung des Produktionsverfahrens gleichzeitig auch eine Erhöhung der Produktqualität zur Folge haben (FELS/SCHMIDT 1984: 86). Hinsichtlich des Grads der Neuerung wird darüber hinaus zwischen Basisinnovation und Verbesserungsinnovationen unterschieden. Während es sich bei Basisinnovationen um neuartige Technologien handelt, wird die Modernisierung oder Rationalisierung einer bestehenden Technologie als Verbesserungsinnovationen bezeichnet.

Der Innovation sachlich wie zeitlich vorgelagert ist die Invention. Sie bezeichnet die Generierung von Neuerungen durch Forschungsaktivitäten. Gewöhnlich beginnt der Prozess der Invention mit dem Erkennen oder Vermuten eines Problems oder eines ungedeckten Bedarfs. In der Folge werden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten mit dem Ziel angeregt, das vorliegende Problem zu lösen bzw. den bestehenden Bedarf zu decken. Das hervorstechendste Wesensmerkmal in dieser Phase des Innovationszyklus ist der hohe Grad der Unsicherheit nicht nur über die Möglichkeiten zur Realisierung einer Invention sondern auch über einen möglichen zeitlichen Vorsprung der im Forschungswettbewerb befindlichen Unternehmen (ROGERS 1983: 140). Nach dieser anfänglichen Inventionsphase folgt die Phase der Entwicklung (KORTMANN 1994: 12). Hierbei gewinnt die Invention eine praktikable Gestalt, von der angenommen wird, dass sie den Bedürfnissen potentieller Abnehmer entspricht. Greifbares Resultat dieser Entwicklungsphase ist die Innovation.

Wird eine solche Innovation von einer Gesellschaft nicht augenblicklich, sondern erst sukzessive akzeptiert und übernommen, dann spricht man üblicherweise von einem Diffusionsprozess (BÖCKER/GIERL 1987: 688). Diffusion ist demnach die Verbreitung einer Neuerung von der Quelle ihrer Schöpfung bis hin zu ihrem Adopter (WALTER 1985: 33). Die Begriffe Verbreitung und Diffusion werden daher in den meisten Untersuchungen synonym verwendet. Allerdings meinen einige wenige Autoren auch andere Inhalte, wenn sie von Diffusion sprechen. Insbesondere in der älteren Literatur bezeichnet der Begriff der Diffusion den Prozess der Verbreitung von Informationen über ein Produkt und die Einstellungs- und Meinungsbildung zu dem neuen Produkt, welche durch die ablaufenden Kommunikationsprozesse stattfindet. Nach diesem Verständnis beruht die Verbreitung einer Neuerung auf zwei Prozessen: auf der Diffusion und auf der induzierten Ausbreitung (HINTEMANN 2000: 7). Von induzierte Ausbreitung spricht beispielsweise BONUS (1975: 30ff), wenn die Entscheidung zur Übernahme des Produktes durch die Änderung des Preises, der Qualität oder der Einkommen der potentiellen Adopter begründet ist, während die Übernahme des Produkts aufgrund von Informations- und Kommunikationsvorgängen als Diffusion bezeichnet wird. Im Rahmen dieser Untersuchung ist eine solche Unterscheidung, wie BONUS sie trifft, jedoch wenig zweckmäßig. Die folgenden Ausführungen verwenden die Begriffe Verbreitung und Diffusion daher synonym.

Invention, Innovation und Diffusion bilden folglich ein gemeinsames System. Dabei bestimmen unter anderem die Eigenschaften der Innovation die Art und Weise ihrer Verbreitung. Sie gehen in die Überlegungen eines potentiellen Käufers zur Übernahme der Innovation ein. Oftmals werden die intrapersonellen Abläufe bei der Übernahme einer Neuerung aus der Diffusionsforschung ausgegliedert und als Adoptionsforschung bezeichnet. Unter Adoption versteht man den Prozess der Übernahme einer Neuerung durch den sog. Adopter. Dabei kann es sich um Individuen oder auch um Personengruppen, wie beispielsweise Haushalte, Unternehmen oder Gemeinden handeln (KAAS 1973a: 3). Der Adoptionsprozess zeichnet sich durch die Aufeinanderfolge verschiedener Bewusstseinsphasen aus, in denen sich beim Adopter eine Einstellung zu der Neuerung bildet, die sich schließlich in der Kaufentscheidung oder Ablehnung der Innovation manifestiert (ROGERS 1995: 3). Die wissenschaftliche Adoptionsforschung beinhaltet daher überwiegend psychologische Ansätze zur Erklärung des Verhaltens von Konsumenten. Im Sinne des Ziels dieser Untersuchung wird hier eine engere Sichtweise der Diffusionsforschung unterstellt, welche die verhaltensorientierten Aspekte der Adoption einer Innovation bewusst vernachlässigt.

## 2.2 Einordnung des neoklassischen Modellansatzes in die volkswirtschaftliche Diffusionsforschung

Die Diffusionsforschung unterscheidet unabhängig von der jeweiligen wissenschaftlichen Disziplin im Wesentlichen vier Untersuchungsschwerpunkte. Diese sind:

1. Die Ermittlung und Analyse von Einflussgrößen auf den Diffusionsprozess
2. Die Beschreibung, Analyse und Prognose von Diffusionsprozessen
3. Die Ableitung und Begründung von Maßnahmen zur Steuerung der Diffusion
4. Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen gesamtwirtschaftlicher Entwicklung und der Diffusion von Innovationen

Diese Untersuchungsschwerpunkte sind dabei in einer logischen Reihenfolge miteinander verknüpft (HINTEMANN 2000: 25). Der Ermittlung und Analyse von Einflussgrößen auf den Diffusionsprozess kommt dabei insofern eine besondere Bedeutung zu, als diese den Ausgangspunkt für die Untersuchung des Diffusionsprozesses und die Ableitung und Begründung von Maßnahmen zu dessen Steuerung bildet. Diese vier Untersuchungsschwerpunkte fallen je nach wissenschaftlicher Disziplin völlig unterschiedlich aus. Während in der biologischen Diffusionsforschung die Temperatur einer Petrischale eine Einflussgröße für die Diffusion der sich darin befindenden Bakterien ist, hängt die Verbreitung einer Innovation in einer bestimmten Region unter Marketingaspekten unter anderem von der Zusammensetzung der Bevölkerung ab. Je mehr Individuen zur Zielgruppe der Innovation gezählt werden können, umso schneller wird sich diese *ceteris paribus* auch verbreiten.

Die volkswirtschaftliche Diffusionsforschung hat das vorrangige Ziel, ein prinzipielles Verständnis wirtschaftlicher Entwicklungsvorgänge zu erlangen, beispielsweise um daraus wirtschaftspolitische Konsequenzen ableiten zu können. Hierzu bedient sie sich hierzu unterschiedlicher Modelle. Die zwei populärsten sollen nun kurz umrissen werden. Im Anschluss daran wird das in dieser Arbeit zur Analyse des Diffusionsprozesses verwendete neoklassische Modell in die bestehende Modelllandschaft eingeordnet.

Am häufigsten findet sich in der Diffusionsforschung das Epidemische Modell. Auch in der volkswirtschaftlichen Diffusionsforschung wird dieses häufig eingesetzt und dient dabei auch zur Prognose der Diffusionsgeschwindigkeit. Epidemische Modelle liefern eine Erklärung dafür, weshalb selbst die Diffusion einer dominanten Innovation unerwartet langsam verlaufen kann. Sie basieren auf der Annahme, dass der Diffusionsprozess durch die Information über die Innovation limitiert wird (GEROSKI 1999: 5). Wenn den potentiellen Adoptern keine Informationen über die Existenz eines überlegenen Substituts vorliegen, dann kann sich diese Innovation auch nicht verbreiten. Nach der Bezeichnung des Modells läuft der Diffusionsprozess analog zu einer Epidemie ab. Der Adopter der Innovation gibt die Information über die Innovation an andere potentielle Adopter weiter, die dann ebenfalls die Innovation überneh-

men. Bei diesem Modell ergibt sich die typische S-Kurve der Verbreitung einer Innovation. In den frühen Stufen des Diffusionsprozesses verbreitet sich die Innovation nur langsam, weil es wenige Adopter gibt, die Informationen über die Innovation weitergeben können. In späteren Stufen des Diffusionsprozesses mit einer ungleich höheren Zahl von Adoptern verlangsamt sich die Diffusion ebenfalls wieder, weil die Chancen beträchtlich gesunken sind, dass ein Adopter auf einen potentiellen Adopter trifft, der die Innovation noch nicht übernommen hat. Geht es um die Diffusion einer Neuigkeit wie dem eingangs dieses Kapitels bereits erwähnten Fall der Berliner Mauer, dann ist ein solches Epidemisches Modell sicherlich die beste Wahl. Bei der Diffusion von Produktinnovation oder Prozessinnovationen hingegen kann es zu Schwierigkeiten kommen, denn üblicherweise verbreitet sich eine Information über eine Produktinnovation schneller als das Produkt an sich. Zur Darstellung und Untersuchung des Diffusionsprozesses bei Biokraftstoffen sind Epidemische Modelle wenig geeignet. Die Annahme, dass die Information über die Existenz einer biogenen Alternative zu mineralischen Kraftstoffen einen limitierenden Faktor für die Diffusion von Biokraftstoffen darstellt, ist nicht gerechtfertigt. Dies gilt in entsprechender Weise auch für die Informationen über die Produktqualitäten von Biokraftstoffen. Zwar bestehen hier tatsächlich gravierende Informationsdefizite, allerdings erweisen sich diese nicht als die entscheidenden Hemmnisse der Diffusion von Biokraftstoffen. Epidemische Modelle sind für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit folglich nicht zweckmäßig.

In gewisser Weise stellen Probit Modelle eine Alternative zu Epidemischen Modellen dar. Die Namensgebung leitet sich dabei von dem bekannten Probit Modell aus der Statistik ab. So basieren die Probit Modelle der Diffusionsforschung auf der Annahme, dass die Unterschiede in der Übernahmezeit einer Innovation in den unterschiedlichen Zielsetzungen oder Bedürfnissen der potentiellen Adopter begründet sind (KARSHENAS/STONEMAN 1993: 504, GEROSKI 2000: 610). Entsprechend unterschiedlich fällt die Wertschätzung des potentiellen Adopters für die Innovation aus. Die Übernahmeentscheidung eines potentiellen Adopters wird hier in der Regel mit einem Schwellenwert modelliert, ab welchem die Übernahme stattfindet. Sinkt im Zeitverlauf durch technologischen Fortschritt oder Skaleneffekten der Marktpreis der Innovation, dann übernehmen auch diejenigen potentiellen Adopter mit einer geringeren Wertschätzung die Innovation. Probit Modelle werden in der volkswirtschaftlichen Diffusionsforschung immer beliebter, stellen sie doch die individuellen Entscheidungen in den Fokus der Diffusion. Probit Modelle können eine Vielzahl verschiedener Diffusionshemmnisse untersuchen. Mögliche Wechselkosten, Kosten für Informationssuche oder Opportunitätskosten bestimmen den Diffusionsprozess von Biokraftstoffen und anderen Innovationen. Gleichwohl berücksichtigen Probit Modelle nicht den wettbewerblichen Kontext, in dem sich eine Innovation verbreiten muss. Existiert ein gleichwertiges Substitut, das die potentiellen Adopter zu einem geringeren Preis erwerben können, dann wird sich die Innovation trotz ausreichender Wertschätzung durch die potentiellen Adopter nicht verbreiten. Für Biokraftstoffe, die sich als

Substitut auf einem von mineralischen Kraftstoffen beherrschten Markt behaupten müssen, ist jedoch das Verhältnis der Marktpreise ein entscheidender wenn nicht sogar der entscheidende Bestimmungsfaktor ihrer Verbreitung. Probit Modelle kommen daher ebenso wenig wie Epidemische Modelle für die Untersuchung der Fragestellungen dieser Arbeit in Frage.

Probit Modelle gehören zur Rational Choice Theory nach dem Nobelpreisträger Daniel MC-FADDEN. Sie sind die populärsten unter den wenigen volkswirtschaftlichen Diffusionsmodellen, die auf dem Gedankengut der neoklassischen Theorie aufbauen. Üblicherweise erfolgt die Modellierung in der volkswirtschaftlichen Diffusionsforschung weitestgehend abgelöst vom neoklassischen Grundmodell. Es wird argumentiert, dass die Grundannahmen des neoklassischen Modells eine sprunghafte Verbreitung der Innovation implizieren. Jedes Individuum, für welches die Adoption vorteilhaft wäre, würde die Innovation sofort übernehmen. Dies widerspricht dem in der Realität zu beobachtenden S-förmigen Verlauf der Verbreitung von Innovationen.

Probit Modelle beachten jedoch ebenso wenig wie andere Modelltypen den Wettbewerb als Motor oder Bremse der Diffusion von Innovationen. Gerade im Kraftstoffmarkt ist es nahe liegend, dass die vorherrschende Marktstruktur eine entscheidende Bedeutung für die Verbreitung von Biokraftstoffen hat. Diese Feststellung hebt aber nicht nur auf die oligopolistische Angebotsstruktur von Erdöl ab. Eine hohe Marktkonzentration lässt den Aufbau von strategischen Markteintrittsbarrieren zu, etwa durch limit pricing, predatory pricing oder Überkapazitäten. Wird der Markteintritt eines Biokraftstoffproduzenten behindert, dann folgt hieraus natürlich unmittelbar eine verzögerte oder auch verlangsamte Diffusion von Biokraftstoffen. Vielmehr unterscheiden sich Biokraftstoffe auch hinsichtlich ihrer Preisbildung von mineralischen Kraftstoffen. Im Gegensatz zu mineralischen Kraftstoffen bzw. fossilem Erdöl sind sie reproduzierbar und folgen daher einem anderen Preisbildungsmechanismus als endliche Ressourcen wie Erdöl. Das Zusammenspiel der beiden Preisbildungsmechanismen hängt ebenso von der Marktstruktur ab wie der Aufbau strategischer Markteintrittsbarrieren.

Die üblicherweise in der volkswirtschaftlichen Diffusionsforschung zur Analyse des Diffusionsablaufs herangezogenen Modelle können die Berücksichtigung des auf dem Markt vorherrschenden Wettbewerbs und der geltenden Preisbildungsmechanismen nicht leisten. Die wenigen Ökonomen, die sich bislang mit dem wettbewerblichen Kontext der Diffusion einer Innovation beschäftigt haben, kommen zwar zu dem Schluss, dass sich erfolgreiche Innovationen „unter dem Druck des Wettbewerbs ausbreiten“ werden (METTLER 1988: 196), ohne diese pauschale Aussage jedoch mit entsprechenden Untersuchungsergebnissen zu untermauern. PARKER (1988: 1) bringt dies auf den Punkt: „The explicit inclusion of competitive markets in the theory of innovations is virtually nonexistent“. Ebenso wenig kann mit ihnen die unterschiedliche Preisbildung von Biokraftstoffen im Vergleich zu mineralischen Kraftstoffen untersucht werden. Gerade diese macht jedoch auch den Reiz bei der Untersuchung der Diffu-

sion von Biokraftstoffen aus. Daher wird im Folgenden das bekannte HOTELLING Modell zur Analyse der Preise und Extraktionsmengen erschöpfbarer Ressourcen im Zeitverlauf um eine erneuerbare Backstoptechnologie erweitert. Dabei wird anders als in der neoklassischen Tradition üblich von der Annahme konstanter Grenzkosten der Produktion abgewichen. Auf diese Weise lässt sich die sprunghafte und sofortige vollständige Übernahme des erneuerbaren Substituts vermeiden. Ein solches neoklassisches Diffusionsmodell kann die grundsätzliche Funktionsweise der Diffusion von Biokraftstoffen im Hinblick auf den bestehenden Wettbewerb und die Endlichkeit der mineralischen Kraftstoffe darstellen.

In der Innovationsforschung spielt der Wettbewerb als Motor für Inventionen und Innovationen eine entscheidende Rolle. Hingegen wurde der Untersuchung, welche Rolle dem marktwirtschaftlichen Leistungswettbewerb bei der Verbreitung von Innovationen zukommt, bisher in der volkswirtschaftlichen Diffusionsforschung wenig Bedeutung beigemessen. Die Untersuchung soll dazu beitragen, die Diskussion um den möglichen Beitrag neoklassischer Modelle zur Diffusionsforschung anzuregen.

### 2.3 Kategorisierung der Einflussfaktoren der Diffusion von Biokraftstoffen

So vielfältig wie die verschiedenen Diffusionsprozesse sind auch die Einflussfaktoren der Diffusion einer Innovation. Zur Analyse des Diffusionsprozesses wird als erster Schritt daher häufig und auch in dieser Arbeit die Systematisierung der unterschiedlichen Determinanten gewählt. Auf diese Weise werden die grundlegenden Strukturen des Diffusionssystems verdeutlicht und Interdependenzen zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren aufgezeigt. Ein solcher Überblick muss der später folgenden Analyse einzelner Einflussfaktoren der Diffusion von Biokraftstoffen vorangestellt werden. Auf diese Weise bleibt die Übersichtlichkeit der folgenden Analysen und Ausführungen insbesondere bei der Vielzahl der unterschiedlichen Einflussfaktoren gewahrt.

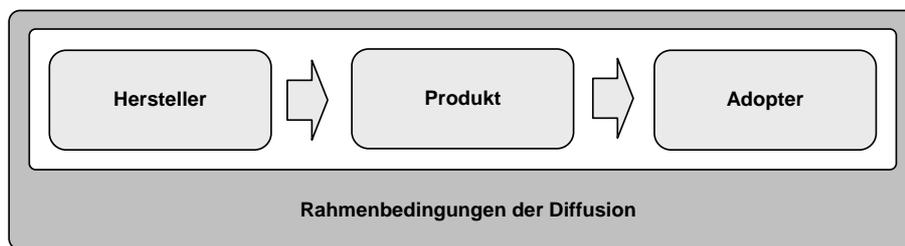
Abhängig von den Charakteristika der betrachteten Innovation hält die wissenschaftliche Literatur verschiedene Systematisierungsansätze bereit. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Kategorisierung der Determinanten des Diffusionsprozesses. Für die Untersuchung der Diffusion von Biokraftstoffen wurde ein objektorientierter Systematisierungsansatz<sup>1</sup> gewählt, den

---

<sup>1</sup> Der objektorientierte Systematisierungsansatz gehört zu den drei heute gängigen Ansätzen, wie auch der Systematisierungsansatz nach BONUS (1968), der später von HESSE (1987) weiterentwickelt wurde. BONUS unterstellt, dass sich der Einfluss der Bestimmungsvariablen abhängig vom Grad der Verbreitung der Innovation verändern kann. Diesbezüglich unterscheidet er zwischen diffusionsendogenen und diffusionsexogenen Faktoren. Während beispielsweise die Kommunikation zwischen den potentiellen Adoptern als abhängig vom Fortschritt der Diffusion angenommen werden kann, dürfte die Höhe des Preises in den meisten Fällen diffusionsexogen, also unabhängig vom Grad der Diffusion, sein. Ein weiterer gängiger Ansatz legt der Systematisierung das Element des Diffusionsprozesses zu Grunde, auf welches sich die Einflussgrößen auswirken. GIERL (1987) unterscheidet bei seinem Ansatz zwischen Einflussgrößen, die sich auf das Diffusionspotential einer Innovation (Diffusionsvoraussetzungen) und solchen, die sich auf die Schnelligkeit der Adoption (Diffusionsfaktoren) auswirken. Dieser Systematisierungsansatz erscheint für den vorliegenden Fall der Verbreitung von Biokraftstoffen

in ähnlicher Weise auch schon SCHMALEN (1993), SCHMALEN ET AL. (1993a, 1993b) oder HINTEMANN (2000) ihren jeweiligen Untersuchungen zu Grunde gelegt haben. Bei der objektorientierten Systematisierung werden die verschiedenen Einflussgrößen des Diffusionsprozesses hinsichtlich der im Diffusionssystem jeweils vorhandenen Objekte unterschieden. Dieser objektorientierte Systematisierungsansatz wird insbesondere in der wirtschaftswissenschaftlichen Diffusionsforschung zu Grunde gelegt, während er in anderen Forschungsrichtungen der Diffusionsforschung nur selten bemüht wird. Er entspricht im Wesentlichen dem neoklassischen Gedankengut und stellt damit eine konsistente Vorgehensweise in dieser Arbeit sicher.

**Abbildung 2.1 Die Objekte im Diffusionssystem**



Quelle: Eigene Darstellung

Betrachtet man das Diffusionssystem bei Biokraftstoffen, den Kraftstoffmarkt, so lassen sich vier grundlegende Objekte identifizieren. Abbildung 2.1 entsprechend steht mit dem **Produkt** auch das erste Objekt des Diffusionssystems im Mittelpunkt des Diffusionsprozesses. Zwei weitere Objekte sind die **Hersteller**, die dieses Produkt auf dem Markt der Gruppe der potentiellen Adopter anbieten und jene potentiellen **Adopter** selbst. Schließlich lassen sich die **Rahmenbedingungen** der Diffusion als viertes Diffusionsobjekt identifizieren. Zu diesen Rahmenbedingungen zählen u.a. die staatlichen Maßgaben, nach denen der Handel auf dem jeweiligen Markt erfolgt.

Im Folgenden werden diese vier Objekte des Diffusionssystems von Biokraftstoffen nun überblicksartig und mit einer Auswahl der jeweils wichtigsten Einflussfaktoren der Diffusion dargestellt. Die Darstellung erhebt somit keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Ein solcher Anspruch ist im Hinblick auf die zu untersuchende Fragestellung und vor dem Hintergrund der Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren ohnehin nicht Ziel führend für diese Arbeit. Die hier vorgenommene, naturgemäß unvollständige Darstellung kann jedoch die vielfältigen Interdependenzen zwischen den einzelnen Einflussfaktoren aufzeigen und einen ersten Eindruck von deren Wirkungsweise vermitteln. Dieser Abschnitt ist daher als gedanklicher Rah-

---

passender als die Systematisierung nach BONUS. So stellt beispielsweise die auf absehbare Zeit begrenzte Verfügbarkeit von Biokraftstoffen, wie dargestellt, zur Deckung des Kraftstoffbedarfs eine Beschränkung des Diffusionspotentials dieser Innovation dar. Hingegen ist der Druck zur gesellschaftlichen Konformität zu den Diffusionsfaktoren zu zählen.

men für die detaillierte Untersuchung der Wirkungsweise und des Wirkungsumfangs ausgewählter Einflussfaktoren zu sehen, die in den nächsten Kapiteln vorgenommen wird.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung der verschiedenen Biokraftstoffe mit ihren jeweils spezifischen Eigenschaften. Insbesondere in Kapitel 4 werden die dem Diffusionsobjekt **Produkt** zugeordneten Einflussfaktoren genauer analysiert. Die Beurteilung der spezifischen Produkteigenschaften findet bei den potentiellen Adoptern abhängig vom Grad der Neuerung der Innovation auf absolute Weise oder darüber hinausgehend im Vergleich mit anderen Produkten auf relative Weise statt. Der komplexe Prozess der Meinungsbildung findet bei der Basisinnovation naturgemäß in einem konkurrenzlosen Raum statt. Demgegenüber handelt es sich bei Verbesserungsinnovationen wie Biokraftstoffen stets um Produkte, die als Substitut in Konkurrenz zu bereits erhältlichen Produkten stehen. Für Biokraftstoffe bedeutet dies, dass die potentiellen Adopter die verschiedenen Biokraftstoffe immer auch im Vergleich mit anderen Biokraftstoffen und mineralischer Kraftstoffen beurteilen.

So weisen Biokraftstoffe gegenüber mineralischen Kraftstoffen einige Vorzüge, aber auch einige gravierende Nachteile auf. Dabei bestehen die Vorteile von Biokraftstoffen zumeist in positiven Externalitäten bzw. der Vermeidung von negativen Externalitäten durch den Ersatz mineralischer Kraftstoffe. Hierzu gehören beispielsweise die in Kapitel 5 diskutierte positive Klimawirkung von Biokraftstoffen, deren Ressourcen schonende Wirkung oder auch die vielzitierte Erhöhung der Versorgungssicherheit. Diese Vorzüge, die Biokraftstoffe gegenüber mineralischen Kraftstoffen bieten, können jedoch nur in sehr begrenztem Umfang als produktbezogene Einflussfaktoren der Diffusion betrachtet werden. Für die individuelle Übernahmeentscheidung der potentiellen Adopter sind sie von nachrangiger Bedeutung. Für die potentiellen Adopter von höherer Relevanz ist beispielsweise die Kompatibilität mit den vorhandenen Motorenkonzepten. Während diese in Brasilien aufgrund der hohen Zahl an Flexible-Fuel Fahrzeugen als unproblematisch angesehen werden kann, trifft dies für Deutschland und Europa weit weniger stark zu. Die Fahrzeugmotoren sind ab Werk zunächst auf den Betrieb mit mineralischen Kraftstoffen als dem vorherrschenden Kraftstoffkonzept ausgerichtet. Entsprechend müssen zum Betrieb mit einem Kraftstoffgemisch, das einen hohen Biokraftstoffanteil enthält, zunächst die Motoren entsprechend angepasst werden. Dieser produktspezifische Einflussfaktor der Diffusion von Biokraftstoffen wird zusammen mit weiteren Einflussfaktoren in Kapitel 4 untersucht.

Im Vergleich zu den anderen Diffusionsobjekten kommt dem Diffusionsobjekt Produkt eine exponierte Stellung zu. Von den produktbezogenen Einflussfaktoren der Diffusion hängt nicht nur der Verlauf der Diffusion ab. Im Gegensatz zu den anderen Diffusionsobjekten bestimmt das Diffusionsobjekt Produkt letztendlich darüber, ob es überhaupt zur selbständigen Verbreitung der Innovation kommt. Können Biokraftstoffe ihren Zweck nicht oder nicht so gut wie mineralische Kraftstoffe erfüllen, dann wird es nicht zu einer selbständigen Verbreitung die-

ser Innovation kommen. Biokraftstoffe sind hierfür das beste Beispiel. Ohne Förderung von staatlicher Seite konnte die Verbreitung von Biokraftstoffen bislang in keinem Land beginnen. Dabei kommen unterschiedliche Fördermaßnahmen in Frage, abhängig davon, ob die Produkteigenschaften auf absolute Weise oder im Vergleich mit den Produkteigenschaften mineralischer Kraftstoffe eine selbständige Verbreitung verhindern.

Entscheidend für die Diffusion des Produktes sind dabei oftmals weniger seine tatsächlichen als vielmehr die von den potentiellen Adoptern wahrgenommenen Eigenschaften. Diese Informationsproblematik wird unter anderem bei DICHTL (1991: 149) diskutiert. In dieser Arbeit wird sie in Kapitel 7 im Rahmen einer politisch-ökonomischen Zusammenfassung dieser Untersuchung wieder aufgegriffen.

Hinsichtlich der **Hersteller** der Innovation ist es in der Literatur unumstritten, dass diese einen erheblichen Einfluss auf den Diffusionsprozess ausüben können (HINTEMANN 2000: 123). Letztlich ersetzen Biokraftstoffe als Substitute die mineralischen Kraftstoffe. Die Nachfrage nach Kraftstoff wird zwischen Biokraftstoffen und den mineralischen Kraftstoffen aufgeteilt. Mit einer steigenden Gesamtkraftstoffnachfrage durch die Existenz von Biokraftstoffen ist nur sehr begrenzt rechnen. Der Fall, dass Konsumenten Kraftstoff nur dann nachfragen, wenn dieser biogenen Ursprungs ist, soll nicht ausgeschlossen werden. Der Umfang wird jedoch als vernachlässigbar eingeschätzt. Die Diffusion von Biokraftstoffen geht somit zwangsläufig einher mit einer gegenläufigen Entwicklung bei mineralischen Kraftstoffen. Daher wird die Marktmacht der Hersteller bzw. die auf dem Kraftstoffmarkt vorherrschende Marktstruktur zu einem wichtigen Einflussfaktor der Verbreitung von Biokraftstoffen. Die theoretische Analyse des Diffusionsprozesses in Kapitel 3 mittels eines neoklassischen Diffusionsmodells wird dies bestätigen.

Neben der Marktstruktur werden üblicherweise zwei weitere Objektdimensionen des Diffusionsobjekts Hersteller unterschieden: die Eigenschaften und das Verhalten der Hersteller. Alle drei Dimensionen sind nicht getrennt voneinander zu betrachten, vielmehr bestehen starke Interdependenzen. Das Verhalten der Hersteller als dritte Objektdimension hängt ab von der jeweiligen Marktstruktur. Diese wiederum ergibt sich aus den Größenverhältnissen und anderen Eigenschaften der Hersteller. So kann ein Hersteller einer Innovation das absatzpolitische Instrumentarium abhängig von seiner jeweiligen Größe in anderem Umfang nutzen, um die Diffusion zu beschleunigen. Umgekehrt gelingen einem Hersteller der Aufbau strategischer Markteintrittsbarrieren und damit die Verzögerung der Diffusion der Innovation in der Regel nur bei ausreichender Konzentration im Markt. Gleichwohl ist bei Biokraftstoffen eine Verhinderung des Markteintritts durch die Hersteller mineralischer Kraftstoffe kaum auf Dauer möglich, da es sich bei den erdölbasierten Kraftstoffen um erschöpfbare Ressourcen handelt. Interdependenzen dieser Art müssen in der Analyse der verschiedenen Einflussfaktoren der Diffusion von Biokraftstoffen berücksichtigt werden. Besonders deutlich zeigen sich diese In-

terdependenzen im Hinblick auf das Angebot der verschiedenen Hersteller am Markt und die zu Grunde liegenden Preisbildungsmechanismen. Biokraftstoffe basieren auf erneuerbaren Rohstoffen und unterliegen damit einem anderen Preisbildungsmechanismus als die erdölbasierten und daher erschöpfbaren mineralischen Kraftstoffe. Diese Unterschiedlichkeit der Preisbildung macht nicht nur den Reiz der Untersuchung des Kraftstoffmarktes aus. Sie bestimmt vielmehr auch in wesentlichem Umfang den Verlauf der Diffusion von Biokraftstoffen. Die genaue Wirkungsweise wird mit Hilfe eines neoklassischen Diffusionsmodells in Kapitel 3 detailliert analysiert.

Auf der **Adopterseite** lassen sich analog zur Herstellerseite folgende drei Objektdimensionen identifizieren: die Eigenschaften des potentiellen Adopters, das Verhalten des potentiellen Adopters und die Marktstruktur auf der Abnehmerseite. HINTEMANN (2000: 153) weist jedoch darauf hin, dass die Gewicht dieser Objektdimensionen der Adopterseite im Vergleich zu den Herstellern verschoben sind. Insbesondere ist hier wohl die geringere Bedeutung der Marktstruktur auf der Adopterseite im Vergleich zur Herstellerseite zu nennen.

Die Diffusion einer Innovation kann darüber hinaus unter verschiedenen **Rahmenbedingungen** ablaufen. Die Rahmenbedingungen der Diffusion sind das vierte Objekt im Diffusionssystem. Zu den Rahmenbedingungen zählen etwa der technologische Fortschritt oder die wirtschaftliche Entwicklung, die sich indirekt über die anderen Diffusionsobjekte auf die Verbreitung einer Innovation auswirkt. Insbesondere jedoch beeinflussen die vom Staat gesetzten politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen die Diffusion von Innovation. Besonders gilt dies im Falle der Biokraftstoffe. Die Verbreitung von Biokraftstoffen ist zu großen Teilen der staatlichen Förderung geschuldet. Dem trägt Kapitel 5 durch eine detaillierte Darstellung und Analyse der staatlichen Förderung von Biokraftstoffen Rechnung.

## 2.4 Zusammenfassung

Beginnend mit dem Innovationszyklus gibt dieses Kapitel einen Überblick über die Diffusionsforschung und das Diffusionssystem. Das Zusammenwirken der vier Diffusionsobjekte und der daran anknüpfenden Bestimmungsfaktoren der Diffusion vermittelt auch einen ersten Eindruck vom Zusammenspiel der Marktkräfte bei der Verbreitung von Biokraftstoffen. Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit wurde ein besonderer Fokus der Ausführungen dieses Kapitels auf die volkswirtschaftlichen Bestimmungsfaktoren für die Diffusion von Biokraftstoffen gelegt.

Um die genaue Wirkungsweise dieser Bestimmungsfaktoren auf den Diffusionsprozess theoretisch zu analysieren, wird im nächsten Kapitel ein neoklassisches Diffusionsmodell eingeführt. Dabei wird von der wenig realitätsnahen Annahme konstanter Grenzkosten abgesehen.

Die Untersuchung der Wirkungsweise der Diffusionsfaktoren schließt Strategien zum Aufbau von Markteintrittsbarrieren ebenso ein wie die unterschiedlichen Preisbildungsmechanismen erneuerbarer Biokraftstoffe und erschöpfbarer mineralischer Kraftstoffe. Konzentrationsbemühungen werden hingegen nicht untersucht.

### **3 DIE DIFFUSION VON BIOKRAFTSTOFFEN IM NEOKLASSISCHEN MODELLRAHMEN**

Die Verbreitung von Biokraftstoffen findet in einem Diffusionssystem statt, das bereits im vorherigen Kapitel detailliert erläutert und analysiert wurde. Die spezifischen Eigenschaften und Verhaltensweisen der Hersteller beeinflussen den Markteintritt der Innovation genauso wie die Eigenschaften und Verhaltensweisen der potentiellen Adopter, die politischen Rahmenbedingungen und natürlich die Innovation selbst. Dabei bestehen vielfältige Interdependenzen zwischen den vier Diffusionsobjekten und auch den jeweils zugehörigen Bestimmungsfaktoren der Diffusion. In den Ausführungen des vorherigen Kapitels wurde bereits eine erste Idee vermittelt, wie sich die jeweiligen Diffusionsfaktoren auf die Diffusion von Biokraftstoffen auswirken.

In diesem Kapitel wird nun der Fokus auf die Untersuchung der Wirkungsweise des Diffusionsobjekts Hersteller gelegt. Dabei werden mittels des neoklassischen Diffusionsmodells in Abschnitt 3.2 zwei Fragestellungen untersucht. Zunächst einmal gilt es den Einfluss der unterschiedlichen Preisbildungsmechanismen von Biokraftstoffen als einem erneuerbaren Substitut und mineralischen Kraftstoffen als einer erschöpfbaren Ressource in ihrer Wirkung auf den Markteintritt der Innovation und den Diffusionsverlauf zu untersuchen. Da das Marktergebnis durch den jeweils geltenden Preisbildungsmechanismus bestimmt wird, liegt die Vermutung nahe, dass dieser auch die Diffusion einer Innovation beeinflusst. Die zweite Fragestellung, die in diesem Kapitel untersucht wird, betrifft den Einfluss unterschiedlicher Marktstrukturen auf die Diffusion der Innovation.

Für diese Untersuchung wird zunächst angenommen, dass die Innovation und die erschöpfbare Ressource vollkommene Substitute sind. Eine solche Annahme ist für die Betrachtung im Modell zulässig und vereinfacht die Untersuchung. Gleichwohl stimmt sie nicht mit den tatsächlichen Eigenschaften von Biokraftstoffen gegenüber mineralischen Kraftstoffen überein. In Kapitel 4 werden die Eigenschaften von Biokraftstoffen auch im Vergleich zu mineralischen Kraftstoffen untersucht und darauf aufbauend Diffusionshemmnisse identifiziert. Jedoch wird die grundsätzliche Geeignetheit von Biokraftstoffen als Kraftstoff hierdurch nicht in Frage gestellt. Mögliche Nachteile aber auch Vorteile gegenüber mineralischen Kraftstoffen lassen sich daher mittels Ab- oder Aufschlägen zum Marktpreis von Biokraftstoffen abbilden. Die Aussagen des Modells bleiben daher auch unter der vereinfachenden Annahme perfekter Substitute in ihren Grundzügen gültig.

Zur Untersuchung der beiden genannten Fragestellungen wird im Folgenden zunächst die HOTELLING Regel der Ressourcenextraktion betrachtet. Ihre Ermittlung für die hier untersuchten Marktstrukturen des vollständigen Wettbewerbs und des monopolistischen Ressourcenangebots ist hinreichend bekannt. Auf eine Herleitung der HOTELLING Regel kann daher ver-

zichtet werden. Es gilt jedoch einen Ausdruck für die absolute Höhe der Marktpreise im Zeitverlauf zu ermitteln. Im Vergleich mit der Situation, in welcher eine erneuerbare Backstop-Technologie existiert, kann somit das Marktverhalten der Ressourcenanbieter unter verschiedenen Marktstrukturen ermittelt werden. Ebenso bekannt ist die zeitunabhängige Gleichgewichtslösung reproduzierbarer Güter, bei der im Wettbewerb der Preis eines Gutes dessen Grenzkosten entsprechen muss.

Das für die Analyse der beiden genannten Fragestellungen zu Grunde gelegte neoklassische Diffusionsmodell ist durch ein hohes Abstraktionsniveau gekennzeichnet. Notwendigerweise sind auch die getroffenen Annahmen vergleichsweise restriktiv. Das Modell ist daher wenig geeignet, den Diffusionsverlauf von Biokraftstoffen in der Realität abzubilden oder diesen gar zu prognostizieren. So wird es Inhalt der folgenden Kapitel sein, Erklärungen für die Verbreitung von Biokraftstoffen in Deutschland und Brasilien zu liefern. Das neoklassische Diffusionsmodell kann jedoch hilfreiche Hinweise für das Verständnis der Wirkungsweise und Wirkungsintensität der einzelnen betrachteten Einflussfaktoren der Diffusion liefern.

### 3.1 Die Preisbildung und Preisentwicklung erschöpfbarer Ressourcen

Die Analyse der Preisbildung und der Preisentwicklung fossiler Energieträger war innerhalb des neoklassischen Modellrahmens lange Zeit kaum möglich. In seinem 1931 veröffentlichten Artikel „The Economics of Exhaustible Resources“ bemerkt Harold HOTELLING hierzu: „The static-equilibrium type of economic theory which is now so well developed is plainly inadequate for an industry in which the indefinite maintenance of a steady rate of production is a physical impossibility, and which is therefore bound to decline.“ (1931: 138f). Mit diesem Artikel begründete HOTELLING Anfang des 20. Jahrhunderts die Ressourcenökonomik als neues Fachgebiet innerhalb der Neoklassik.

Gut 40 Jahre nach Veröffentlichung des Artikels erzielte dieser seine größte Resonanz in der ökonomischen Fachwelt. Mit der Energiekrise der 1970er Jahre und angestoßen durch die Veröffentlichung der *Grenzen des Wachstums* (MEADOWS et al. 1972) richtete sich auch der Fokus der Wissenschaft auf die Endlichkeit der globalen Energievorräte, und Fragen des Managements natürlicher Ressourcen entwickelten sich rasant zu einem vollwertigen Forschungsgebiet. Im Zentrum des Interesses standen zu dieser Zeit vor allem Betrachtungen ganzer Wirtschaftszweige sowie Fragen der ökonometrischen Schätzung von Produktionsfunktionen (CLOUTIER/ROWLEY 2003: 222). HOTELLINGS Ansatz ermöglichte die Anwendung dieser Fragestellungen auf den Bereich der erschöpfbaren Ressourcen und fand dadurch rasch Verbreitung. Schließlich vermochte auch die Weiterentwicklung der dynamischen Modellierung das Grundmodell von 1931 in die unterschiedlichsten Richtungen zu erweitern (BRAZEE/CLOUTIER 2006: 829f). Einen Überblick hierzu bietet z.B. GORDON (1966, 1967).

Bis heute bildet die HOTELLING Regel den Kern und das Herz der Ressourcenökonomie. Sie beschreibt den optimalen Preispfad einer erschöpfbaren Ressource im Zeitverlauf. Die HOTELLING Regel kann dabei als Essenz eines komplexen Optimierungsproblems verstanden werden, in welches insbesondere die Endlichkeit der betrachteten Ressource als Nebenbedingung eingeht. Auf diese Weise spiegelt der optimale Preis einer Ressource deren Verfügbarkeit wider. Hier zeigt sich der fundamentale Unterschied zur zeitunabhängigen Gleichgewichtslösung reproduzierbarer Güter, bei der im Wettbewerb der Preis eines Gutes dessen Grenzkosten entsprechen muss. Heute extrahierte und verbrauchte Ressourceneinheiten stehen nicht mehr für den künftigen Gebrauch zur Verfügung. Daher muss der Preis erschöpfbarer Ressourcen sog. Opportunitätskosten<sup>2</sup> enthalten. In der Ökonomie erschöpfbarer Ressourcen drücken diese den Wert aus, der zu einem späteren Zeitpunkt aus dem Gebrauch eben jener Ressourceneinheit hätte entstehen können. Dabei müssen Opportunitätskosten streng von der sog. Differentialrente für relativ bevorzugte Lagerstätten oder der Monopolrente getrennt werden. So weisen FAUCHEUX/NOËL (2001:145) darauf hin, dass zwar der Preis einer erschöpfbaren Ressource zu bestimmten Zeitpunkten aus diesen Elementen bestehen kann, die Opportunitätskosten jedoch stets aus der Endlichkeit der Ressource resultieren.

### **3.1.1 Der optimale Abbau erschöpfbarer Ressourcen im Zeitverlauf**

Die genaue Gestalt der HOTELLING Regel wird durch weitere Nebenbedingungen und Annahmen bestimmt, die sich durch den spezifischen Untersuchungsgegenstand ergeben. Dazu gehören etwa die von HOTELLING selbst untersuchten verschiedenen Wettbewerbssituationen, variable Extraktionskosten, der Sonderfall dauerhafter erschöpfbarer Ressourcen, unterschiedliche soziale Diskontraten des intertemporalen Optimierungsproblems oder auch verschiedene steuerpolitische Maßnahmen.

Dynamische Entscheidungsprobleme wie diese weisen Eigenschaften auf, die im engen strukturellen Rahmen der neoklassischen Theorie nur schwer zu berücksichtigen sind. Im Gegensatz zu reproduzierbaren Gütern muss die dynamische Optimierung erschöpfbarer Ressourcen dem Umstand Rechnung tragen, dass sich jede Extraktionsentscheidung in zweierlei Hinsicht auf den Gesamtgewinn des Ressourcenanbieters auswirkt. Dem direkt aus der Extraktionsentscheidung resultierenden Periodengewinn muss die indirekte Wirkung der dadurch verringerten zukünftigen Extraktionsmöglichkeiten gegenübergestellt werden.

Solange hierbei diskrete Zeitverläufe unterstellt werden, können diese dynamischen Entscheidungsprobleme mit Hilfe der LAGRANGE Methode oder der nichtlinearen Programmierung gelöst werden. Oftmals erweist sich jedoch eine kontinuierliche Formulierung des Optimie-

---

<sup>2</sup> Obwohl sich der Begriff der Opportunitätskosten in den letzten Jahren durchgesetzt hat, gibt es in der Literatur eine Vielzahl äquivalenter Begriffe. Unterschiedslos wird von marginalen Nutzungskosten, einem um die Extraktionskosten bereinigten Preis oder auch von einer Knappheitsrente gesprochen. Zur Vertiefung des Begriffes der Opportunitätskosten empfiehlt sich AMUNDSEN (1992).

rungsproblems als vorteilhafter hinsichtlich der Transparenz der Resultate (KANEMOTO 1980: 189). Bei dieser heute üblichen Darstellungsweise müssen jedoch technische Schwierigkeiten in Kauf genommen werden. In einem kontinuierlichen Modell ist die Zahl der Entscheidungsvariablen naturgemäß nicht mehr länger endlich: da Entscheidungen zu jedem einzelnen Zeitpunkt getroffen werden, muss folglich die Zahl der Entscheidungsvariablen unendlich sein. In einem solchen unendlich dimensionalen Raum ist die Verwendung von Methoden der höheren Mathematik unverzichtbar.

Entscheidungsprobleme dieser Art sind daher meist Gegenstand kontrolltheoretischer Ansätze<sup>3</sup>. Neben der dynamischen Programmierung und der Variationsrechnung als der klassischen Herangehensweise gilt heute das auf den russischen Mathematiker PONTRJAGIN (1962) zurückgehende Maximumprinzip<sup>4</sup> als das zentrale Resultat der Kontrolltheorie (STAHLECKER et al. 2003: 173). Im Gegensatz zur Variationsrechnung liegt die Stärke der Kontrolltheorie vor allem in der Möglichkeit zur Berücksichtigung von Randlösungen. Jedoch ergibt sich seine enorme praktische Bedeutung vor allem aus seiner Einfachheit. Im Wesentlichen besagt das Maximumprinzip, dass das dynamische Entscheidungsproblem in eine Reihe statischer Optimierungsaufgaben zerlegt werden darf (DORFMAN 1969: 818f). So ist in jedem Zeitpunkt die Hamiltonfunktion zu maximieren. Diese beinhaltet einerseits Variablen, die den Zustand des betrachteten Systems zu einem Zeitpunkt beschreiben und Kontrollvariablen andererseits, durch die der Entscheidungsträger in der Lage ist, in das Systemgeschehen einzugreifen und so die Weiterentwicklung der Zustandsvariablen zu beeinflussen (DE LA FUENTE 2000: 567). Die Bezeichnung Kontrolltheorie weist bereits darauf hin, dass im Fokus kontrolltheoretischer Optimierungsprobleme die Optimierung des Kontrollpfades steht und nicht wie bei der Variationsrechnung vornehmlich der optimale Pfad der Zustandsvariablen im Zeitverlauf ermittelt wird. Im Falle der optimalen Ressourcenextraktion ergibt sich als Zustandsvariable der Ressourcenbestand zu einem bestimmten Zeitpunkt, während die Extraktionsrate die Kontrollvariable darstellt.

Im einfachsten Fall mit vollkommenem Wettbewerb unter den verschiedenen Ressourcenanbietern und unter Vernachlässigung von Extraktionskosten ergibt sich die HOTELLING Regel bekanntermaßen als

$$p_t = p_0 e^{rt} . \quad (3.1)$$

---

<sup>3</sup> Zur Vertiefung der Dynamischen Optimierung im Allgemeinen und der Kontrolltheorie und ihrem zentralen Resultat des Maximumprinzips im Speziellen empfiehlt sich TAKAYAMA (1985), KAMIEN/SCHWARTZ (1980), STAHLECKER et al. (2003), sowie CHIANG (1992). Gleichwohl wird ein elementarer Beweis des Maximumprinzips in den Standardlehrbüchern nur selten geführt. Nachzulesen ist dieser beispielsweise PONTRJAGIN et al. (1962), IOFFE/TICHOMIROV (1979), TAKAYAMA (1985) und DE LA FUENTE (2000).

<sup>4</sup> Unabhängig von den Ergebnissen Pontrjagins entwickelte Magnus HESTENES (1950) dieselbe Technik an der Universität von Kalifornien, Los Angeles. Aufgrund der geringen Auflage fand dieses Werk jedoch kaum Verbreitung bis HESTENES schließlich eine Weiterführung der Überlegungen PONTRJAGINS (HESTENES 1965) veröffentlichte.

Der HOTELLING Regel entsprechend muss bei optimaler Ausbeutung einer Ressource der Anfangspreis dieser Ressource  $p_0$  im Zeitverlauf in Höhe des Zinssatz  $r$  ansteigen. Dies impliziert natürlich auch, dass der Ressourcenpreis selbst bei einem konstanten Zinssatz  $r > 0$  im Zeitverlauf nicht konstant bleiben kann sondern steigen wird, bis er zum Erschöpfungszeitpunkt seinen höchsten Preis annimmt. In einer größeren Ausführlichkeit widmet sich beispielsweise HERFINDAHL (1967: 88f) dieser Analyse. Festzuhalten ist an dieser Stelle auch, dass der Ressourcenanbieter die Ausbeutung der Ressource verzögern wird, wenn der Preis schneller als der Zinssatz ansteigt. Der Verbleib der Ressource im Boden ist in diesem Fall attraktiver als das auf dem Finanzmarkt erzielbare Ergebnis. Steigt der Preis jedoch langsamer an als der Zinssatz, so wäre es umgekehrt gewinnbringender, die Ausbeutung der Ressource zu beschleunigen. Bei vollkommenem Wettbewerb bietet daher jede Abweichung von der HOTELLING Regel Arbitrage Möglichkeiten für Spekulanten. Werden diese in Anspruch genommen, so nähert sich der Preis wiederum an das von der HOTELLING Regel verlangte Niveau an. In der Realität verhindern technische Restriktionen und die üblicherweise bestehende Notwendigkeit zur Generierung eines Unternehmensgewinns innerhalb geringerer Zeitspannen extreme Extraktionsstrategien. Dennoch verliert die HOTELLING Regel hierdurch nicht an Aussagekraft. Die Abwägung zwischen Zins und Inflation besteht für ein Ressourcen extrahierendes Unternehmen gleichwohl. Die Förderquoten der OPEC sind allerdings wohl eher der oligopolistischen Marktstruktur geschuldet.

Die HOTELLING Regel als bloßes Resultat eines Maximierungsproblems zu charakterisieren wäre eine fatale Unterschätzung ihrer Bedeutung. Sie definiert das einzig mögliche Gleichgewicht und stellt daher mit den Worten DASGUPTA/HEAL (1979: 156) das „Fundamentalprinzip der Ökonomie erschöpfbarer Ressourcen“ dar. Die vorangehenden Überlegungen zeigen darüber hinaus deutlich, dass die erschöpfbare Ressource tatsächlich den Status des Kapitals im eigentlichen Wortsinne inne hat. Insbesondere KOOPMANS et al. (1973) gehen auf diese Statureigenschaft erschöpfbarer Ressourcen ein. Das Gleichgewicht auf dem Finanzmarkt verlangt, dass die Erträge aller Kapitalarten identisch sind. So auch die der Kapitalart der erschöpfbaren Ressource. In diesem Sinne interpretieren FAUCHEUX/NOËL (2001: 151) die HOTELLING Regel als Teil der Bedingungen für einen effizienten Kapitaleinsatz.

Gleichzeitig ist der HOTELLING Preisfad dabei der höchste Preisfad, bei welchem die Ressource am Ende des Planungszeitraums vollständig erschöpft ist. Ein niedrigerer Preisfad würde zu einer Erschöpfung der Ressource vor Ende des Planungshorizontes liegen, was durch die Transversalitätsbedingung des bekannten Optimierungsproblems ausgeschlossen wird. Bei einem höheren Preisfad als dem HOTELLING Preisfad verbliebe ein Teil der Ressource ungenutzt im Boden. Weil aus diesen Restmengen kein Gewinn mehr erlöst werden kann, kann dieser Preisfad bei normalen Gütern zwangsläufig nicht optimal sein.

Es sollte wenig überraschend sein, dass die HOTELLING Regel nicht allein die optimale Lösung für die gewinnmaximierenden Ressourcenbesitzer, sondern auch gesamtwirtschaftlich optimal ist (KUULUVAINEN/TAHVONEN 1995: 671), da sie unter optimistischen neoklassischen Annahmen wie vollständiger Information, vollkommener Konkurrenz und der Abwesenheit von Externalitäten hergeleitet wird:

$$p_t = p_0 e^{\sigma t} . \quad (3.2)$$

Vorausgesetzt der Marktzins entspricht der sozialen Diskontrate  $\sigma$ , wählt ein gesamtwirtschaftlicher Planer den gleichen Extraktionspfad, der sich auch bei vollkommener Konkurrenz ergeben würde. Unter der Voraussetzung, dass die Märkte für erschöpfbare Ressourcen also wettbewerblich strukturiert sind, bedarf es hier keines Eingreifens seitens des Staates, beispielsweise zur Schonung der begrenzten Ressourcen. Die Durchsetzung dieses Ziels durch eine Verzögerung des Abbaus hätte in diesem Fall eine sinkende Gesamtwohlfahrt zur Folge. Künftige Generationen könnten indes zwar von der dann größeren verfügbaren Ressourcmenge profitieren, aber nicht in dem Umfang, in welchem die gegenwärtigen Generationen Wohlfahrtseinbußen erleiden würden.

Das Bild der erschöpfbaren Ressourcen ist jedoch durch die alleinige Betrachtung der Angebotsseite noch unvollständig. Die HOTELLING Regel gibt zwar den optimalen Preispfad der Ressource an, trifft jedoch keine konkreten Aussagen über die absolute Höhe des Ressourcenpreises im Zeitverlauf und somit auch nicht über die jeweils zugehörigen optimalen Extraktionsmengen. Einzig die vollständige Erschöpfung der Ressource am Ende des Planungszeitraumes muss sichergestellt werden. Für die Festsetzung des hierfür notwendigen optimalen Anfangspreises einer erschöpfbaren Ressource ist die Kenntnis der Nachfragefunktion nötig. In der wissenschaftlichen Literatur findet man dazu je nach Untersuchungsgegenstand vor allem zwei Ansätze: die Unterstellung einer isoelastischen Nachfragefunktion einerseits und die Annahme einer linearen Ressourcennachfrage andererseits. Da sich der optimale Anfangspreis einer Ressource bei Unterstellung einer linearen Nachfrage nur numerisch lösen lässt, wird für die weitere Analyse eine isoelastische Nachfragefunktion  $D_t(p_t)$  angenommen sowie Markträumung unterstellt:

$$R_t = D_t(p_t) = p_t^{-\alpha} \quad (\alpha > 1) \quad (3.3)$$

Bekanntlich hat das Optimierungsproblem eines Monopolisten bei unelastischen Nachfragefunktionen keine Lösung, denn in diesen Fällen wäre der Grenzerlös eines Gutes zwingend negativ. Damit die Vergleichbarkeit der hier untersuchten wettbewerblichen mit der monopolistischen Marktstruktur gewahrt bleibt, wird die Beschränkung der Betrachtung auf elastische Nachfragefunktionen mit  $\alpha > 1$  notwendig.

Durch die bekannte Transversalitätsbedingung ist festgelegt, dass die Ressource bei unterstelltem positivem Schattenpreis bei Fördereinstellung vollständig ausgebeutet ist. Bei gegebenem

Ressourcenbestand  $S_0$ , einem Planungshorizont von  $T$  und mit  $R_t$  als Ressourcenextraktion gilt die folgende Ressourcenbeschränkung:

$$\int_0^T R_t dt = S_0 \quad (3.4)$$

Durch die Gleichungen (3.3) und (3.4) ergibt sich für den vollständigen Wettbewerb als optimaler Anfangs- bzw. Marktpreis unter Beachtung der HOTELLING Regel aus (3.1):

$$p_0 = \left[ \frac{(1 - e^{-\alpha r T})}{\alpha r S_0} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad \text{bzw.} \quad p_t = \left[ \frac{(1 - e^{-\alpha r T})}{\alpha r S_0} \right]^{\frac{1}{\alpha}} e^{rt}. \quad (3.5)$$

Der optimale Anfangspreis ist dem zu Folge definiert als der höchstmögliche Preis, bei dem die Ressource innerhalb des vorgesehenen Planungszeitraumes vollständig erschöpft wird (WEINSTEIN/ZECKHAUSER 1975: 374). Der Erschöpfungszeitpunkt der Ressource fällt somit mit dem Planungshorizont des Unternehmens zusammen<sup>5</sup>.

Letzterer muss jedoch nicht zwangsweise exogen vorgegeben sein. Es lässt sich leicht überlegen, dass der Planungszeitraum mit dem Erreichen eines Prohibitivpreises endet, denn bei diesem verschwindet die Nachfrage nach der Ressource. Bei der hier unterstellten isoelastischen Nachfrage lässt sich ein solcher Prohibitivpreis nicht direkt aus der Nachfragefunktion ableiten. Jedoch wirkt die Existenz eines vollkommenen Substituts auf die erschöpfbare Ressource wie ein Prohibitivpreis. Bei Erreichen des Substitutspreises verschwindet die Nachfrage nach der erschöpfbaren Ressource. An dieser Stelle zeigt sich bereits die Wirkungsweise einer Backstoptechnologie, die in Abschnitt 3.2 detailliert analysiert wird.

Je höher ein solcher der Prohibitivpreis ist, umso länger wird die Ressource gefördert und im Anschluss am Markt verkauft. Die Wahl eines exogenen Planungshorizontes spiegelt die Eigenschaft einer isoelastischen Nachfrage wieder, bei der bei einem beliebig hohen Preis eine positive Nachfrage existiert und so eine Ressource innerhalb eines endlichen Zeitraumes nicht erschöpft würde. Aus dem optimalen Anfangspreis aus (3.5) lässt sich jedoch leicht der Preis bei endogenem und daher unendlichem Planungshorizont ersehen. Mit  $T = \infty$  ergibt sich

$$p_0 = [\alpha r S_0]^{-\frac{1}{\alpha}} \quad \text{bzw.} \quad p_t = [\alpha r S_0]^{-\frac{1}{\alpha}} e^{rt}. \quad (3.6)$$

---

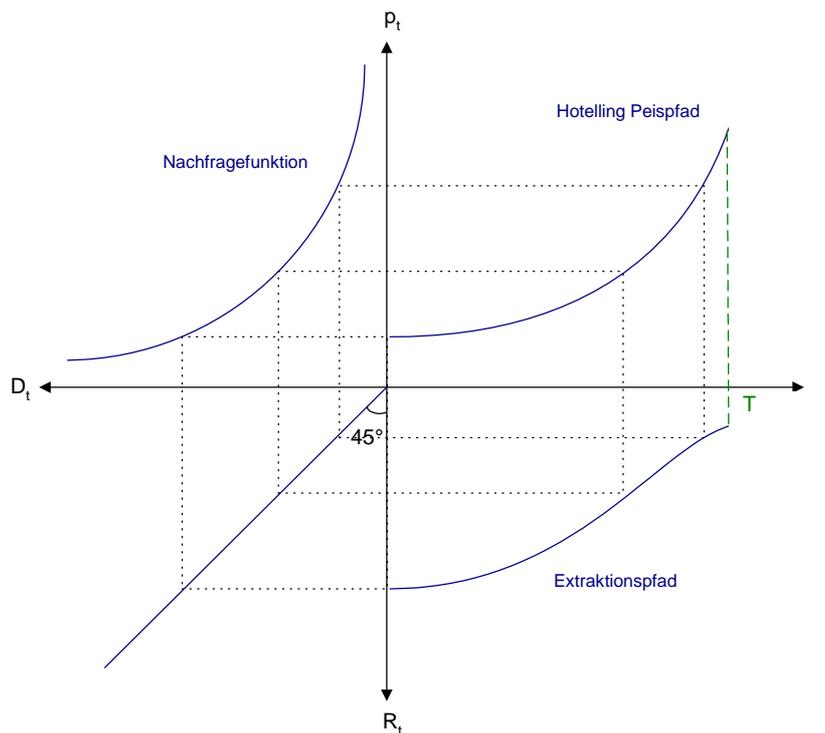
<sup>5</sup> Während hier lediglich isoelastische Nachfragen betrachtet wurde, wird der Erschöpfungszeitpunkt der Ressource auch bei allen anderen Formen von Nachfragefunktionen mit dem Ende des Planungshorizontes zusammenfallen. GOTTWALD (1981: 28) zeigt dies beispielsweise ausführlich für eine lineare Nachfrage. Dabei muss hier einschränkend erwähnt werden, dass bei vollkommen unelastischen Nachfragefunktionen die Wahl des Planungshorizontes eine entscheidende Rolle für die Erschöpfung der Ressource spielt. Hier wird die Ressource nur dann sicher erschöpft, wenn der Planungshorizont eine endogene Variable darstellt. Ähnliches gilt für die vollkommen elastische Nachfrage. Hier wird der gesamte Ressourcenvorrat innerhalb der ersten Periode erschöpft, da Preissteigerungen aufgrund der dann fehlenden Nachfrage nicht möglich sind.

Die für die Unternehmen als Preisnehmer entscheidenden optimalen Extraktionsmengen lassen sich nach der Ermittlung der Marktpreise mit (3.3) nun einfach angeben als

$$R_t = \left[ \frac{\alpha r S_0}{(1 - e^{-\alpha r T})} \right] e^{-\alpha r t}. \quad (3.7)$$

Abbildung 3.1 zeigt deutlich das hier ermittelte Ergebnis, dass sich die Extraktionsmengen im Zeitverlauf naturgemäß gegenläufig zu den Marktpreisen entwickeln.

**Abbildung 3.1** Der optimale Preis- und Extraktionspfad einer erschöpfbaren Ressource



Quelle: Eigene Darstellung

Auf diese Zeitpfade wirken sich neben dem Planungshorizont drei weitere Bestimmungsvariablen aus, wobei die jeweiligen Reaktionen intuitiv einleuchtend sind<sup>6</sup>. Der Ressourcenbestand ist dabei die dominierende Bestimmungsvariable. So muss eine Vergrößerung des anfänglichen Ressourcenbestandes ceteris paribus im Preis-Zeit-Diagramm zu einer Verschiebung des optimalen Preispfades nach unten führen. Der Grund hierfür liegt in der Erfüllung der bekannten Transversalitätsbedingung. Bei einem unveränderten Anfangspreis verbliebe am Ende des Planungszeitraumes ein Restbestand der Ressource im Boden. Ein Zustand der offensichtlich nicht optimal sein kann. Die genaue Anpassung des Preises wird dabei insbesondere durch die Preiselastizität der Nachfrage beeinflusst:

<sup>6</sup> Bei der folgenden Betrachtung wird von einem Ressourcenanfangspreis von  $p_0 \geq 1$  ausgegangen. Diese Einschränkung wird durch die spezielle Eigenschaft isoelastischer Nachfragefunktionen nötig, die sich in  $p = 1$  schneiden. Daher verkehren sich bei geringeren Preisen als eins die Mengenreaktionen.

$$\frac{\partial p_0}{\partial S_0} = -\frac{1}{\alpha} S_0^{-\frac{1+\alpha}{\alpha}} \left[ \frac{(1-e^{-\alpha T})}{\alpha r} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (3.8)$$

Eine hohe Nachfrageelastizität mildert offensichtlich die Wirkung der Bestandsveränderung auf den optimalen Anfangspreis ab. Dies ist einfach zu erläutern, denn je höher die Nachfrageelastizität ist, umso deutlicher fällt die Zunahme der Nachfrage auf eine Preissenkung aus. Um die Erschöpfung der Ressource innerhalb des Planungszeitraumes zu gewährleisten, sind bei einer hohen Preiselastizität daher nur geringe Preisanpassungen nötig. Bei einer vollkommen elastischen Nachfrage schließlich, hat eine Veränderung des Ressourcenbestandes keinerlei Einfluss mehr auf den Ressourcenpreis.

Als zweite Bestimmungsvariable gelangt die bereits erwähnte Preiselastizität über die Berücksichtigung der isoelastischen Nachfragefunktion in der Ressourcenbeschränkung in den Ausdruck für den optimalen Ausgangspreis (3.5). Dieser muss bei zunehmender Elastizität sinken. Den Grund hierfür sieht man deutlich an der hier unterstellten isoelastischen Nachfragefunktion  $D_t(p_t) = p_t^{-\alpha}$ . Je höher die Elastizität der Nachfrage  $\alpha$  ist, umso geringer ist bei gleichem Marktpreis die Ressourcennachfrage im Markt. Wiederum verlangt daher die Erfüllung der Transversalitätsbedingung und des HOTELLING Preispfades einen mit steigender Elastizität der Nachfrage sinkenden Anfangspreis. Im Vergleich zweier unterschiedlich elastischer Nachfragen wird die Angebotsmenge der elastischeren Nachfrage zu Beginn also höher sein, im Zeitverlauf jedoch unter die Menge der weniger elastischen Nachfrage sinken.

Der Zins als dritte Determinante bestimmt die Attraktivität eines frühzeitigen Ressourcenabbaus. Je höher der Zins ausfällt, umso attraktiver werden Geldanlagen am Markt. Ein hoher Zins führt so zu einem verstärkten Ressourcenabbau in den ersten Perioden. Der dadurch sinkende Anfangspreis stellt bei dem nun steileren HOTELLING Preispfad die Erschöpfung der Ressource am Ende des Planungszeitraums sicher. Anhand der Wirkung eines veränderten Zinssatzes lässt sich auch der Unterschied zu einem endogenen Planungshorizont aufzeigen. Es wurde bereits ausgeführt, dass der Planungshorizont in diesem Fall durch den Prohibitivpreis der Ressource bestimmt wird, welcher auf einem steileren Preispfad schneller erreicht wird. Daher muss auch hier der Anfangspreis der Ressource unter dem ursprünglichen liegen. Damit rückt der Erschöpfungszeitpunkt der Ressource zwangsweise näher in die Gegenwart.

Diese Partialanalyse kann die Wirkung einer Zinsveränderung auf die Ressourcennachfrage jedoch nicht vollständig darstellen. Im Allgemeinen wird ein höherer Zinssatz die Investitionstätigkeit der Unternehmen bremsen und kann damit zu einem geringeren Einsatz von natürlichen Ressourcen führen. Die gestiegene Attraktivität des Ressourcenabbaus trifft so möglicherweise nicht auf eine steigende Nachfrage am Markt. FISHER (1981: 49) mahnt darüber hinaus an, den Kapitalcharakter der erschöpfbaren Ressource zu bedenken. Eine höhere Extraktionsrate zu Beginn des Ressourcenabbaus führt aufgrund der Investitionsintensität in der Folge zu verringerten Explorationsaktivitäten. Da diese bei FISHER in Zusammenhang mit den

Extraktionsmöglichkeiten stehen, verstärkt sich der Zinseffekt in den späteren Perioden noch und die Ressourcenextraktion nimmt noch weiter ab. Es gibt jedoch auch Autoren, welche den Effekt des Zinssatzes auf die Extraktionsgeschwindigkeit als negativ sehen, wie beispielsweise SCOTT (1955). Allerdings dürften diese Ergebnisse eher als Sonderfall gelten.

Nach der Analyse der Ressourcenausbeutung unter vollkommener Konkurrenz erweitert HOTELLING sein eigenes Grundmodell dahingehend, dass er einen monopolistischen Ressourcenanbieter unterstellt. Die Herleitung des optimalen monopolistischen Preispfades erfolgt völlig analog zur Situation bei vollkommener Konkurrenz. Der Monopolist maximiert den Gesamtgewinn, den er aus dem Ressourcenvorrat zieht. Ähnlich den vorhergehenden Ergebnissen besagt die HOTELLING Regel im Monopolfall, dass entlang des optimalen Extraktionspfades der Grenzerlös  $m_t$  in Höhe des Zinssatzes  $r$  ansteigt:

$$m_t = m_0 \cdot e^{rt}. \quad (3.9)$$

Während im Wettbewerbsfall der Preis in Höhe des Marktzinses ansteigen musste, so steht nun die Entwicklung des Grenzerlöses im Fokus des Monopolisten. Entsprechend der so vorgegebenen Entwicklung der Grenzerlöse setzt der Monopolist den Marktpreis der Ressource. Der Grenzerlös muss dabei zwingend positiv sein. Daher wird der Monopolist die erschöpfbare Ressource nur bei einer elastischen Nachfrage am Markt anbietet<sup>7</sup>. Eine unelastische Nachfrage bedeutet zwingend einen negativen Grenzerlös. Das Optimierungsproblem hätte demnach keine Lösung.

Um den Monopolpreis einer erschöpfbaren Ressource mit dem Preis bei vollkommenem Wettbewerb vergleichen zu können, ist die Umformung des Grenzerlöses nötig. Hierfür wird die allgemeine Formel für die Preiselastizität der Nachfrage  $\eta(R_t) = \partial R_t / \partial p_t \cdot p_t / R_t$  verwendet. Damit gilt für den Grenzerlös der Monopolisten:

$$m_t = p_t \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta(R_t)} \right). \quad (3.10)$$

Die Bedeutung dieses Ausdrucks erschließt sich nicht sofort und bedarf daher einer kurzen Erläuterung. Im Ergebnis lässt sich aus diesem Ausdruck ableiten, dass sich der Preispfad des Monopolisten in keiner Weise von dem eines Unternehmens im Wettbewerb unterscheidet. Der Grund hierfür liegt in der getroffenen Annahme, dass die Elastizität der Nachfrage im Zeitverlauf konstant bleibt. In diesem Fall wird der in Klammern geschriebene Term aus (3.10) zu einer Konstanten.

---

<sup>7</sup> Es lässt sich leicht überlegen, dass im Falle einer unelastischen Nachfrage der Gewinn durch Restriktion des Outputs vergrößert werden kann. Einige Autoren wie beispielsweise COOPER (2003), MANNING (1991) oder KALYMON (1975) schätzen die Nachfrage kurzfristig tatsächlich als eher preisunelastisch ein. Eine Anhebung des Monopolpreises hängt jedoch vor allem auch von der langfristigen Elastizität ab. Detailliert ist dies nachzulesen bei PHELPS/WINTER (1970). Die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Monopol und Wettbewerb wurden erstmals in dem berühmten Artikel von SRAFFA (1926) systematisch formal herausgearbeitet. Dieser setzte die Diskussion des Markt begriffes in Gang, die schließlich in dem Werk von TRIFFIN (1940) kulminierte.

Wird der Ausdruck für den Grenzerlös des Monopolisten aus (3.10) in die HOTELLING Regel aus (3.9) übernommen, ergibt sich diese nunmehr als

$$p_0 \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta(R_0)} \right) = p_t \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta(R_t)} \right) \cdot e^{rt}. \quad (3.11)$$

Bei der als im Zeitverlauf konstant angenommenen Elastizität entspricht dieser HOTELLING Pfad wie bereits vorweggenommen dem bereits aus der wettbewerblichen Marktstruktur bekannten Preispfad:

$$p_t = p_0 e^{rt}. \quad (3.12)$$

In der Folge stellen sich bei dem hieraus resultierenden Monopolangebot auch dieselben absoluten Marktpreise ein wie in der wettbewerblichen Situation. Dieses Ergebnis überrascht zunächst einmal, kennt man doch die Problematik der Monopolrente aus den Lehrbüchern. Die statische Theorie lehrt, dass der Monopolist seine Marktmacht zur Beschränkung des produzierten Outputs nutzt, um so höhere Preise am Markt durchzusetzen, als es Effizienzüberlegungen diktieren würden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die traditionell betrachteten Monopolisten über ein Monopol bezüglich des Produktionsflusses verfügen, während der Ressourcenanbieter Monopolmacht über einen bestimmten Ressourcenbestand ausüben kann. Damit hat der Ressourcenmonopolist die Möglichkeit der Reallokation der Extraktion im Zeitverlauf gegenüber dem Wettbewerbsergebnis und wird nach (3.9) einen Ausgleich der Grenzerlöse in Gegenwartswerten anstreben. Obwohl sich auch hier offensichtlich die Bedingung, die an den Extraktionspfad des Monopolisten gestellt wird, von derjenigen des Wettbewerbers unterscheidet, so ist das Marktergebnis aufgrund des proportionalen Verhältnisses zwischen Preis und Grenzerlös durch die Unterstellung einer konstanten isoelastischen Nachfragefunktion identisch. Mehr noch, das Monopolangebot ist sogar gesellschaftlich optimal wenn der Zinssatz dem gesellschaftlichen Diskontsatz entspricht.

Die Errungenschaften der dynamischen Betrachtungsweise beschränken sich damit also nicht allein auf die Berücksichtigung von Opportunitätskosten im Ressourcenpreis. Darüber hinaus offenbart sie die Veränderung der traditionellen Positionen verschiedener Marktstrukturen. Wie hier gezeigt wurde, kann die Abbaurate eines Monopolisten unter bestimmten, wenn auch sehr restriktiven Bedingungen, sogar als sozial optimal beurteilt werden. Dieser Sonderfall dürfte jedoch außerhalb der Modellwelt so gut wie keine Rolle spielen. Realistischerweise wird sich die monopolistische Angebotsmenge auch im dynamischen Kontext erschöpfbarer Ressourcen vom Wettbewerbsergebnis unterscheiden. Die Untersuchung der genauen Rahmenbedingungen, unter welchen der Monopolist den Abbau der Ressource verzögert oder schneller extrahiert, wurde ebenfalls von der Ölkrise der 1970er Jahre angestoßen. In beiden Fällen ist das Ergebnis unter Effizienzgesichtspunkten nicht optimal. Dennoch ist das Wissen um das Monopolverhalten unter verschiedenen Rahmenbedingungen essentiell für die jewei-

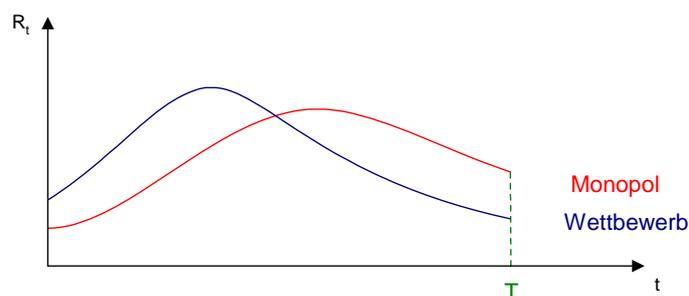
ligen korrigierenden Markteingriffe. Die wesentlichen Ergebnisse hierzu konnten vor allem von STIGLITZ (1976), KHALATBARI (1976, 1977) sowie HEAL (1976) ermittelt werden.

Wie bereits angedeutet wurde, spielt offensichtlich die Preiselastizität der Nachfrage eine entscheidende Rolle für das Auseinanderfallen der Marktergebnisse bei unterschiedlichen Marktstrukturen. Einige Autoren, wie beispielsweise LEWIS (1976), konnten zeigen, dass dieses Phänomen dann auftritt, wenn die Elastizität der Nachfrage mit zunehmender Menge sinkt. In diese Kategorie von Nachfragefunktionen fällt auch die dem HOTELLING Modell zu Grunde gelegte lineare Nachfragefunktion. Von Interesse sind jedoch vor allem die in der Realität anzutreffenden, im Zeitverlauf zunehmenden Elastizitäten aufgrund gestiegener Substitutionsmöglichkeiten. Hierfür lässt sich das obige Modell auf einfache Weise modifizieren. Bei steigenden Elastizitäten folgt aus (3.10) unmittelbar, dass der Monopolpreispfad und der Preispfad bei vollkommener Konkurrenz auseinanderfallen:

$$p_t = \left(1 + \frac{1}{\eta(R_0)}\right) / \left(1 + \frac{1}{\eta(R_t)}\right) p_0 e^{rt}. \quad (3.13)$$

Offensichtlich muss die Wachstumsrate des Preises in diesem Fall beim Monopolisten geringer sein als in der wettbewerblichen Situation. Der Monopolpreis kann nicht in Höhe des Zinssatzes anwachsen, da bei steigenden Elastizitäten  $|\eta(R_0)| < |\eta(R_t)|$  und somit der Bruch in (3.13) zwingend kleiner eins ist. Die geringere Steigung des monopolistischen Preispfades verlangt bei Erfüllung der Transversalitätsbedingung einen höheren Anfangspreis als bei wettbewerblicher Extraktion. Ab einem bestimmten Zeitpunkt, an dem sich die beiden Preispfade schneiden, wird der Monopolpreis daher unter dem Wettbewerbspreis liegen und entsprechend wird die Extraktion der erschöpfbaren Ressource größer sein als in der Konkurrenzsituation. Dieser höhere Anfangspreis entspricht dem üblichen Preissetzungsverhalten eines Monopolisten bei unterschiedlichen Preiselastizitäten der Nachfrage. Bei endlicher Erschöpfung der Ressource erfolgt bei zunehmenden Elastizitäten die Extraktion im Monopolfall also verzögert (STIGLITZ 1976: 659). Die folgende Grafik vergleicht mögliche Extraktionspfade in beiden Fällen bei zunehmender Elastizität:

**Abbildung 3.2** Monopol- und Wettbewerbsextraktion im Vergleich



Quelle: Stiglitz (1976: 657)

In ähnlicher Weise kommen WEINSTEIN/ZECKHAUSER (1975), SWEENEY (1993) sowie KAY/MIRRELES (1975) zu dem Ergebnis, dass der Monopolist die Ressourcenextraktion in den frühen Perioden dann beschleunigt, wenn die Preiselastizität der Nachfrage im Zeitverlauf sinkt. Dieses Ergebnis ist in der Fachwelt jedoch umstritten. Nicht nur wird die Relevanz sinkender Elastizitäten in der realen Welt bezweifelt. DASGUPTA/HEAL (1979: 327f) äußern beispielsweise auch grundlegende Bedenken gegenüber den Implikationen eines beschleunigten Ressourcenabbaus. So argumentieren sie, dass die beschleunigte Extraktion in den früheren Perioden dazu führen kann, dass der Grenzerlös schneller steigt als in Höhe des Zinses. FAUCHEUX/NOËL (2001: 163) schließen sich der Befürchtung an, dass die hieraus mögliche Arbitrage Spekulanten auf den Plan ruft und so das erhaltene Gleichgewicht nicht von Dauer wäre. Festzuhalten bleibt an dieser Stelle, dass die Analyse der Wirkung zunehmender Elastizitäten einen ersten Hinweis darauf gibt, wie sich die Preis- und Extraktionspfade bei unterschiedlichen Marktstrukturen verhalten könnten, wenn der Absatz der Ressource durch ein Substitut bedroht wird. Die explizite Einführung eines Substituts wird im nächsten Kapitel vorgenommen.

Der spezielle Fall, dass bei konstanter isoelastischer Nachfrage der monopolistische Preispfad mit dem wettbewerblichen zusammenfällt, beruht einerseits auf der Annahme zu vernachlässigender Extraktionskosten. So führt die Berücksichtigung von Extraktionskosten bei CUMMINGS (1969), SCOTT (1967) und STIGLITZ (1976) zu einem verzögerten Abbau der erschöpfbaren Ressource durch den Monopolisten. Andererseits wird die absolute Höhe der Marktpreise durch den Umfang des anfänglichen Ressourcenbestandes bestimmt. In der bisherigen Betrachtung war dieser exogen gegeben und in beiden Marktstrukturen identisch. Dies muss jedoch nicht notwendigerweise der Fall sein. So zeigen GAUDET/LASSERRE (1986) sowie FISHER/LAXMINARAYAN (2005), dass die Explorationsaktivitäten eines Monopolisten bei anfallenden Explorationskosten geringer ausfallen als im Wettbewerb. Der so geringere Ressourcenbestand lässt den Monopolisten wiederum einen konservativeren Extraktionspfad einschlagen.

Entfernt man sich von den engen Grenzen dieser Modellwelt, so lassen sich weitere Faktoren identifizieren, die zu einer Verschiebung des Ressourcenabbaus in die Zukunft führen. So wird beispielsweise bei TOL et al. (2006) ausführlich die Möglichkeit diskutiert, dass sich die Diskontrate eines Wettbewerbers von der des Monopolisten unterscheidet. Die Größe des Monopolisten ermöglicht eine bessere Risikoverteilung und damit einen leichteren Zugang zu Kapital. In der Folge nimmt damit auch die vorausgesetzte Kapitalverzinsung ab, d.h. der Zinssatz  $r$  sinkt für den Monopolisten, wodurch sich wiederum ein verzögerter Ressourcenabbau ergibt. Unsicherheiten sind eine weitere wichtige Quelle dieses sog. HOTELLING-SOLOW-Paradoxon und werden detailliert bei DASGUPTA/STIGLITZ (1981) sowie bei KATAYAMA/FUMIO (1998) dargestellt. Letztere geben in ihrem Artikel auch Einblick in die Wirkung von Marktzutrittsstrategien.

### **3.1.2 Aspekte der Verknappung von Erdöl**

Der Preis einer erschöpfbaren Ressource ist von einer Vielzahl von Bestimmungsfaktoren abhängig. In erster Linie geht der HOTELLING Preispfad aber auf die Knappheit der betrachteten Ressource zurück. Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, wie die Ressourcenknappheit im Modell den Anfangspreis der Ressource und damit auch den Preis der Ressource zu jedem anderen betrachteten Zeitraum bestimmt. Dieser Abschnitt widmet sich nun den real existierenden Knappheiten bei mineralischen Kraftstoffen.

In jüngerer Vergangenheit haben die Diskussionen um Peak Oil stark zugenommen. Die physische Verknappung von Erdöl umfasst jedoch nicht allein die Frage, wie viel Erdöl bereits verbraucht wurde und welcher Anteil der ursprünglich vorhandenen Erdölvorräte der gegenwärtigen und den künftigen Generationen noch zur Verfügung steht. Die physikalische Verknappung von Erdöl umfasst ebenso die begrenzte Aufnahmekapazität der Atmosphäre für Treibhausgase. Weitere Aspekte, die in diesem Abschnitt untersucht werden, sind die strategische Verknappung und die gesellschaftliche Verknappung von Erdöl.

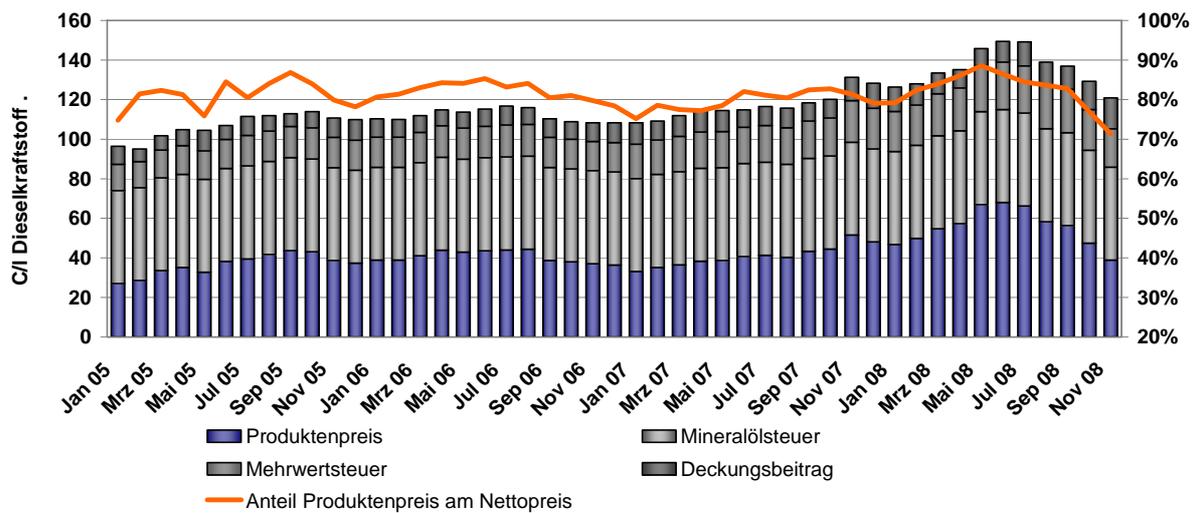
Steigende Erdölpreise resultieren fast automatisch in höheren Preisen für die mineralischen Kraftstoffe Benzin und Diesel. Bevor auf die verschiedenen Aspekte der Verknappung von Erdöl näher eingegangen wird, soll hier zunächst ein kurzer Blick auf die Zusammensetzung des Preises bei mineralischen Kraftstoffen geworfen werden. Dies dient der Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich auf die mineralischen Kraftstoffe.

#### **ZUSAMMENSETZUNG DES PREISES BEI MINERALISCHEN KRAFTSTOFFEN**

Der dominierende Einfluss des Weltmarktpreises für Erdöl auf die Preisbildung bei mineralischen Kraftstoffen ist unbestritten. Für diese Arbeit genügt es, hier nochmals den Umfang dieses Einflusses zu verdeutlichen.

Mitteldestillate wie Benzin und Diesel werden europaweit an verschiedenen Börsen gehandelt. Der sog. Produktpreis, zu welchem eine Raffinerie ein Destillat am Großhandelsmarkt anbietet, wird hauptsächlich durch den Weltmarktpreis für Erdöl bestimmt. Ähnlich wie bei der Herstellung von Biokraftstoffen nehmen auch bei der Produktion von Benzin und Diesel andere Kostenpositionen wie Personal oder Investitionen in Gebäude und Maschinen eine eher untergeordnete Rolle ein. Der Einfluss des Weltmarktpreises für Erdöl schlägt sich daher ebenfalls im Verbraucherpreis von Kraftstoffen an den Tankstellen nieder. Für das Beispiel Kraftstoffdiesel zeigt Abbildung 3.3 die Zusammensetzung des Tankstellenpreises sowie die Bedeutung des Erdölpreises als Hauptbestandteil des Produktpreises für das Mitteldestillat Diesel.

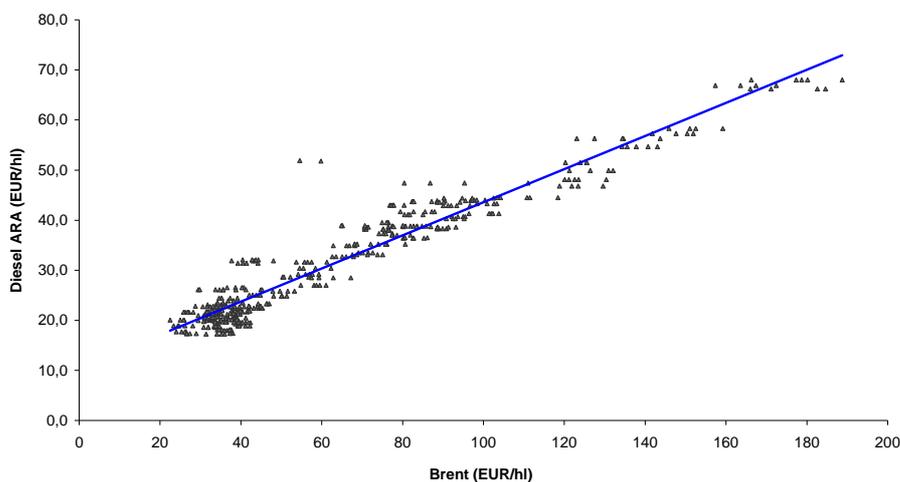
**Abbildung 3.3** Zusammensetzung des Diesel Tankstellenpreises und Ölpreiseinfluss



Quelle: Eigene Darstellung nach MWV(2009b).

Wie Abbildung 3.4 deutlich zeigt, besteht ein sehr starker Zusammenhang zwischen dem Produktpreis der Notierung Rotterdam für das Mitteldestillat Diesel und dem daraus resultierenden Preis für Kraftstoffdiesel an deutschen Tankstellen. Der Korrelationskoeffizient von 0,96 bei 466 Datenpunkten bestätigt diese Aussage.

**Abbildung 3.4** Notierungen Erdöl (Brent) und Diesel



Quelle: Eigene Berechnung nach EIA (2008) und MWV (2008a, b)

In ähnlicher Höhe ist auch der Produktpreis für Benzin mit dem Weltmarktpreis für Erdöl korreliert. In der Konsequenz spiegelt sich der Preisbildungsmechanismus von Erdöl als einer erschöpfbaren Ressource in der Preisbildung der Raffinerien und Tankstellen wieder.

## PHYSISCHE VERKNAPPUNG

Mit dem Begriff der physischen Verknappung von Erdöl wird zumeist die Endlichkeit der vorhandenen Erdölvorräte assoziiert. Diese schränken ganz unmittelbar die Nutzung von Erdöl ein. Dies gilt unabhängig davon, ob Erdöl nun zur Produktion von mineralischen Kraftstoffen oder als Grundstoff für verschiedene Medikamente genutzt werden soll. Ebenso einschränkend wirkt aber auch die begrenzte Aufnahmefähigkeit der Erdatmosphäre für Treibhausgasemissionen. Weil sie nur langsam abgebaut werden können, reichern sich Treibhausgasemissionen in der Erdatmosphäre an. Die hiermit verbundene Einschränkung der Nutzung von Erdöl ist hingegen ausdrücklich abhängig vom Nutzungszweck. Die aus Erdöl gewonnenen Kunststoffe an sich verursachen zunächst keine Treibhausgasemissionen. Erst im Zeitverlauf und bei Verbrennung entstehen hier Treibhausgasemissionen. Anders jedoch die Nutzung von Erdöl als Energieträger, wie beispielsweise im Form mineralischer Kraftstoffe. Die Erzeugung von elektrischer oder kinetischer Energie oder Wärme verursacht stets Treibhausgasemissionen, die sich in der Atmosphäre anreichern. Zunächst wird nun die Knappheit der Erdölvorräte beleuchtet. Anschließend wird diskutiert, inwiefern sich die beschränkte Aufnahmekapazität der Erdatmosphäre auf den Hotelling Preispfad der erschöpfbaren Ressource Erdöl bzw. mineralischer Kraftstoffe auswirken kann.

Die globalen Erdölvorräte lassen sich anhand der Wahrscheinlichkeit kategorisieren, mit welcher sie existieren und auf wirtschaftliche Weise gefördert werden können. Verschiedene Untersuchungen zum Umfang der Erdölvorräte sind dabei jedoch nur schwer vergleichbar. Insbesondere erschwert die große Zahl unterschiedlicher Klassifizierungsansätze den Vergleich. Ausführlich werden die verschiedenen Systeme bei ETHERINGTON/RITTER (2007) sowie IEA/OECD (2008) beschrieben.

Die größte Anstrengung für eine einheitliche Klassifikation wurde 2007 gemeinschaftlich von der Society of Petroleum Engineers (SPE), des World Petroleum Council (WPC), der American Association of Petroleum Geologists (AAPG) und der Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE) unternommen (IEA/OECD 2008: 198f). Diese *Petroleum Resources Management System* (PRMS) genannten Richtlinien zur Definition und Klassifikation von Erdölressourcen haben in den letzten Monaten eine breite Zustimmung in der wissenschaftlichen Literatur wie wohl in den entsprechenden Wirtschaftssektoren erfahren. Insbesondere zeichnet sich der Ansatz durch eine dynamische und projektbasierte Methodologie aus. Erstmals werden Schätzungen zum Umfang der förderbaren Erdölmengen direkt mit den getroffenen Investitionsentscheidungen verknüpft. Auf diese Weise wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich Investitionsentscheidungen über das Wirtschaftlichkeitskriterium am Weltmarktpreis für Erdöl orientieren und dieser damit auch bestimmend für den Umfang der förderbaren Erdölmengen ist. Abbildung 3.5 zeigt die Klassifikation von Erdölvorräten nach dem PRMS-Ansatz.

**Abbildung 3.5** Klassifikation der Erdölvorräte

Total petroleum initially in place	Discovered petroleum initially in place	Commercial	PRODUCTION		
			Proved (1P)	Proved Probable (2P)	Proved Probable Possible (3P)
		Subcommercial	CONTINGENT RESOURCES		
	Low estimate		Best estimate	High estimate	
	Unrecoverable				
	Undiscovered petroleum initially in place	PROSPECTIVE RESOURCES			
		Low estimate	Best estimate	High estimate	
		Unrecoverable			

Quelle: SPE (2007)

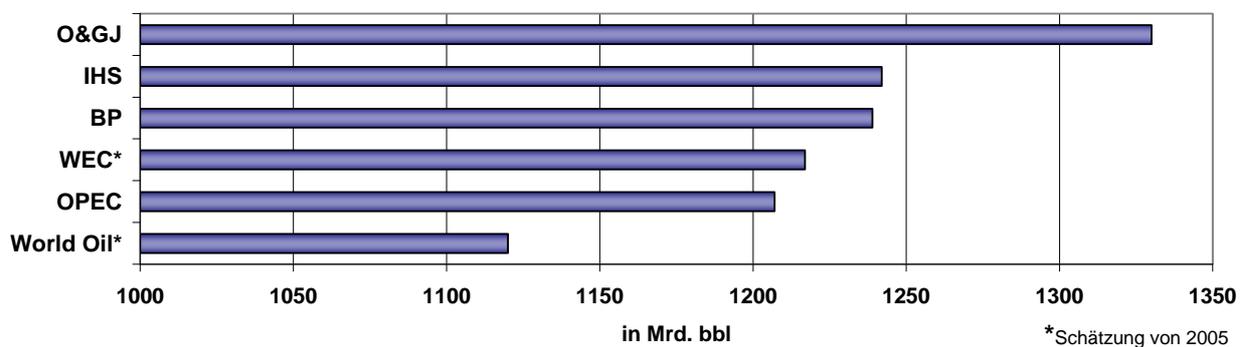
Dabei bestimmen die Wahrscheinlichkeit der Existenz und die Wahrscheinlichkeit der wirtschaftlichen Ausbeutung einer Lagerstätte zusammen die Einteilung in Klassen. Unter *1P Vorräten* versteht man diejenigen Erdölmengen, die aufgrund vorliegender geologischer und produktionstechnischer Informationen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit aus bekannten Lagerstätten unter gegenwärtig wirtschaftlichen und technologischen Produktionsbedingungen gewonnen werden können (MASUHR 1990: 345). Als Unterschranke der Wahrscheinlichkeit eines wirtschaftlichen Abbaus wird dabei ein Wert von 90% angenommen. Senkt man diese Wahrscheinlichkeit auf 50% bzw. auf 10%, so erweitern sich die Erdölvorräte um wahrscheinliche (*Probable*) und mögliche Mengen (*Possible*). Diese werden als *2P Vorräte* bzw. *3P Vorräte* bezeichnet. *Contingent Resources* zeichnen sich demgegenüber durch eine geringere Wahrscheinlichkeit der geologischen Existenz aus, bei *Prospective Resources* ist diese nochmals deutlich geringer.

Diese Klassifikation kann sowohl auf konventionelle Ölreserven als auch auf unkonventionelle Reserven angewandt werden. Die Charakterisierung als konventionell oder unkonventionell beinhaltet noch keine Beurteilung der Wahrscheinlichkeit einer wirtschaftlichen Förderung dieser Erdölbestände oder ihrer Existenz. Zwar weisen konventionelle Ölreserven meist günstigere Abbaubedingungen auf, gleichwohl existieren auch hier Lagerstätten, deren Abbau nur mit neuen Technologien möglich ist. So ist etwa die Technologie zur Erdölförderung aus Lagerstätten in der Tiefsee oder Antarktis noch nicht vollständig entwickelt. Unter unkonventionellen Ölreserven versteht man im Allgemeinen Ölsande, extra schweres Erdöl, Ölschiefer, Coal-to-Liquid und Gas-to-Liquid (IEA/OECD 2008: 200). BtL oder Pflanzenöl hingegen werden weder zu den unkonventionellen noch den konventionellen Ölreserven gezählt.

Während mit dem PRMS-Ansatz ein deutlicher Fortschritt hinsichtlich einer gemeinsamen Klassifizierung und damit eines gemeinsamen Verständnisses der Begrifflichkeiten erreicht

wurden, bestehen weiterhin beträchtliche Unterschiede in der technischen Vorgehensweise zur Messung der Vorräte in den verschiedenen Förderländern. Abhängig von der Klassifikation und Messmethode werden in den verschiedenen Untersuchungen unterschiedliche Ergebnisse für die verbleibenden Ölreserven veröffentlicht, wie Abbildung 3.6 deutlich macht. So beziehen sich zwar die meisten Schätzungen auf 1P Vorräte, die IHS schätzt jedoch den Umfang von 2P Vorräten. World Oil schließt im Gegensatz zu den anderen Untersuchungen Gas-to-Liquid nicht ein, und BP (2008), O&GJ (2007) und OPEC (2008) berücksichtigen zusätzlich die kanadischen Ölsande. Hinzu kommen unterschiedliche Messmethoden, weshalb die Bandbreite der Differenzen der vorliegenden Schätzungen rund 200 Mrd. bbl beträgt.

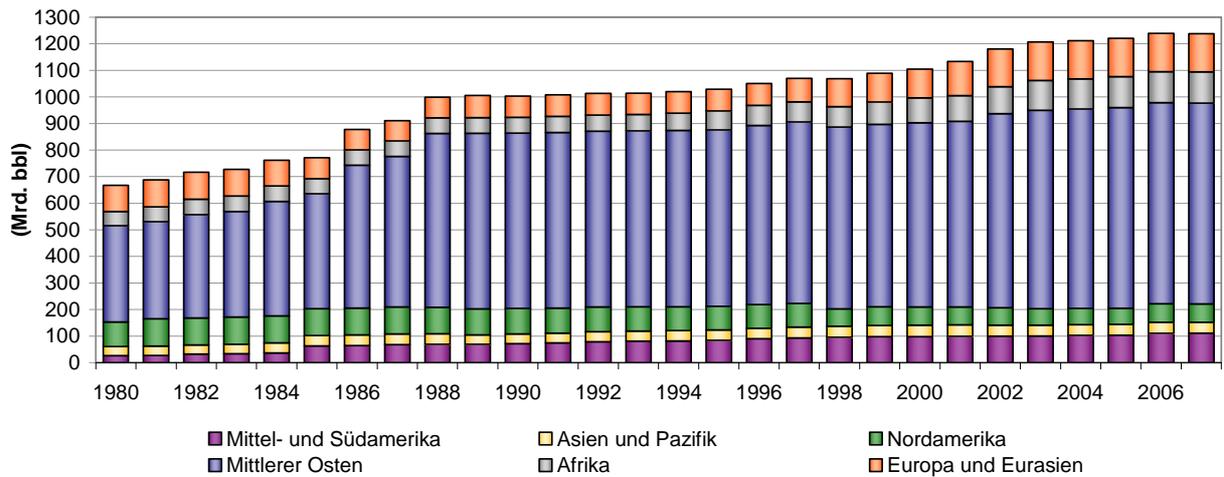
**Abbildung 3.6** Schätzungen zum Umfang der verbleibenden Ölreserven 2007



Quelle: Eigene Darstellung nach IEA/OECD (2008), BP (2008), OPEC (2008), O&GJ (2007) und WEC (2007)

Der Umfang der bekannten und mit hoher Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich förderbaren Erdölmengen hat nach Abbildung 3.7 im Laufe der letzten Jahre trotz eines steigenden Fördervolumens zugenommen. Dies ist jedoch zum geringsten Teil das Ergebnis von Explorationsaktivitäten. Die Entdeckung neuer Lagerstätten konventioneller oder unkonventioneller Art ging von jährlich durchschnittlich rund 56 Mrd. bbl zwischen 1960 und 1969 auf etwa 16,4 Mrd. bbl seit 2000 zurück (IEA/OECD 2008: 203f). Seit Mitte der 1980er Jahre sind diese Funde nicht mehr ausreichend, um die jährliche Produktion zu decken. Seit 2000 werden jährlich durchschnittlich 400 Mio. bbl Erdöl mehr gefördert, als bei Explorationsaktivitäten entdeckt. Hingegen haben der steigende Ölpreis und technologischer Fortschritt dazu beigetragen, dass der Umfang wirtschaftlich abbaubarer Ölbestände seit 1980 fast kontinuierlich zugenommen hat. Den größten Zuwachs verzeichnen dabei der Mittlere Osten, Europa und Afrika. Einzig in Nordamerika ist der Umfang der Ölreserven rückläufig. Die USA gehört seit Jahren zu den führenden Erdölförderländern. Gleichwohl sind die wahrscheinlich wirtschaftlich förderbaren Reserven hier deutlich geringer, als dies in den OPEC Staaten der Fall ist. In der Konsequenz übersteigt das Fördervolumen den Reservenzuwachs infolge eines steigenden Ölpreises und der Umfang der Ölreserven sinkt. Im asiatischen und pazifischen Raum haben sich in den letzten Jahren nur marginale Veränderungen des Umfangs der Ölreserven ergeben. In Summe hat sich der Umfang der P1 Ölreserven zwischen 1980 und 2007 jedoch fast verdoppelt.

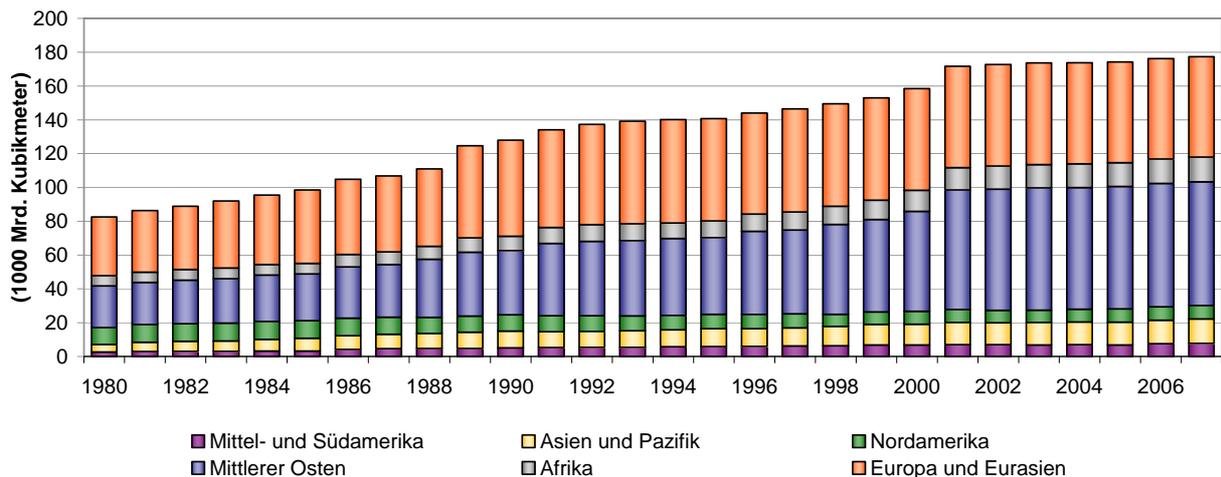
**Abbildung 3.7** Entwicklung der sicheren Erdölreserven nach Regionen



Quelle: Eigene Darstellung nach BP (2008)

Die im Jahr 2007 sicheren Erdölreserven von knapp 1.240 Mrd. bbl würden die Erdölversorgung für die nächsten 40 Jahre sicherstellen, würde das Fördervolumen aus diesem Jahr von täglich 85,6 Mio. bbl beibehalten werden und künftige Explorationsaktivitäten erfolglos bleiben. Dieser Wert wird üblicherweise als statistische Reichweite bezeichnet und ist ein Maß für die Knappheit einer Ressource. Weniger knapp sind die Erdgasreserven, wie Abbildung 3.7 verdeutlicht. Die statistische Reichweite beträgt hier 60 Jahre. Jedoch stellt dieses Knappheitsmaß lediglich eine Momentaufnahme der betrachteten Situation dar und ist zur Beurteilung der Knappheit einer Ressource daher nur bedingt geeignet.

**Abbildung 3.8** Entwicklung der sicheren Erdgasreserven nach Regionen



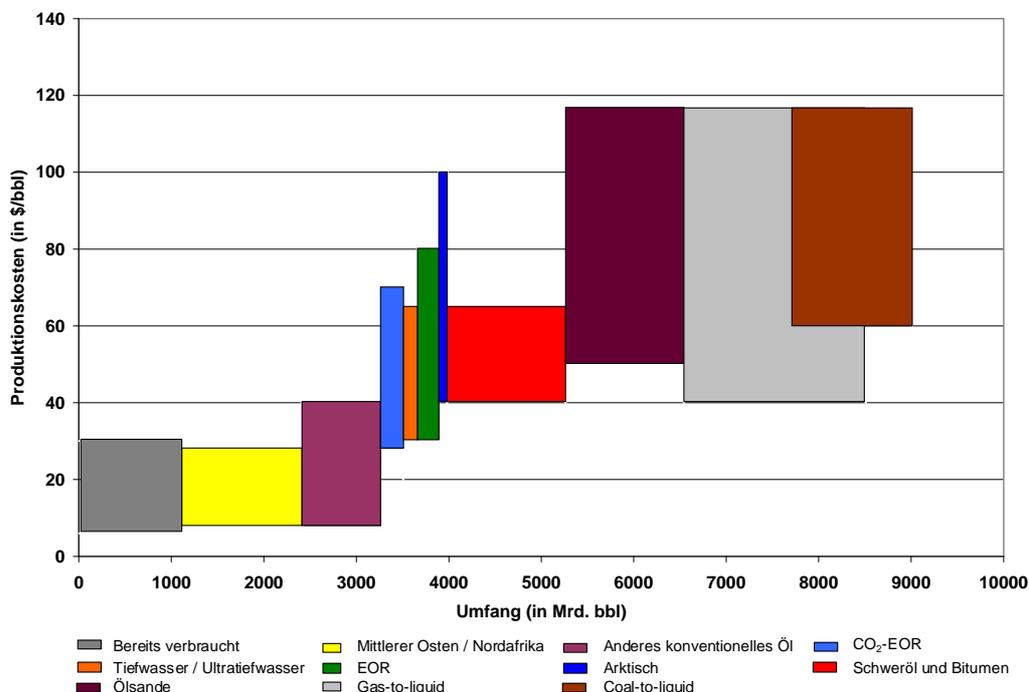
Quelle: Eigene Darstellung nach BP (2008)

Ginge lediglich der Umfang der derzeit wirtschaftlich abbaubaren Erdölvorräte in die Preisbildung am Weltmarkt ein, dann lägen die Ölpreise heute noch deutlich höher als die Rekord-

preise, welche im Sommer 2008 zu verzeichnen waren. Wie bereits oben jedoch ausgeführt hängt das wirtschaftlich förderbare Erdölvolumen insbesondere auch von der Höhe des Erdölpreises am Weltmarkt ab. Steigende Erdölpreise führen dazu, dass bislang unrentable Projekte ihre Vollkosten erwirtschaften können und so ein größeres Erdölvolumen in den Markt gebracht wird. Potentiale für die künftige Förderung von Erdöl liegen gleichermaßen in konventionellen wie in unkonventionellen Erdölbeständen. Eine umfassende Analyse der Förderkosten verschiedener Erdölvorräte wird etwa bei COUVILLION (2008) und KUUSKRAA (2006) vorgenommen. TZIMAS et al. (2005) beleuchtet insbesondere die europäische Perspektive. Die von der IEA (2005) zusammengestellte und von IEA/OECD (2008) aktualisierte langfristige Angebotskurve für Erdöl in Abbildung 3.9 bietet einen Überblick über die Potentiale unterschiedlicher Erdölreserven.

Bei einem ausreichend hohen Erdölpreis ständen nach Abbildung 3.9 rund 9.000 Mrd. bbl Erdöl zur Deckung des weltweiten Bedarfs zur Verfügung. Damit könnte die gegenwärtige Fördermenge für die nächsten rund 290 Jahre beibehalten werden. Diese Überschlagsrechnung unterstreicht die Bedeutung des Weltmarktpreises für Erdöl für die Beurteilung der bestehenden Knappheit der Ressource. Im Zeitverlauf muss der Erdölpreis also steigen, damit der weltweite Bedarf an dem Rohstoff gedeckt werden kann.

**Abbildung 3.9** Langfristige Angebotskurve für Erdöl



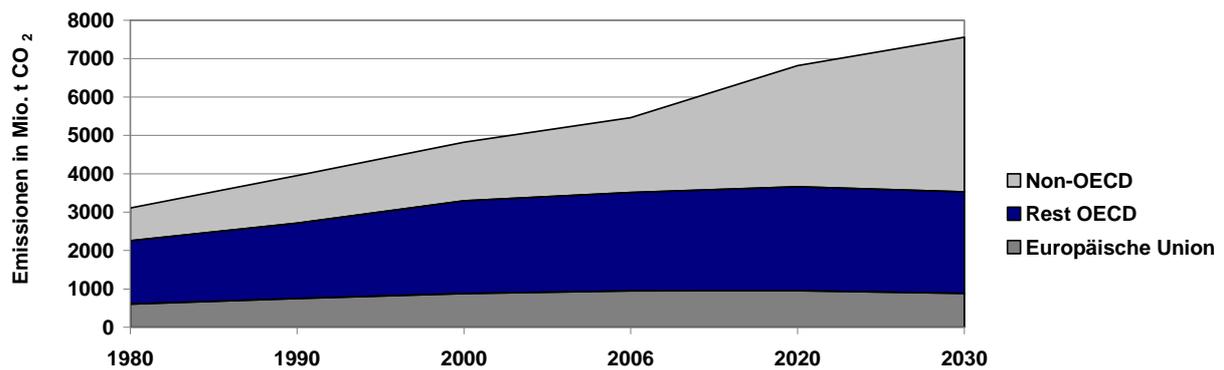
Quelle: Eigene Darstellung nach IEA/OECD (2008: 217ff)

Im Modell wurden diese unterschiedlichen Förderkosten verschiedener Lagerstätten nicht berücksichtigt. Damit soll jedoch keine Aussage über ihre Relevanz für den Preispfad einer erschöpfbaren Ressource im Zeitverlauf getroffen werden. Vielmehr würde die Komplexität des Modells durch die Berücksichtigung verschiedener Förderkosten nicht unerheblich ansteigen. Im Vergleich zur rein verbalen Erläuterung lassen sich durch eine solche explizite Berücksichtigung aber kaum mehr Erkenntnisse generieren. Daher soll es an dieser Stelle bei einer verbalen Erläuterung bleiben. Die Analyse des vorherigen Abschnitts hatte den Preispfad nach HOTELLING zum Ergebnis: der Marktpreis einer erschöpfbaren Ressource steigt im Zeitverlauf in Höhe des Marktzinses an. Dies gilt nicht nur bei Vernachlässigung von Förderkosten, sondern darüber hinaus auch bei konstanten Förderkosten. Umgekehrt bedeutet dies, dass der Ressourcenbestand bei steigendem Preis immer geringer wird. Dem entgegen wirkt nun die Berücksichtigung verschiedener Förderkosten der konventionellen und unkonventionellen Erdölreserven. Je höher der Marktpreis, desto mehr Erdölreserven werden ökonomisch abbaubar. Im Ergebnis kann dies zu Sprungstellen des HOTELLING Preispfades beim Übergang zur nächst teureren Ressource führen. Die Erklärung hierfür ist verhältnismäßig simpel. Bei Erschöpfung einer Lagerstätte ist jedoch nicht zwangsläufig der Marktpreis erreicht, bei dem die nächst teurere Lagerstätte abgebaut werden würde. Insbesondere wäre dies bei größeren Preisdifferenzen der in der Kostenaufstellung aufeinanderfolgenden Vorrattypen der Fall. Abhängig von der Nachfrage kann es also zu Sprungstellen im HOTELLING Pfad kommen, wobei die Preise der einzelnen Teilabschnitte wieder nach HOTELLING in Höhe des Marktzinses ansteigen werden.

Die begrenzten Erdölreserven sind jedoch nur ein Aspekt der physikalischen Knappheit bei Erdöl. Wie bereits erläutert, komplettiert erst die begrenzte Aufnahmefähigkeit der Erdatmosphäre die Diskussion um die physikalische Verknappung von Erdöl.

Energiebedingte Treibhausgasemissionen machen den überwiegenden Teil der anthropogenen Treibhausgasemissionen aus. Dabei kommt insbesondere der Stromerzeugung eine exponierte Bedeutung zu. Im Jahr 2006 ging der mit weltweit 41% größte Anteil der energiebedingten Treibhausgasemissionen auf diesen Sektor zurück. Das entspricht einer Emissionsmenge von 11,4 Gt, die nach Schätzungen von IEA/OECD (2008: 385ff) in den nächsten Jahren noch deutlich zunehmen wird. Trotz Berücksichtigung von Biomassekraftwerken und weiteren CO<sub>2</sub>-freien und CO<sub>2</sub>-armen Technologien zur Stromerzeugung beziffert die Untersuchung die Zunahme auf 7,6 Gt bis 2030. Insgesamt steigen die energiebedingten Treibhausgasemissionen bis 2030 um 12,7 Gt auf dann insgesamt 40,6 Gt. Für den Verkehrssektor wird geschätzt, dass er mit einem Fünftel zur Zunahme der globalen Treibhausgasemissionen bis 2030 beitragen wird. Im Jahr 2006 wurden verkehrsbedingt 6,4 Gt Treibhausgase emittiert. Nach der Stromerzeugung ist der Verkehrssektor damit der größte Emittent von Treibhausgasen. Auf ihn entfallen 23% der energiebedingten Treibhausgasemissionen im Jahr 2006.

**Abbildung 3.10** Regionale Entwicklung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen



Quelle: Eigene Darstellung nach IEA/OECD (2008: 393)

Ein Zuwachs der verkehrsbedingten Emissionen wird vor allem für Nicht-OECD Länder erwartet. Bis 2030 wird sich der Bestand an Fahrzeugen in diesen Ländern nahezu verdreifacht haben. In den OECD Ländern fällt die Zunahme des Fahrzeugbestands geringer aus. Die hierdurch erwarteten Mehremissionen werden gleichzeitig jedoch durch Effizienzsteigerungen der Verbrennungsmotoren sowie den Einsatz von Biokraftstoffen überkompensiert. Abbildung 3.10 veranschaulicht diese Entwicklung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen nach Regionen.

Innerhalb des Verkehrssektors ist der Straßenverkehr verantwortlich für den weitaus überwiegenden Teil der Treibhausgasemissionen. In Deutschland beträgt der Anteil des Straßenverkehrs derzeit rund 92% (UBA 2008), ähnlich gilt dies auch für die anderen europäischen Industrieländer und in Teilen auch für eine Vielzahl von Entwicklungsländern. Der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs dominieren den Verkehrssektor und seine Emissionen werden künftig noch deutlich zunehmen (IEA/OECD 2008: 393).

Die Fähigkeit der Atmosphäre zur Aufnahme von Treibhausgasen ist jedoch insofern begrenzt, als abhängig von der Höhe der Treibhausgaskonzentration mit einem Wandel des globalen Klimas zu rechnen ist. Im Auftrag der britischen Regierung untersuchte und berechnete der ehemalige Chefökonom der Weltbank Nicholas STERN (2006) die wirtschaftlichen Einflüsse des Klimawandels in Abhängigkeit von der Treibhausgaskonzentration in der Erdatmosphäre. Der Bericht ist heute als STERN Review bekannt. Beim prognostizierten Emissionswachstum würde im Jahr 2035 ein Niveau von 550 ppm CO<sub>2</sub> erreicht werden (STERN 2006: iii). Ende Januar 2009 wurde von Japan ein Satellit eigens zur Messung und Beobachtung der Entwicklung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre ins Weltall geschickt (POINT CARBON 2009). Von ihm erhofft man sich genauere Messergebnisse. Bei einem solchen Niveau von 550 ppm CO<sub>2</sub> werden die Kosten des prognostizierten Klimawandels auf etwa 5 % bis 10 % des Bruttoinlandsprodukts geschätzt (STERN 2006: ix), wobei die Kosten in den Entwicklungsländern wahrscheinlich deutlich höher liegen werden als in den Industrieländer.

Im Ergebnis veranschaulicht der STERN Review auf sehr eindringliche Weise die begrenzte Kapazität der Erdatmosphäre zur Aufnahme von Treibhausgasen. Die Verknappung der Nutzung fossiler Energieträger, die sich hieraus ergibt, ist heute aller Wahrscheinlichkeit nach sehr viel prekärer als der beschränkte Umfang der Ressourcenvorräte. Gleichwohl geht diese Form der Knappheit immer noch nur bedingt in den Verbraucherpreis fossiler Energieträger ein. Dahinter steht offensichtlich die Problematik der effizienten Bereitstellung globaler öffentlicher Güter. Traditionell ist die Perspektive für die Bereitstellung öffentlicher Güter eine nationalstaatliche. Üblicherweise werden diese nationalen öffentlichen Güter entweder freiwillig über kooperative Absprachen, oder wie in vielen Fällen durch den Staat bereitgestellt, wobei die Finanzierung in diesem Fall über den Staatshaushalt erfolgt. Globale öffentliche Güter jedoch, deren Effekte über Staatsgrenzen hinaus reichen, erfordern einen anderen Umgang. Die Bereitstellung globaler öffentlicher Güter kann einzig im Konsens der betroffenen Staaten und in deren Zusammenwirken Erfolg haben. Nur in besonderen Ausnahmefällen ist die isolierte Bereitstellung durch einen Nationalstaat denkbar. Die Stabilität des Weltklimas gehört aber sicherlich nicht zu diesen Ausnahmefällen. Vielmehr ist sie ein Beispiel für die schwierige politische Einigung und den schwerfälligen Umsetzungsprozess zur Bereitstellung bzw. Sicherung eines globalen öffentlichen Gutes. International verbindliche Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen galten erstmals ab 2008. Sicherlich kann darüber gestritten werden, ob dieses Klimaziel ausreichend ist, um die angestrebte Stabilisierung des Weltklimas auf einem verträglichen Niveau zu erreichen. Unabhängig davon begrenzen sie aber die möglichen Treibhausgasemissionen und schränken auf diese Weise die Nutzung fossiler Energieträger wie Erdöl ein.

Diese Form der Knappheit ist im Modell jedoch nicht Teil des Optimierungsproblems der Ressourcen extrahierenden Unternehmen und geht daher auch nicht in die HOTELLING Regel zur effizienten Bereitstellung erschöpfbarer Ressourcen ein. Anders als die begrenzte Verfügbarkeit des Energieträgers Erdöl gehört die Erdatmosphäre nicht zum Besitz der Ressourcen extrahierenden Unternehmen oder Nationalstaaten. In der Folge wird das Marktergebnis vom gesellschaftlich optimalen Einsatz erschöpfbarer Ressourcen abweichen, wenn im Gegensatz zu den bisherigen restriktiven Modellannahmen Marktversagen zugelassen wird. In diesem Fall berücksichtigt der gesamtwirtschaftliche Planer im Gegensatz zu den Ressourcen extrahierenden Unternehmen oder Nationalstaaten die sinkende Aufnahmekapazität der Erdatmosphäre für Treibhausgasemissionen und die hieraus resultierende Verknappung der Nutzungsmöglichkeiten fossiler Energieträger. Der HOTELLING Preispfad des gesamtwirtschaftlichen Planers wird folglich höher liegen als bei wettbewerblicher oder monopolistischer Extraktion der erschöpfbaren Ressource.

Hieraus zu schließen, dass der derzeitige Erdölpreis zu niedrig ist, wäre allerdings verfrüht. Das einfache, didaktische Ressourcenmodell ist mitnichten geeignet, fundamental gerechtfertigte Ressourcenpreise zu berechnen, welche man dann mit den tatsächlichen Marktpreisen

vergleichen könnte. Jedoch zeigt das Modell anschaulich, dass die Ressourcenintensität bei privatwirtschaftlicher Bewirtschaftung der erschöpfbaren Ressourcen ohne einen regulierenden Staatseingriff zu hoch ist. Schenkt man der Politik Glauben, dann trifft dies letztlich auch auf unsere Realität zu. So haben sich die Vertragsstaaten des Kyoto Protokolls dazu verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen bis 2012 um durchschnittlich 5,2% unter das Niveau von 1990 zu senken. Dieses Klimaziel hat zwar nicht umfassend, so aber doch in Teilen zu einem Anstieg der Verbraucherpreise für fossile Energieträger geführt. Durch Umweltsteuern oder die Preise für Emissionszertifikate verteuert sich die Nutzung fossiler Energieträger. Im Ergebnis steigt durch diese umweltpolitischen Instrumente der Preispfad fossiler Energieträger an. Inwiefern dieser jedoch dem gesellschaftlich optimalen HOTELLING Preispfad entspricht, ist auch mit Hilfe anderer Ansätze kaum zu ermitteln.

### **STRATEGISCHE VERKNAPPUNG**

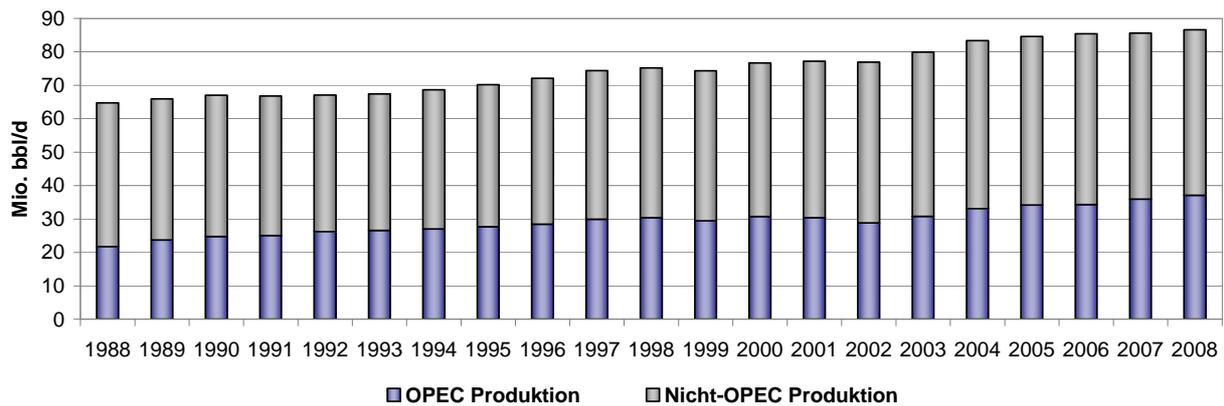
Unabhängig vom Umfang der globalen Erdöl- und Erdgasvorräte oder nationale Klimaschutzziele ermöglicht die Strukturen auf den Märkten für fossile Energieträger und insbesondere auf dem Weltmarkt für Erdöl eine strategische Verknappung des Rohstoffangebots.

Die Erdöl- und Erdgasreserven konzentrieren sich, wie in Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 dargestellt, auf einige wenige Staaten. Mehr als 70% der bekannten globalen Erdölvorkommen und ein nur geringfügig geringerer Teil der weltweiten Erdgasreserven befinden sich in einer Region, die *strategische Ellipse* genannt wird. Hierzu zählen weite Teile des Mittleren Ostens und Bereiche Zentralasiens. Aber auch die Bedeutung afrikanischer Staaten als Erdölförderländer hat in den letzten Jahren zugenommen. Insbesondere ist dies auf die Zusammenarbeit mit der Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC) zurückzuführen. Gegründet wurde die OPEC 1960 zum Schutz gegen den Verfall des Listenpreises, den die meist privatwirtschaftlichen Erdölproduzenten seit den 1950er Jahren bis zu Beginn der 1970er Jahre gemeinsam festlegten. Nach diesem richteten sich auch die Abgaben an die Förderländer (MWV 2004: 5). Der Wunsch, selbst über den Preis ihrer Bodenschätze zu bestimmen führt schließlich zur Gründung der OPEC durch den Irak, Iran, Kuwait, Saudi-Arabien und Venezuela. Ziel war die Stabilisierung des Erdölpreises, die Vereinheitlichung der Erdölpolitik sowie die Sicherung der individuellen und gemeinsamen Interessen der Mitgliedstaaten (MWV 1996: 13). Heute umfasst die OPEC 13 Mitgliedstaaten, zu den Gründungsmitgliedern kamen Algerien, Angola, Libyen, Nigeria, Indonesien<sup>8</sup>, Katar, Ecuador und die Vereinigten Arabischen Emirate hinzu. Abbildung 3.11 zeigt den OPEC Anteil an der gesamten Erdölförderung.

---

<sup>8</sup> Indonesien hat Ende 2008 seinen Austritt aus der OPEC angekündigt, diesen bislang jedoch noch nicht vollzogen. Das Land kann durch die rückläufige OPEC Förderquoten seinen eigenen Bedarf nicht mehr decken und muss Erdöl importieren.

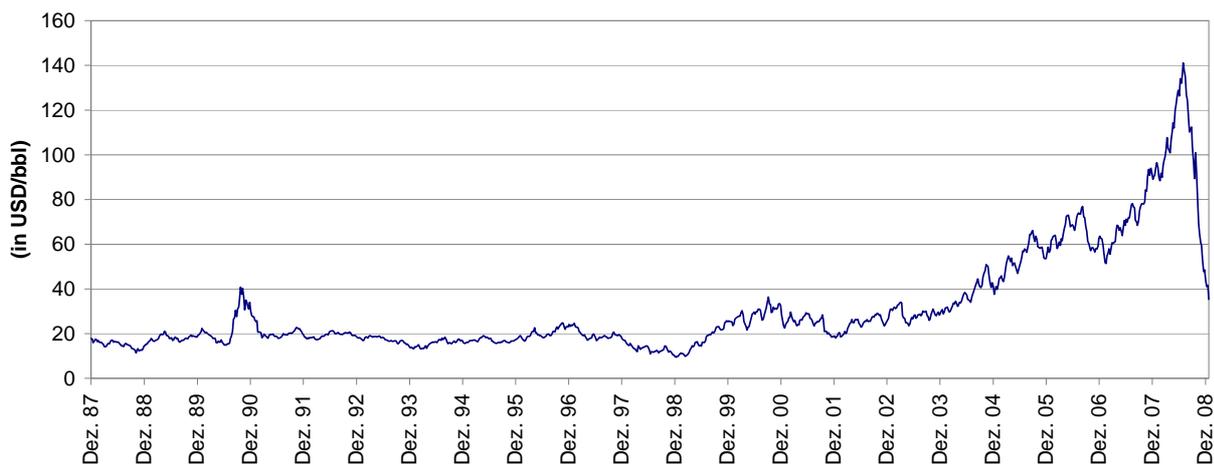
**Abbildung 3.11** Erdölproduktion 1988 bis 2007



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung nach IEA (1988-2008)

Die angestrebte Stabilisierung des Ölpreises hat sich dabei vor allem in der jüngeren Vergangenheit als recht schwierig erwiesen. Dies liegt in dem Umstand begründet, dass die Preissteuerung über die Anpassung der Fördermengen erfolgen muss und sich die vollständige Einhaltung der Förderquote kaum gelingen kann. Uneinigkeiten aufgrund divergierender Interessen der OPEC Mitglieder sorgen für weitere Komplikationen. Gleichwohl ist der Einfluss der OPEC auf die Preisbildung am Weltmarkt nicht zu leugnen. Im Jahr 2007 betrug der Anteil an den Fördermengen rund 42%. Die Reaktionen der Händler auf den Weltmärkten für Erdöl auf die Ankündigung von Förderkürzungen zeigen deutlich, dass dieser Anteil ausreichend ist, um den Weltmarktpreis signifikant zu beeinflussen.

**Abbildung 3.12** Spotpreise Erdöl (Brent) Europa 1987-2008



Quelle: Eigene Darstellung nach EIA (2008)

Die Betonung der Preis beeinflussenden Wirkung der OPEC Förderung bedeutet jedoch nicht, dass der Einfluss anderer Marktteilnehmer geleugnet wird. Insbesondere sorgen auch Speku-

lanten und Erwartungen für die Zukunft mitunter für Turbulenzen an den internationalen Börsen. Prognosen zur Entwicklung der Wirtschaft in Asien, der Wechselkurs, die Auslastung und der Zubau von Förderkapazitäten bestimmen maßgeblich die Termin- und Spotmärkte. Abbildung 3.12 zeigt die Entwicklung des Ölpreises in den vergangenen 20 Jahren und die hohe Volatilität vor allem in jüngster Zeit.

Die strategische Verknappung von Erdöl im Sinne der Festlegung der OPEC Förderquote ist alltägliche Praxis auf den Weltmärkten für Erdöl. Zu dieser allgemeinen strategischen Verknappung kommt auch die Möglichkeit einer gezielten Erdölverknappung als Instrument zur Erreichung politischer Ziele. Vor rund 30 Jahren hat Saudi Arabien unter dem damaligen Ölminister, dem Scheich YAMANI, ein Ölembargo ausgesprochen. Solche Maßnahmen zur strategischen Verknappung von Erdöl bewirken wie die physikalische Knappheit einen Rückgang des Angebots und damit steigende Preise im Modell.

### **GESELLSCHAFTLICHE VERKNAPPUNG**

Anders als die Erhöhung der Marktpreise fossiler Brennstoffe in Folge der physischen und strategischen Verknappung wirkt sich die gesellschaftliche Verknappung nicht direkt auf die Weltmarktpreise aus. Eine gesellschaftliche Verknappung von Kraftstoffen und damit von Erdöl lässt sich beispielsweise auf die breite Unterstützung einer nachhaltigen Energieversorgung in Europa und insbesondere in Deutschland zurückführen. Insbesondere in den USA, aber auch in Europa, entwickeln und etablieren sich derzeit im Kraftstoffbereich soziale Normen, welche den gesellschaftlichen Preis mineralischer Kraftstoffe in die Höhe schnellen lassen. Mit dem Markteintritt von Hybrid Fahrzeugen, wie beispielsweise dem Toyota Prius, erlitten insbesondere verbrauchsintensive Luxusfahrzeuge massive Reputationsverluste.

Die hierdurch induzierte Nachfrageänderung wirkt sich nur mittelbar auf die Weltmarktpreise für Erdöl aus. Über die Verbreitung umwelt- und vor allem klimafreundlicherer Antriebstechnologien geht die Nachfrage nach Erdöl zurück und die Weltmarktpreise sinken. Zum selben Ergebnis kommt es, wenn durch den Klimaschutz als gesellschaftliche Norm eine Verhaltensänderung beim Gebrauch von Fahrzeugen induziert wird. Die gesellschaftliche Anerkennung dafür, das „Auto einmal stehen zu lassen“, bewirkt ebenfalls mittelbar ein sinken der Weltmarktpreise für Erdöl.

Die gesellschaftliche Verknappung wirkt sich offensichtlich weit weniger direkt auf die Weltmarktpreise für Erdöl aus. Die gesellschaftliche Verknappung führt vielmehr zu einem Rückgang der Nachfrage und damit mittelbar zu einem Rückgang der Weltmarktpreise für Erdöl. Gleichzeitig steigen jedoch die Nutzungskosten von Erdöl aufgrund des gesellschaftlichen Drucks. Diese sind jedoch nicht genau quantifizierbar, trotzdem müssen sie in die Nutzungskosten einbezogen werden.

Wesentlich interessanter erscheint an dieser Stelle jedoch die Wirkung auf die Verbreitung von alternativen Antriebskonzepten und Biokraftstoffen. Die gesellschaftliche Verknappung von Erdöl schafft umgekehrt eine erhöhte Nachfrage nach alternativen Antriebskonzepten und Biokraftstoffen. Durch eine solche Separierung der Nachfrage nach Kraftstoff in mineralische Kraftstoffarten und Biokraftstoff wird sich die Diffusion alternativer Antriebstechnologien und Biokraftstoffen beschleunigen. Diese Schlussfolgerung ist recht einfach zu ziehen und bedarf nicht der Unterstützung durch eine Modellanalyse. Auch ohne eine Separierung der Nachfrage ist die Wirkungsweise auf die Diffusion jedoch abhängig von der jeweils gegebenen Marktstruktur. Für diese Untersuchung wird im nächsten Abschnitt das neoklassische Modell erschöpfbarer Ressourcen um eine Backstopstechnologie erweitert.

### 3.2 Neoklassische Analyse der Diffusion einer Backstopstechnologie

Die Verknappung der Ressource Erdöl geht wie Abschnitt 3.1 gezeigt hat einher mit steigenden Marktpreisen. Dabei bezieht sich die Verknappung von mineralischen Kraftstoffen auf Erdölbasis nicht allein auf die physikalische Knappheit des Erdöls. Ebenso wurden die strategische und die gesellschaftliche Knappheit mineralischer Kraftstoffe aufgezeigt. Die in der Folge steigenden Marktpreise und natürlich auch die Endlichkeit der Ressource an sich haben in der Vergangenheit Anbieter von Substituten auf den Plan gerufen. Insbesondere sind damit Hersteller von Biokraftstoffen gemeint, jedoch ist auch Erdgas als Substitut im Kraftstoffmarkt anzusehen. Im Folgenden wird nun die Diffusion eines erneuerbaren Substituts auf einem von erschöpfbaren Ressourcen dominierten Markt aus theoretischer Sicht untersucht. Dabei sollen insbesondere die Implikationen der unterschiedlichen Preisbildung für den Diffusionsverlauf ermittelt werden. Da erschöpfbare und erneuerbare Ressourcen unterschiedlichen Preisbildungsmechanismen unterliegen, ist zu erwarten, dass sich diese auch auf den Diffusionsverlauf auswirken.

Im Wesentlichen stellt die Backstopstechnologie einen Prohibitivpreis für die erschöpfbare Ressource dar. Wenn man wie im vorangehenden Abschnitt davon ausgeht, dass die erschöpfbare Ressource mit vernachlässigbaren Kosten gefördert werden kann, dann wird ihr Preis zunächst unter den Grenzkosten der Produktion des erneuerbaren Substituts liegen. Die Grenzkosten des Substituts sind in diesem Fall als Prohibitivpreis für die erschöpfbare Ressource zu verstehen. Wird dieser Preis überschritten, so fällt die Nachfrage nach der erschöpfbaren Ressource auf Null. Dies impliziert auch einen unterschiedlichen Diffusionsverlauf abhängig von der jeweiligen Marktstruktur. So kann ein Monopolist im Gegensatz zu einem wettbewerblichen Ressourcenangebot durch *limit pricing* den Markteintritt des erneuerbaren Substituts verhindern.

Ein solcher Prohibitivpreis kann auf unterschiedliche Weise modelliert werden. Zunächst kann er starr und unveränderlich vorgegeben werden. Dieser Fall ist aus der neoklassischen Theorie bereits hinreichend bekannt, so dass hier keine Wiederholung der Ergebnisse erfolgen muss. In der Realität ist jedoch davon auszugehen, dass die Grenzkosten nicht unabhängig von der produzierten Menge des erneuerbaren Substituts sind und darüber hinaus durch technologischen Fortschritt im Zeitverlauf sinken. Durch die Annahme solcher variabler Grenzkosten verändert sich der Verlauf der Diffusion einer Backstop-Technologie. Werden die Grenzkosten abhängig von der produzierten Menge modelliert, so erfolgt der Übergang auf die Backstop-Technologie nicht mehr sprunghaft. Vielmehr nimmt der Marktanteil des erneuerbaren Substituts sukzessive zu.

Bevor eine solche Diffusion einer Backstop-Technologie jedoch detailliert untersucht wird, wird zunächst ein Blick auf den Zusammenhang zwischen der Diffusion einer Backstop-Technologie und dem Wirtschaftswachstum geworfen. Die Frage des möglichen Wirtschaftswachstums als Folge der Knappheit der weltweiten Erdölreserven sowie die Rolle von Biokraftstoffen wird in der Öffentlichkeit recht hitzig diskutiert. Diese Kontroverse wird im folgenden Abschnitt aufgenommen, wenngleich die die Diskussion bestimmenden Unklarheiten bezüglich der Rohstoffverfügbarkeit sowie der ökonomischen Bewertung gegenwärtiger und zukünftiger Arten von Biokraftstoffen nicht nochmals aufgegriffen werden. Vielmehr wird der Zwang zur Adoption neuer Technologien durch die Unternehmen aufgezeigt.

### 3.2.1 Überlegungen zur Adoption neuer Technologien in Unternehmen

Die HOTELLING Regel macht nicht allein Aussagen über die Preisentwicklung einer erschöpfbaren Ressource. Diesbezüglich konnte gezeigt werden, dass der effiziente Preispfad sowohl im Wettbewerb als auch in der Monopolsituation im Zeitverlauf ansteigen wird. Darüber hinaus kann sie auch herangezogen werden, um die künftigen Wachstumsmöglichkeiten einer Gesellschaft zu untersuchen. Erschöpfbare Ressourcen dienen als normale Inputfaktoren für die verschiedenen Produktionsprozesse. Inwiefern ihre Endlichkeit tatsächlich wie eingangs beschrieben eine Beschränkung der Wachstumsmöglichkeiten darstellt, soll in diesem Abschnitt untersucht werden. Zur Schätzung der gesellschaftlichen Produktionsmöglichkeiten wird in der Regel eine einfache Cobb-Douglas Produktionsfunktion unterstellt. In Anlehnung an KRONENBERG (2006: 10) sei diese:

$$Y_t = A_t K_t^\gamma R_t^{1-\gamma} . \quad (3.14)$$

Wie in der Literatur üblich, z.B. bei HALTER et al. (1957), ARROW et al. (1961) oder ZELLNER/RVANKAR (1969), hängt auch hier der gesamte gesellschaftliche Output  $Y_t$  vom kumulierten Bestand an Produktionsfaktoren  $K_t$  sowie dem technologischen Fortschritt  $A_t$  ab. Als Produktionsfaktoren kommen beispielsweise physisches Kapital, Humankapital oder auch

Arbeitskraft in Betracht. Die periodischen Extraktionsmengen der Ressource hingegen werden vor dem Hintergrund der weiteren Analyse gesondert als  $R_t$  aufgeführt. Ihr Ausgabenanteil auf der Nachfrageseite bleibt aufgrund der Cobb-Douglas Funktion mit konstanten Skalenerträgen ebenfalls konstant:

$$\frac{p_t R_t}{Y_t} = 1 - \gamma = \text{const.} \quad (3.15)$$

Da der Preis unter der HOTELLING Regel mit einer konstanten Rate anwächst, muss das Verhältnis  $R_t/Y_t$  mit derselben Rate sinken. Anders ausgedrückt sinkt bei angenommenem konstantem Output die Ressourcenintensität der Ökonomie im Zeitverlauf in Höhe des Marktzinses. Die Befürchtung, die Ressourcenknappheit könnte das Wachstum einer Gesellschaft bremsen, wenn nicht gar umkehren, ist also nicht unbegründet. Ob der Mangel an erschöpfbaren Ressourcen jedoch die entscheidende Determinante für das Wirtschaftswachstum ist, hängt von technologischem Fortschritt und Faktorakkumulation ab. Abhängig hiervon ist ein konstanter gesellschaftlicher Output trotz und bei sinkender Ressourcenintensität gegeben.

Tatsächlich lies sich in den letzten Jahrzehnten sogar ein Wachstum des Bruttoinlandsproduktes bei sinkender Energieintensität beobachten. Eine Fortsetzung dieses Trends würde zur Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Energie führen, womit Wirtschaftswachstum sogar bei gleichzeitigem Rückgang des Energieverbrauchs möglich wäre (SMULDERS 1995). Fraglich ist jedoch, ob dies möglich ist. So argumentieren STERN/CLEVELAND (2004), dass die bislang beobachteten Fortschritte in der Energieeffizienz fast ausschließlich auf den Übergang zu qualitativ höherwertigen Treibstoffen zurückzuführen sind. Dieses Potential scheint jedoch nahezu ausgeschöpft. Es bleibt daher abzuwarten, inwiefern künftig eine wirkliche Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch möglich wird. Doch selbst unter den optimistischsten Wissenschaftlern herrscht Konsens darüber, dass sich dieser Trend nicht unendlich fortsetzen kann (KRONENBERG 2006: 3). VAN ZON/YETKINER (2001) bemerken hierzu treffend „people cannot live in virtual houses and live on virtual food“.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien. Entscheidend hierbei ist, in welchem Maße regenerative Energiequellen dem heutigen aber auch künftigen Energiebedarf gerecht werden können. Realistisch erscheint für Deutschland ein Beitrag von etwa 50% am Gesamtenergieverbrauch in 2050 (NITSCH et al. 2004: 18). Ähnlich stellt sich die Situation global dar.

Dabei liegt das Potential von Biokraftstoffen weit über dem derzeit realisierten Marktanteil. Bislang nehmen Biokraftstoffe im Verkehrssektor noch eine eher untergeordnete Rolle ein. Entscheidend für den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen ist bei ausreichendem Potential vor allem der direkte Preisvergleich. Die Modellierung des Markteintritts und der Gewinn von Marktanteilen durch erneuerbaren Energien werden im folgenden Kapitel für den Bereich der Biokraftstoffe vorgenommen. Als entscheidende Faktoren haben sich bei den Untersuchungen

die Markt- und Kostenstrukturen in den Teilmärkten sowie die Heterogenität der Nachfrage nach Energie herauskristallisiert. Entsprechend wurde für das neoklassische Modell im folgenden Kapitel der Fokus gesetzt. Dabei soll die Schwerpunktsetzung bei der Vielzahl weiterer Bestimmungsfaktoren diesen jedoch nicht ihre Bedeutung absprechen. Sicherlich leistet beispielsweise die Berücksichtigung von Unsicherheiten oder Maßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien einen nicht unerheblichen Beitrag zur Erklärung des Ablaufs der Substitution eines fossilen Energieträgers. Die Einführung weiterer Variablen kann jedoch nur ein zweiter Schritt sein, der auf dem grundlegenden Verständnis der Funktionsweise des hier betrachteten Energiemarktes aufbaut.

### **3.2.2 Diffusion bei steigenden Grenzproduktionskosten**

Entsprechend dem Ziel, den Übergang von einer billigen erschöpfbaren Ressource auf ein teureres Substitut zu beschreiben, werden in ökonomischen Modellen meist die Extraktionskosten als vernachlässigbar angenommen. Im Ergebnis unterscheidet sich diese Annahme nur geringfügig von der Unterstellung konstanter Grenzkosten der Extraktion. In einer Vielzahl von Artikeln wurde aufgezeigt, dass die HOTELLING Regel für den Fall konstanter Grenzkosten der Extraktion ein Wachstum der Nettopreise in Höhe des Zinssatzes verlangt. Beispielsweise wählen HARTWICK/OLEWILER (1998), SINN (1981), GAUDET (1986) und nicht zuletzt HOTELLING (1931) selbst diese Vorgehensweise. Tatsächlich ist es durch eine solche vereinfachte Darstellung der Extraktionskosten als vernachlässigbar oder konstant möglich, einige charakteristische Eigenschaften dieses Übergangproblems von der erschöpfbaren Ressource auf das erneuerbare Substitut darzustellen. Unter anderem zählt hierzu die Untersuchung der Wirkung einer Backstoptechnologie auf die Extraktions- und Preispfade einer erschöpfbaren Ressource sowie deren Erschöpfungszeitpunkt in unterschiedlichen Marktstrukturen. Diese Ergebnisse behalten auch unter realitätsnäheren Annahmen Gültigkeit, etwa im Hinblick auf Unsicherheiten oder die Kostenstrukturen bei der Ressourcenextraktion oder Substitutsproduktion.

Allerdings treten durch die Annahme realitätsnäherer Kostenfunktionen doch auch qualitative Unterschiede zu einer solchen Analyse auf. Üblicherweise werden die Grenzkosten einer erneuerbaren Ressource mit zunehmender Produktionsmenge steigen und die Extraktionskosten einer erschöpfbaren Ressource sind in der Realität ebenfalls nicht konstant. Zuerst werden stets diejenigen Ressourcenvorkommen erschlossen, welche die niedrigsten Förderkosten aufweisen. Detailliert diskutiert SWEENEY (1993) verschiedene Kostenfunktionen. Die nun folgende Untersuchung wird zeigen, dass bei Unterstellung zunehmender Grenzkosten der Substitutsproduktion der Übergang von einer erschöpfbaren Ressource auf ihr erneuerbares Substitut nicht mehr sprunghaft stattfindet, sondern eine stetig zunehmende Diffusion der

Backstoptechnologie zu erwarten ist. Dies ist analog zur Annahme steigender Extraktionskosten, weshalb auf eine eigenständige Analyse dieses Falls verzichtet wird<sup>9</sup>.

Erstmals formal untersucht wurde die Diffusion einer Backstoptechnologie unter Annahme zunehmender Grenzproduktionskosten des Substituts von SAUTER-SERVAES (1982). Im Folgenden werden steigenden Grenzkosten der Substitutsproduktion in das hier vorliegende didaktische Modell integriert. Obwohl die Analyse eng an die Vorgehensweise SAUTER-SERVAES angelegt ist, liegt der eigenständige Beitrag dieser Untersuchung darin, dass hier eine kontinuierliche Betrachtung des Optimierungsproblems durchgeführt wird. Wenngleich die hier vorgenommene Untersuchung zu denselben Resultaten führt, so unterscheidet sich doch die mathematische Vorgehensweise. Während die Ermittlung der Ergebnisse in dieser Untersuchung mit Hilfe der Kontrolltheorie erfolgt, wählt SAUTER-SERVAES (1982: 16) die Variationsrechnung. Vereinfachend wird zunächst auch angenommen, dass technologischer Fortschritt nicht stattfindet. Die Wirkung des technologischen Fortschritts wird stattdessen im nächsten Abschnitt genauer beleuchtet.

## WETTBEWERBLICHE EXTRAKTION UND PRODUKTION

Zunächst sei angenommen, dass sowohl die Extraktion der erschöpfbaren Ressource als auch die Produktion des erneuerbaren Substituts wettbewerblich erfolgt. Es wurde bereits dargelegt, dass die Existenz einer Backstoptechnologie im Wesentlichen wie ein Prohibitivpreis für die erschöpfbare Ressource wirkt. Unter dieser Annahme wird im Folgenden der Diffusionsverlauf der Backstoptechnologie bei wettbewerblicher Marktstruktur untersucht.

Hierfür gilt es in einem ersten Schritt den zugehörigen Prohibitivpreis zu bestimmen. Grundsätzlich ergibt sich dieser aus dem Marktpreis des erneuerbaren Substituts. Im Falle konstanter Grenzkosten der Substitutsproduktion ist die Bestimmung des Prohibitivpreises offensichtlich ohne Schwierigkeiten möglich. Bei steigenden Grenzkosten der Substitutsproduktion hingegen verändert sich der vom Produzenten geforderte Marktpreis abhängig von der hergestellten Menge des Substituts  $x_t$ . Daher muss zur Ermittlung des Prohibitivpreises eine bestimmte Produktionsmenge zu Grunde gelegt werden. Es bietet sich diejenige Produktionsmenge an, mit der das erneuerbare Substitut allein die gesamte Marktnachfrage befriedigen kann. Es sei die Produktionsmenge  $x_t = \bar{x}$ , diejenige Menge, die zu dieser zeitunabhängigen Gleichgewichtslösung führt. Damit gilt für den Prohibitivpreis

$$MC(\bar{x}) = \overline{MC}. \quad (3.16)$$

---

<sup>9</sup> Auf diese Weise wird auch das Problem eines Teilabbaus der Ressource vermieden. Um einen solchen Teilabbau im Falle von Extraktionskosten zu verhindern, wären zusätzliche Annahmen über das Verhältnis von Extraktions- und Produktionskosten nötig, denn bei Unterstellung von Extraktionskosten muss es nicht zwangsweise zur physischen Erschöpfung kommen. Sobald die Herstellung des Substituts günstiger ist, wird der Abbau der Ressource eingestellt. Man spricht in diesem Fall von einer ökonomischen Erschöpfung der Ressource.

In gewisser Weise bestimmt also die Nachfrage der Konsumenten den Prohibitivpreis der erschöpfbaren Ressource. Hier zeigt sich der grundsätzliche Unterschied zur Annahme konstanter Grenzkosten, letztlich entsprechen variable Grenzproduktionskosten weitaus besser der ordnungspolitischen Forderung nach Konsumentensouveränität. Über den Einfluss der Nachfrage auf den Prohibitivpreis entscheiden die Konsumenten zumindest mittelbar über den Erschöpfungszeitpunkt der Ressource.

In einem zweiten Schritt wird nun das zugehörige kontrolltheoretische Optimierungsproblem aufgestellt:

$$\max_{R_t, x_t} \int_0^{\infty} p_t \cdot (R_t + x_t) \cdot e^{-rt} dt \quad (3.17)$$

$$s.t. \quad \dot{S}_t = -R_t \quad (3.18)$$

$$S_0 \text{ gegeben} \quad (3.19)$$

$$\text{und } R_t \geq \overline{MC}^{-\alpha} \text{ oder } R_t = 0 \quad (3.20)$$

Die Preisobergrenze für den Ressourcenanbieter lässt sich aufgrund des bekannten Preis/Mengen-Zusammenhangs auch in einer Beschränkung der Extraktionsmenge ausdrücken. Die Anbieter der erschöpfbaren Ressource sind zu keinem Zeitpunkt in der Lage, die Angebotsmenge unter ein bestimmtes Niveau zu verknappen. Jede geringere Menge würde einen Preis größer dem Prohibitivpreis implizieren, bei welchem die Nachfrage nach der erschöpfbaren Ressource dann Null wäre. Vor Erschöpfung der Ressource wird der Preis den Prohibitivpreis daher nicht erreichen. Das Optimierungsproblem erfährt durch die Formulierung der Preisobergrenze aus (3.16) als Mengenuntergrenze in (3.20) eine deutliche Vereinfachung. Auf diese Weise wird die Einführung des Preises als zweite Kontrollvariable überflüssig. Das Marktangebot stellt so die einzige Kontrollvariable des Optimierungsproblems dar.

Entsprechend dem Optimierungsproblem ergibt sich die periodische Hamiltonfunktion als

$$H = p_t \cdot (R_t + x_t) - MC_t(x_t) - \lambda_t \cdot R_t. \quad (3.21)$$

Das zugehörige Maximumprinzip lautet folglich:

$$\frac{\partial H}{\partial R_t} = p_t - \lambda_t \leq 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_t} = p_t - \frac{\partial MC_t}{\partial x_t} = 0 \quad (3.23)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial S_t} = \dot{\lambda}_t - r \cdot \lambda_t \quad (3.24)$$

Das Maximumprinzip stellt die Bedingungen für optimalen Extraktionsmengen der erschöpfbaren Ressource und die Produktionsmengen des erneuerbaren Substituts im Zeitverlauf auf. Der möglichen Randlösung bei erschöpfbaren Ressourcen wird dabei durch die Formulierung als Ungleichung in Bedingung (3.22) Rechnung getragen. Es impliziert < stets die Extrakti-

onsmenge  $R_t = \overline{MC}^{-\alpha}$ . In Bedingung (3.23) ist dies aufgrund der als unbegrenzt angenommenen Verfügbarkeit des Substituts nicht notwendig.

Die sich aus dem Maximumprinzip ergebenden Extraktions- und Produktionsmengen können nur simultan ermittelt werden. Aufgrund der Substituierbarkeit ist eine höhere Extraktionsmenge nur bei gleichzeitig sinkender Produktionsmenge möglich und umgekehrt. Vor diesem Hintergrund muss auch Bedingung (3.24) gesehen werden. Aus dieser Bedingung lässt sich zwar leicht ableiten, dass der Schattenpreis der Ressource bis zu deren Erschöpfung in Höhe des Zinssatzes anwachsen muss:  $\lambda_t = \lambda_0 e^{rt}$ . Dies folgt aus (3.24) wegen  $-\partial H/\partial S_t = 0$ . Allerdings macht diese Forderung noch keine Aussage darüber, wie die Zusammensetzung des Marktangebots gestaltet ist. Diese wird nun ermittelt. Zunächst einmal soll hierzu wiederholt werden, dass die Grenzkosten der Substitutsproduktion annahmegemäß über den als vernachlässigbar erklärten Extraktionskosten der erschöpfbaren Ressource liegen. Daher wird zu Beginn des Betrachtungszeitraumes das Marktangebot mit Sicherheit zu Teilen aus der erschöpfbaren Ressource bestehen. Inwiefern auch bereits zu Beginn Mengen des erneuerbaren Substituts auf dem Markt angeboten werden, bedarf jedoch weiterführender Überlegungen. Bedingung (3.23) verlangt, dass das Substitut nur dann bereits zu Beginn des Betrachtungszeitraumes angeboten wird, wenn die zu diesem Zeitpunkt verbrauchte Menge so klein ist, dass die minimalen Grenzkosten der Produktion dem Marktpreis entsprechen. Ob dies der Fall ist, hängt vom Umfang der Ressourcenvorräte genauso ab wie von der Kostenfunktion der erneuerbaren Ressource. Hier wird nun angenommen, dass die Ressource so reichlich vorhanden ist, dass ihr Marktpreis die minimalen Grenzkosten der Substitutsproduktion unterbietet. Auf diese Weise können alle drei möglichen Phasen des Marktangebots wie nun folgend untersucht werden.

Für die *erste Phase* des Marktangebots  $t < \bar{t}_W$ , welches ausschließlich aus der erschöpfbaren Ressource besteht, gilt damit das folgende angepasste Maximumprinzip:

$$\frac{\partial H}{\partial R_t} = p_t - \lambda_t = 0 \quad \forall t < \bar{t}_W, \quad (3.22)a$$

$$-\frac{\partial H}{\partial S_t} = \dot{\lambda}_t - r \cdot \lambda_t \quad \forall t < \bar{t}_W, \quad (3.24)a$$

Zunächst fällt auf, dass Bedingung (3.22)a im Unterschied zu (3.22) als Gleichung formuliert ist. Weil in dieser ersten Phase des Marktangebots ausschließlich die erschöpfbare Ressource angeboten wird, liegt deren Preis zwangsläufig unter dem Prohibitivpreis und die Randlösung entfällt. Bedingung (3.23) entfällt ebenfalls, weil in dieser ersten Phase keine Produktion des Substituts stattfindet. Der Extraktionspfad der erschöpfbaren Ressource muss nach dem Maximumprinzip nun so gewählt werden, dass der hieraus resultierende Marktpreis zu jedem Zeitpunkt in dieser Phase dem Schattenpreis der Extraktion entspricht:  $p_t = \lambda_t$ . Weil der Schattenpreis in Höhe des Zinssatzes anwächst, lautet die HOTELLING Regel für diese erste Phase des Marktangebots:

$$p_t = p_0 \cdot e^{rt} \quad \forall t < \bar{t}_W. \quad (3.25)$$

Offensichtlich unterscheidet sich diese HOTELLING Regel nicht von der Situation ohne Existenz einer Backstopptechnologie. In beiden Fällen steigt der Marktpreis im Zeitverlauf in Höhe des Zinssatzes an und entsprechend fallen die jeweiligen Extraktionsmengen der Ressource aus. Hieraus sollte jedoch nicht geschlossen werden, dass die Existenz einer Backstopptechnologie in der ersten Marktphase keine Wirkung entfaltet. Für die absolute Höhe des Marktpreises sind die Grenzproduktionskosten des Substituts ausschlaggebend. Bereits vor Markteintritt des erneuerbaren Substituts beeinflusst dieses also das Marktergebnis.

Entsprechend dem Hotelling Preispfad aus (3.25) nähert sich der Marktpreis von unten den minimalen Grenzkosten der Substitutsproduktion an. Das Ende dieser ersten Phase der reinen Ressourcenextraktion ist dann erreicht, wenn der Marktpreis diesen Grenzkosten entspricht. Dieser Zeitpunkt wird hier als  $\bar{t}_W$  bezeichnet.

Zum Zeitpunkt  $\bar{t}_W$  greift Gleichung (3.23) und die Substitutsproduzenten treten in der *zweiten Phase* in den Markt ein. Das Maximumprinzip für diese zweite Phase des Marktangebots enthält Bedingungen für die Produktion des Substituts wie auch für die Extraktion der erschöpfbaren Ressource. Mit dem Markteintritt des erneuerbaren Substituts ist die Ressource noch nicht erschöpft. Einzig bei Erreichen des Prohibitivpreises in  $\bar{T}_W$  wird das Marktangebot in der dritten Phase vollständig aus dem erneuerbaren Substitut bestehen.

$$\frac{\partial H}{\partial R_t} = p_t - \lambda_t = 0 \quad \forall \bar{t}_W \leq t \leq \bar{T}_W, \quad (3.22)b$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_t} = p_t - \frac{\partial MC_t}{\partial x_t} = 0 \quad \forall \bar{t}_W \leq t \leq \bar{T}_W \quad (3.23)b$$

$$-\frac{\partial H}{\partial S_t} = \dot{\lambda}_t - r \cdot \lambda_t \quad \forall \bar{t}_W \leq t \leq \bar{T}_W, \quad (3.24)b$$

Für diese zweite Phase des Marktangebots gilt durch (3.24)b und (3.22)b offensichtlich wie in der ersten Phase der HOTELLING Preispfad:

$$p_t = p_0 \cdot e^{rt} \quad \forall \bar{t}_W \leq t \leq \bar{T}_W. \quad (3.26)$$

Der Marktpreis steigt bis zur Erschöpfung der Ressource im Zeitpunkt  $\bar{T}_W$  in Höhe des Zinssatzes an. Sowohl die erschöpfbare Ressource als auch das erneuerbare Substitut werden zum selben Preis am Markt angeboten. Dabei ändert sich die Zusammensetzung des Marktangebots im Zeitverlauf. Bedingung (3.23)b stellt sicher, dass das Substitut in einem Umfang produziert wird, bei dem die Grenzkosten der Produktion dem jeweiligen Marktpreis entsprechen. Da der Marktpreis in dieser zweiten Phase im Zeitverlauf ansteigt, wird auch der Marktanteil des erneuerbaren Substituts steigen. Das mit steigenden Preisen abnehmende Angebot

verstärkt diesen Effekt noch. Formal lässt sich diese Bedingung für die Substitutsproduktion mit (3.23)b und (3.26) wie folgt ausdrücken:

$$\frac{\partial MC_t}{\partial x_t} = \frac{\partial MC_{\bar{t}_W}}{\partial x_{\bar{t}_W}} \cdot e^{r(t-\bar{t}_W)} \quad \forall \bar{t}_W \leq t \leq \bar{T}_W. \quad (3.27)$$

Aus Gleichung (3.27) wird deutlich, dass die Diffusion des erneuerbaren Substituts abhängig von der unterstellten funktionalen Form der Grenzkostenfunktion unterschiedlich verläuft. Empirische Untersuchungen zeigen, dass die Diffusion einer Innovation in der Realität üblicherweise einen S-förmigen Verlauf nimmt. Je nach Ausgestaltung der jeweils unterstellten Grenzkostenfunktion ist aber auch eine ganz andere Verbreitung der Innovation möglich. So könnte die Backstoptechnologie beispielsweise auch eine gleichmäßige Verbreitung finden. Um den genauen Verlauf der Diffusion bestimmen zu können, muss den Grenzkosten eine funktionale Form unterstellt werden. Der genaue Verlauf der Diffusion von Biokraftstoffen wird in dieser Arbeit in Kapitel 6 für Deutschland und Abschnitt 5.3 für Brasilien untersucht. Die Untersuchung anhand des hier verwendeten neoklassischen Diffusionsmodells kann sich an dieser Stelle auf die Ableitung allgemein gültiger Regeln für die Verbreitung einer Innovation beschränken.

Unabhängig von der genauen Ausgestaltung der Grenzkostenfunktion nimmt die Produktionsmenge des erneuerbaren Substituts im Zeitverlauf zu, wenn die Grenzkosten mit der Produktionsmenge steigen. Dies impliziert für die erschöpfbare Ressource, dass deren Extraktionsmengen trotz der weiterhin bestehenden Gültigkeit der HOTELLING Regel stärker als der Zinssatz fallen. Die HOTELLING Regel beschreibt die Entwicklung der Marktpreise und bezieht auf diese Weise das gesamte Angebot auf dem betrachteten Markt ein. Entsprechend werden die Extraktions- und Produktionsmengen angepasst. Hieraus sollte jedoch nicht eilig der Schluss gezogen werden, dass auch für die Produktion des erneuerbaren Substituts der Preisbildungsmechanismus erschöpfbarer Ressourcen gilt. Vielmehr agieren die wettbewerblichen Produzenten des erneuerbaren Substituts als Preisnehmer und passen ihre Produktionsmengen dem jeweils geltenden Marktpreis an. Auf diese Weise ist es vielmehr umgekehrt der Fall, dass die Preisbildung erschöpfbarer Ressourcen durch die Existenz einer Backstoptechnologie beeinflusst wird.

Die Marktanteile des erneuerbaren Substituts werden dabei so lange wachsen, bis der Prohibitivpreis erreicht ist, bei dem das Marktangebot nun vollständig aus der Produktion des Substituts besteht. Zum Ende der zweiten Phase in  $\bar{T}_W$  muss die Ressource daher vollständig erschöpft sein:

$$\int_0^{\bar{T}_W} R_t dt = S_0. \quad (3.28)$$

Entsprechend nimm die Substitutsproduktion in der nun beginnenden *dritten Phase* einen stationären Verlauf. Während die Angebotsmengen in den ersten beiden Phasen des Marktange-

bots mit den steigenden Marktpreisen stetig abgenommen haben, bleibt das Angebot mit dem Beginn der dritten Phase nun konstant. Sobald die erschöpfbare Ressource verbraucht ist, gilt auf dem Markt ausschließlich die zeitunabhängige Gleichgewichtsregel, bei der der Marktpreis des erneuerbaren Substituts den Grenzkosten der Produktion entspricht:

$$p_t = MC_t(x_t) = \overline{MC} \quad \forall t > \overline{T}_W. \quad (3.29)$$

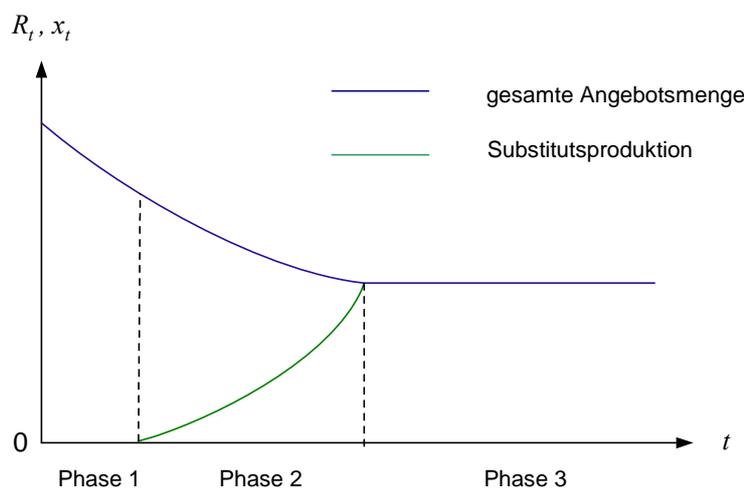
Die zugehörige Produktionsmenge des erneuerbaren Substituts lässt sich mit der unterstellten isoelastischen Nachfrage für die dritte Phase angeben als

$$MC_t(x_t)^{-\alpha} = \overline{MC}^{-\alpha} \quad \forall t > \overline{T}_W. \quad (3.30)$$

Zusammenfassend kann das optimale Marktangebot hinsichtlich Menge und Zusammensetzung bei wettbewerblicher Extraktion der erschöpfbaren Ressource und wettbewerblicher Produktion des erneuerbaren Substituts wie in

Abbildung 3.13 dargestellt werden. Dabei hängt der genaue Verlauf der Extraktions- und Produktionsmengen wie erläutert von der jeweils unterstellten Grenzkostenfunktion ab. Die Grundzüge der Entwicklung des Marktangebots gelten jedoch für alle funktionalen Formen der Grenzkostenfunktion gleichermaßen. Die Extraktionsmenge der erschöpfbaren Ressource ergibt sich in dieser Darstellung als Differenz zwischen der gesamten Angebotsmenge und der Substitutsproduktion.

**Abbildung 3.13** Extraktions- und Produktionsmengen bei zunehmenden Grenzkosten



Quelle: Eigene Darstellung

Mit Beginn der dritten Phase des Marktangebots muss die Diffusion der Backstoptechnologie jedoch noch nicht abgeschlossen sein. Zwar ist die Ressource nunmehr erschöpft und das er-

erneuerbare Substitut bildet das gesamte Marktangebot. Gleichwohl ist es durch technologischen Fortschritt möglich, die Grenzproduktionskosten des Produkts im Zeitverlauf zu senken. Das erneuerbare Substitut gewinnt an Attraktivität und der Kreis der Konsumenten und damit auch die Zahl der Adopter erhöhen sich. Dieser Aspekt wird bei der Untersuchung der Diffusion im neoklassischen Modellrahmen oftmals vernachlässigt. Detailliert wird auf die Rolle des technologischen Fortschritts in Abschnitt 3.2.3 eingegangen. Die gleichzeitige Analyse steigender Grenzproduktionskosten und technologischen Fortschritts würde die Komplexität des Modells deutlich erhöhen, jedoch nur begrenzt zu einem tieferen Verständnis der Materie beitragen. Daher wird nun zunächst die Wirkung der Marktstruktur auf die Verbreitung der Backstop-Technologie untersucht, indem die hier ermittelten Ergebnisse einem Vergleich mit einem monopolistischen Marktangebot unterzogen werden.

### RESSOURCENMONOPOL MIT PATENT AUF DIE BACKSTOPTECHNOLOGIE

Nach der Analyse der wettbewerblichen Marktstruktur als Referenzszenario wird nun davon ausgegangen, dass ein Ressourcenmonopolist über ein Patent für die einzige erhältliche Backstop-Technologie verfügt. Bei sonst identischen Bedingungen wie im Referenzszenario ist es wenig verwunderlich, dass im Falle einer monopolistischen Marktstruktur das Marktangebot dieselben drei Phasen durchläuft. Die Untersuchung der drei Phasen wird daher analog zum vorherigen Abschnitt erfolgen, wengleich aufgrund der Analogie kein Bedarf besteht, das Optimierungsproblem des Monopolisten mit demselben Detaillierungsgrad zu analysieren. Vielmehr dient diese Untersuchung dazu aufzuzeigen, welchen Einfluss die Marktstruktur auf die Diffusion der Backstop-Technologie ausübt.

Besitzt ein Unternehmen nicht nur das Monopol zum Abbau einer bestimmten erschöpfbaren Ressource, sondern auch ein Patent auf die Backstop-Technologie, so wird es die Gewinne aus beiden Ressourcen gleichzeitig maximieren. Das Gewinnmaximierungsproblem eines solchen Monopolisten lautet damit:

$$\max_{R_t, x_t} \int_0^{\infty} p_t(R_t + x_t) \cdot (R_t + x_t) \cdot e^{-rt} dt \quad (3.31)$$

$$s.t. \quad \dot{S}_t = -R_t \quad (3.32)$$

$$S_0 \text{ gegeben} \quad (3.33)$$

$$\text{und } R_t \geq p(\bar{x})^{-\alpha} \text{ oder } R_t = 0 \quad (3.34)$$

Für den Monopolisten gilt ebenso wie in der vorherigen Wettbewerbssituation ein Prohibitivpreis, welchen er bei seiner Extraktionsentscheidung beachten muss. Dieser Prohibitivpreis resultiert auf dem nun betrachteten monopolistischen Markt allerdings nicht aus dem Wegbruch der Nachfrage nach der erschöpfbaren Ressource, weil ihr Marktpreis durch das erneuerbare Substitut unterboten wird. Vielmehr zwingt das eigene ökonomische Kalkül den Monopolisten, zunächst die günstigere erschöpfbare Ressource am Markt zu verkaufen, bevor er

schließlich das teurere erneuerbare Substitut anbietet. Der Prohibitivpreis ergibt sich analog zur Wettbewerbssituation aus dem Marktpreis des erneuerbaren Substituts, der hier aber natürlich einen Monopolaufschlag enthält. Wiederum ist in (3.34) der Prohibitivpreis als Mengenbeschränkung formuliert.

Die dem Optimierungsproblem des Monopolisten zugehörige Hamiltonfunktion lautet in laufenden Werten

$$H = p_t(R_t + x_t) \cdot (R_t + x_t) - MC_t(x_t) - \lambda_t \cdot R_t. \quad (3.35)$$

Damit ergeben sich (3.36) bis (3.38) mit dem Grenzerlös  $m_t$  als Maximumprinzip:

$$\frac{\partial H}{\partial R_t} = m_t - \lambda_t \leq 0, \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_t} = m_t - \frac{\partial MC_t}{\partial x_t} = 0 \quad (3.37)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial S_t} = \dot{\lambda}_t - r \cdot \lambda_t, \quad (3.38)$$

Analog zum vorherigen Abschnitt soll auch hier angenommen werden, dass aufgrund der vorliegenden Kostenstruktur eine *erste Phase* existiert, in welcher der Monopolist ausschließlich aus seinem Ressourcenvorrat verkauft, während die Produktion des Substituts ruht. Insbesondere bedeutet dies, dass die Ressourcenvorräte als hinreichend groß angenommen werden. In einer solchen ersten Phase gilt das folgende angepasste Maximumprinzip:

$$\frac{\partial H}{\partial R_t} = m_t - \lambda_t = 0, \quad (3.36)a$$

$$-\frac{\partial H}{\partial S_t} = \dot{\lambda}_t - r \cdot \lambda_t, \quad (3.38)a$$

Wiederum entfällt die Bedingung bezüglich der Produktion des erneuerbaren Substituts, da dieses in der ersten Marktphase noch nicht angeboten wird. Das Marktangebot besteht vielmehr ausschließlich aus der erschöpfbaren Ressource, deren Grenzerlös nach (3.36)a stets ihrem Schattenpreis entsprechen muss:  $m_t = \lambda_t$ . Zusammen mit (3.37)a lässt sich hieraus analog zum Referenzfall die HOTELLING Regel für die Entwicklung der Marktpreise ableiten. Als direkte Folge von  $-\partial H / \partial S_t = 0$  aus (3.38)a muss für die Entwicklung des Schattenpreises in dieser ersten Phase des Marktangebots  $\lambda_t = \lambda_0 e^{rt}$  gelten. Der Grenzerlös der erschöpfbaren Ressource steigt in dieser Phase folglich in Höhe des Zinssatzes an:

$$m_t = m_0 \cdot e^{rt} \quad \forall t < \bar{t}_M. \quad (3.39)$$

Entsprechend dieser Regel wird der Monopolist die Extraktionsmengen wählen und hierdurch den Marktpreis bestimmen. Die Entwicklung der Marktpreise wird nun aus (3.39) abgeleitet. Im Ergebnis wächst nicht nur der Grenzerlös des Monopolisten, sondern auch der Marktpreis der erschöpfbaren Ressource entlang des optimalen Extraktionspfades in Höhe des Zinses an.

Der Monopolist wird die erschöpfbare Ressource nur dann am Markt anbieten, wenn sein hieraus resultierender Grenzerlös positiv ist. Daher muss die Nachfrage zwingend elastisch<sup>10</sup> sein und üblicherweise wird daher wie in dieser Untersuchung eine Elastizität von  $\alpha > 1$  angenommen. Durch die einheitliche Beschränkung der Betrachtung auf elastische Nachfragefunktionen bleibt die Vergleichbarkeit der wettbewerblichen mit der monopolistischen Marktstruktur gewahrt. Um nun aus (3.39) die Entwicklung der Monopolpreise ableiten zu können, ist die Umformung des Grenzerlöses nötig. Hierfür wird die allgemeine Formel für die Preiselastizität der Nachfrage  $\eta(R_t) = \partial R_t / \partial p_t \cdot p_t / R_t$  verwendet. Diese bietet sich an, weil die Elastizität der Nachfrage bekanntlich die Höhe des Marktpreises und des Monopolpreises bestimmt. Damit kann der genaue Ausdruck für den Monopolpreis ermittelt werden als

$$\lambda_t = m_t = p_t \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta(R_t)} \right). \quad (3.40)$$

Mit diesem Ergebnis wird (3.39) umgeformt zu

$$p_0 \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta(R_0)} \right) = p_t \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta(R_t)} \right) \cdot e^{rt}. \quad (3.41)$$

Bei einer im Zeitverlauf unveränderlichen Nachfrageelastizität  $\alpha$ , wie sie hier angenommen wird, wird der in Klammern geschriebene Term aus (3.41) zu einer Konstanten. Daher entspricht dieser HOTELLING Pfad dem bereits aus der wettbewerblichen Marktstruktur bekannten. Durch die konstante isoelastische Nachfragefunktion wachsen nicht nur die Grenzerlöse des Monopolisten, sondern auch der zugehörige Monopolpreis im Zeitverlauf in Höhe des Zinssatzes an. Die HOTELLING Regel für diese erste Phase des Marktangebots kann damit geschrieben werden als

$$p_t = p_0 \cdot e^{rt} \quad \forall t < \bar{t}_M. \quad (3.42)$$

Analog zum Referenzfall wirkt sich die Existenz einer Backstoptechnologie nicht auf den Preispfad, sondern auf die absolute Höhe der jeweiligen Marktpreise aus. Es erscheint unter ökonomischen Gesichtspunkten auch einigermaßen einleuchtend, dass die Grundregel der Ressourcenextraktion eine gewisse Beständigkeit aufweist. Nach der soeben hergeleiteten HOTELLING Regel sinkt der Absatz der erschöpfbaren Ressource stetig, bis der Grenzerlös die minimalen Grenzkosten des Substituts im Zeitpunkt  $\bar{t}_M$  erreicht und der Monopolist in zunächst geringem Umfang die ersten Mengen des Substituts am Markt anbietet.

In dieser *zweiten Phase* des simultanen Marktangebots von erschöpfbarer Ressource und erneuerbarem Substitut gilt das folgende angepasste Maximumprinzip:

<sup>10</sup> Es lässt sich leicht überlegen, dass im Falle einer unelastischen Nachfrage der Gewinn durch Restriktion des Outputs vergrößert werden kann. Einige Autoren wie beispielsweise COOPER (2003), MANNING (1991) oder KALYMON (1975) schätzen die Nachfrage kurzfristig tatsächlich als eher preisunelastisch ein. Eine Anhebung des Monopolpreises hängt jedoch vor allem auch von der langfristigen Elastizität ab. Detailliert ist dies nachzulesen bei PHELPS/WINTER (1970). Die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Monopol und Wettbewerb wurden erstmals in dem berühmten Artikel von SRAFFA (1926) systematisch formal herausgearbeitet. Dieser setzte die Diskussion des Markt Begriffes in Gang, die schließlich in dem Werk von TRIFFIN (1940) kulminierte.

$$\frac{\partial H}{\partial R_t} = m_t - \lambda_t = 0, \quad (3.36)b$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_t} = m_t - \frac{\partial MC_t}{\partial x_t} = 0 \quad (3.37)b$$

$$-\frac{\partial H}{\partial S_t} = \dot{\lambda}_t - r \cdot \lambda_t, \quad (3.38)b$$

Analog zum Referenzszenario setzt sich die HOTELLING Regel aus der ersten Phase auch in dieser zweiten Phase fort. Entsprechend kann die zeitliche Entwicklung der Grenzerlöse und Marktpreise mit entsprechendem Verlauf der Grenzerlöse und Marktpreise mit

$$m_t = m_0 \cdot e^{rt} \quad \forall \bar{t}_M \leq t \leq \bar{T}_M \text{ und} \quad (3.43)$$

$$p_t = p_0 \cdot e^{rt} \quad \forall \bar{t}_M \leq t \leq \bar{T}_M. \quad (3.44)$$

beschrieben werden. Für die Entwicklung der Grenzkosten der Substitutsproduktion in dieser zweiten Phase gilt ebenfalls analog zum Referenzszenario:

$$\frac{\partial MC_t}{\partial x_t} = \frac{\partial MC_{\bar{t}}}{\partial x_{\bar{t}}} \cdot e^{r(t-\bar{t})} \quad \forall \bar{t}_M \leq t \leq \bar{T}_M. \quad (3.45)$$

Abhängig von der genauen Form der Kostenfunktion wird der Verlauf der Diffusion des erneuerbaren Substituts unterschiedlich schnell vonstatten gehen. Sieht man einmal von technologischem Fortschritt ab, so erreicht die Verbreitung am Ende der zweiten Marktphase ihr Maximum.

In der *dritten Phase* besteht das Angebot nunmehr ausschließlich aus dem erneuerbaren Substitut. Mit Erschöpfen der Ressource in  $\bar{T}_M$  wird der Prohibitivpreis erreicht und fortan folgt die Preisbildung der zeitunabhängigen Gleichgewichtsregel, bei der der Monopolist Grenzerlös und Grenzkosten ausgleicht. Die Preisbildung und der hieraus resultierende Monopolpreis unterscheiden sich ceteris paribus in keiner Weise von anderen reproduzierbaren Gütern.

## **DIE EINFLUSS DER MARKTSTRUKTUR AUF DIE DIFFUSION EINER BACKSTOPTECHNOLOGIE**

Sowohl bei wettbewerblicher als auch bei monopolistischer Marktstruktur verläuft die Verbreitung der Backstopptechnologie in drei Phasen. In den ersten beiden Phasen des Marktangebots, in welchen die erschöpfbare Ressource zunächst ausschließlich und dann mit einem abnehmenden Marktanteil angeboten wird, folgt die Ressourcenextraktion unabhängig von der unterstellten Marktstruktur demselben HOTELLING Preispfad. Ein solches Resultat ist nach den Vorüberlegungen in Abschnitt 3.1 zur optimalen Extraktion einer erschöpfbaren Ressource nicht weiter verwunderlich. Dennoch unterscheidet sich diese erste Phase des Marktangebots abhängig von der jeweils betrachteten Marktstruktur: sowohl die Dauer dieser ersten Phase als auch damit zusammen hängend die Extraktionsmengen in dieser Zeitspanne hängen davon ab, ob Ressource und Substitut monopolistisch oder wettbewerblich am Markt angebo-

ten werden. Bei sonst gleichen Annahmen und Voraussetzungen unterscheiden sich beide Marktstrukturen doch in der Höhe des Prohibitivpreises. Ein solcher Prohibitivpreis bewirkt im Vergleich zu einer Situation ohne Backstoptechnologie, dass sich der Planungshorizont der auf dem Markt agierenden Ressourcenunternehmen verkürzt und in der direkten Folge der HOTELLING Preispfad sinkt. Obwohl das erneuerbare Substitut noch nicht in den Markt eingetreten ist, müssen die Preis- und Extraktionspfade an seine Existenz angepasst werden. Im Monopolfall liegt der Prohibitivpreis dabei höher als bei wettbewerblicher Extraktion und Produktion. Folglich wird auch der HOTELLING Preispfad höher liegen als im Referenzfall. Die genaue Höhe der Preisdifferenz wird im Verlauf dieses Kapitels für den einfacheren Fall konstanter Grenzproduktionskosten ermittelt werden.

Mit dieser kurzen Wiederholung des Zusammenhangs zwischen Prohibitivpreis und Preishöhe lassen sich nun, wenn auch in begrenztem Umfang, Rückschlüsse für die Verbreitung des erneuerbaren Substituts ziehen. Um zu einem vollständigen Bild der Diffusion zu gelangen, müssen die Fragen nach dem Zeitpunkt des Markteintritts, der Geschwindigkeit und dem Verlauf der Diffusion sowie dem Verbreitungsgrad der Innovation nach Ablösung der erschöpfbaren Ressource beantwortet werden. Dabei sind die Fragen in der hier gewählten Reihenfolge den einzelnen betrachteten Phasen des Marktangebots zugeordnet: Die erste Phase des Marktangebots bestimmt den Eintrittszeitpunkt der Innovation in den bestehenden Markt, die Analyse der zweiten Phase zeigt den Verlauf und die Geschwindigkeit der Diffusion und in der dritten Phase erreicht die Innovation ihren maximalen Verbreitungsgrad.

Es bietet sich an, zunächst den maximalen Verbreitungsgrad der Innovation zu untersuchen. Mit der Erschöpfung der ehemals vorhandenen Ressourcenvorräte besteht das Marktangebot in der dritten Phase nunmehr ausschließlich aus dem erneuerbaren Substitut. Der relative Verbreitungsgrad der Innovation unterscheidet sich daher in beiden betrachteten Marktstrukturen nicht. Unterschiede ergeben sich allein bei Betrachtung des absoluten Verbreitungsgrades. Üblicherweise wird ein Monopolist sein Marktangebot im Vergleich zur wettbewerblichen Bereitstellung beschränken und auf diese Weise eine Monopolrente abschöpfen. Diese kann abhängig von der Nachfrage unterschiedlich hoch ausfallen. Daher ist der absolute Verbreitungsgrad der Innovation unter einer wettbewerblichen Marktstruktur üblicherweise höher als bei der Produktion der Innovation durch einen Monopolisten. Die Marktstruktur muss daher als limitierender Faktor für die Verbreitung einer Innovation betrachtet werden. Gleichzeitig wird durch die jeweilige Marktstruktur auch der Prohibitivpreis der erschöpfbaren Ressource bestimmt, welcher wiederum das Ergebnis der beiden ersten Phasen des Marktangebots beeinflusst.

In der zweiten Phase des Marktangebots ergibt sich der Verlauf der Diffusion abhängig von der jeweils unterstellten funktionalen Form der Kostenfunktion. Dabei wird der Verlauf nur indirekt durch die vorhandene Marktstruktur bestimmt, weil diese letztlich die Dauer dieser

zweiten Marktphase festlegt, die im Folgenden synonym als Diffusionsgeschwindigkeit bezeichnet wird. Nach dem Markteintritt der Innovation setzt sich ihre Verbreitung so lange fort, bis im Monopolfall die Grenzkosten den Grenzerlös der Produktion erreicht haben. Dieser liegt bei den hier unterstellten steigenden Grenzkosten unter dem Marktpreis bei einem wettbewerblichen Angebot. Daher verbreitet sich die Innovation im Monopolfall mit einer höheren Geschwindigkeit als bei einer wettbewerblichen Marktstruktur.

In der Konsequenz ist die im Monopol extrahierte Ressourcenmenge in der zweiten Phase des Marktangebots zu gering und umgekehrt wird der Monopolist daher in der ersten Phase auch eine größere Menge der erschöpfbaren Ressource am Markt anbieten, als es gesellschaftlich optimal wäre. Der Markteintritt der Innovation findet somit im Vergleich zum wettbewerblichen Angebot verzögert statt.

Wie schnell jedoch die Innovation ihren maximalen Verbreitungsgrad erreicht, lässt sich ohne die Unterstellung einer Kostenfunktion nicht beurteilen. Zwar zeigt die Untersuchung, dass im Monopolfall der Markteintritt der Innovation verzögert stattfindet, dann jedoch verläuft die Verbreitung schneller als im Referenzfall des wettbewerblichen Marktangebots. Im Ergebnis ist die Gesamtlänge des Extraktionszeitraumes  $\bar{T}_M$  und damit der Zeitpunkt der Erreichung der größten Verbreitung der Innovation nicht bestimmbar und der Vergleich der Marktstrukturen muss diesbezüglich entfallen.

Im Folgenden sollen die offen gebliebenen Fragen nun unter der vereinfachenden Annahme konstanter Grenzproduktionskosten untersucht werden. Auf diese Weise lässt sich die Preisdifferenz der abhängig von der Marktstruktur verfolgten HOTELLING Pfade ermitteln und genauere Aussagen über den Zeitpunkt des Markteintritts der Innovation sowie die Gesamtlänge des Extraktionszeitraumes treffen. Ebenso lässt sich die Rolle des technologischen Fortschritts auf die Verbreitung einer Innovation abhängig von der jeweils unterstellten Marktstruktur untersuchen.

### **3.2.3 Diffusion bei konstanten Grenzproduktionskosten**

Bei sonst gleichen Annahmen wie im vorangehenden Abschnitt werden im Folgenden die Grenzproduktionskosten des erneuerbaren Substituts bezüglich der Produktionsmenge als konstant angenommen, dabei jedoch technologischer Fortschritt unterstellt. Dieser äußert sich in sinkenden Grenzproduktionskosten im Zeitverlauf. Die Untersuchung weicht also bewusst von der in der Literatur üblichen Vorgehensweise ab, bei welcher die Invention des Substituts oder dessen technologische Verbesserung als diskretes und teils mit Unsicherheiten behaftetes Ereignis modelliert wird<sup>11</sup>. Realitätsnaher bezüglich Biokraftstoffen erscheint die Annahme

---

<sup>11</sup> So beispielsweise bei MANNE (1974) oder HUNG/QUYEN (1989). Bei diesen Untersuchungen spielen größtenteils auch Unsicherheiten beispielsweise bezüglich des Inventionszeitpunktes oder auch der Preisentwicklung der Backstop-Technologie eine Rolle.

einer kontinuierlichen Verbesserung der Technologie aufgrund von Forschungsaktivitäten und Lerneffekten, möglicherweise gelenkt durch staatliche Förderprogramme. Dabei lehnen sich die Ausführungen an LEVY (2000) an.

Während konstante Grenzkosten für die Produktion des erneuerbaren Substituts unterstellt werden, sind die Extraktionskosten der erschöpfbaren Ressource wie im vorherigen Abschnitt auch hier annahmegemäß zu vernachlässigen. Auch in der Realität zeigen sich diese teils gewaltigen Kostenunterschiede der verschiedenen Herstellungsverfahren von Biokraftstoffen und den mineralischen Kraftstoffen Benzin und Diesel. Die vereinfachende Annahme konstanter Grenzproduktionskosten führt zu einem sprunghaften Übergang von der erschöpfbaren Ressource auf das erneuerbare Substitut. Obwohl ein solcher Übergang in der Realität wohl nur in seltenen Ausnahmefällen zu finden sein wird, so lassen sich doch die Ergebnisse hinsichtlich der Wirkung technologischen Fortschritts und der Vergleich der absoluten Höhe der Hotelling Preispfade verschiedener Marktstrukturen größtenteils auf den Fall variabler Grenzkosten übertragen. Daher wird einer solchen vereinfachten Darstellungsweise der Vorzug gegenüber der größeren Komplexität variabler Grenzproduktionskosten gegeben.

Analog zur Vorgehensweise im vorherigen Abschnitt wird auch hier zunächst vollkommener Wettbewerb unterstellt, bevor die Anreize eines monopolistischen Ressourcenanbieters zur Entwicklung einer Backstop-Technologie untersucht werden. Darüber hinausgehend wird das Phänomen des sog. limit pricing untersucht, bei welchem ein Ressourcen extrahierendes Monopol den Markteintritt des wettbewerblich produzierten Substituts durch geschickte Preissetzung verzögert.

## WETTBEWERBLICHE EXTRAKTION UND PRODUKTION

Die technologische Verbesserung einer Innovation wird hier durch im Zeitverlauf sinkende Grenzkosten  $MC$  reflektiert<sup>12</sup>. Den Grad der Verbesserung gibt der Faktor  $\delta$  wider:

$$MC_t = MC_0 e^{-\delta t}. \quad (3.46)$$

Der Planungshorizont der Ressourcen extrahierenden Unternehmen  $\bar{T}$  sei dabei endogen bestimmt. Er wird nach Nordhaus (1973: 533) erreicht, wenn der Marktpreis der erschöpfbaren Ressource die Grenzkosten des erneuerbaren Substituts erreicht:  $p_{\bar{T}} = MC_{\bar{T}}$ . Zu diesem Zeitpunkt tritt unter der Annahme konstanter Grenzkosten das erneuerbare Substitut in den Markt ein und ersetzt die erschöpfbare Ressource vollständig.

---

<sup>12</sup> Ebenso wäre es denkbar, dass eine technologische Verbesserung der bestehenden Innovation zu einer erhöhten Nützlichkeit des Produktes führt. In diesem Fall würde der technologische Fortschritt als Veränderung des Grenznutzens der potentiellen Adopter modelliert. Ein solcher Ansatz erhöht jedoch nur unnötig die Komplexität des Modells. Im Ergebnis führt eine solche Untersuchung zu denselben Resultaten wie die Modellierung des technologischen Fortschritts als sinkende Grenzproduktionskosten.

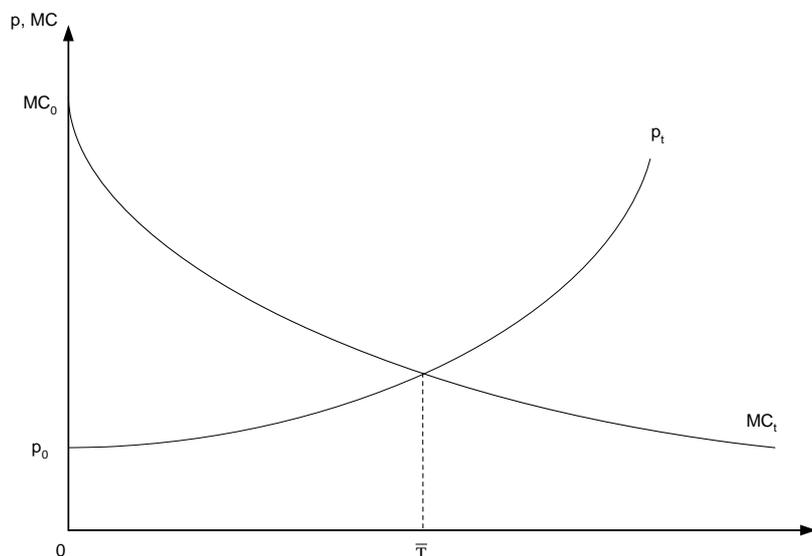
Bereits an dieser Stelle ist also offensichtlich, dass das Angebot auf dem Markt unter den getroffenen Annahmen aus lediglich zwei Phasen bestehen wird. Einer ersten Phase, in welcher der Substitutspreis noch nicht konkurrenzfähig ist und ausschließlich die erschöpfbare Ressource abgesetzt wird. Sowie einer zweiten Phase, in der die Ressourcenvorräte erschöpft sind und damit das Marktangebot aus der Substitutsproduktion gebildet wird. Der Marktpreis entspricht in diesem Fall wiederum den Grenzkosten zur Herstellung des Substituts. Die eigentliche Diffusionsphase wie bei Unterstellung steigender Grenzkosten entfällt hier.

Aus  $p_{\bar{T}} = MC_{\bar{T}}$  erhält man mit den Gleichungen (3.1) und (3.46) den endogenen Planungshorizont der Ressourcen extrahierenden Unternehmen als

$$\bar{T} = \frac{1}{r + \delta} \ln \left( \frac{MC_0}{p_0} \right). \quad (3.47)$$

Bekanntlich wird sich der Planungszeitraum der Ressourcenanbieter durch die Existenz einer Backstoptechnologie zwangsläufig verkürzen. Je geringer dabei der Prohibitivpreis in Form der Grenzkosten des Substituts ausfällt, umso kürzer wird auch der Zeitraum, in welchem die Ressource am Markt verkauft werden kann. Die einzige Möglichkeit, wie es trotz der Existenz des Substituts zur vollständigen Erschöpfung der Ressource kommt, besteht für die Ressourcenanbieter in der Anpassung der Extraktions- und Preispfade. Abbildung 3.14 veranschaulicht die eben dargestellten Zusammenhänge.

**Abbildung 3.14** Endogener Planungshorizont bei Einführung einer Backstoptechnologie



Quelle: In Anlehnung an Levy (2000: 8)

Der technologische Fortschritt des Substituts intensiviert noch die grundsätzliche Wirkung der Existenz einer Backstoptechnologie auf den Planungshorizont der Ressourcenanbieter. Die Grenzkosten des erneuerbaren Substituts sinken durch technologischen Fortschritt im Zeitver-

lauf in Höhe des Faktors  $\delta$ . Je schneller dabei die Grenzkosten sinken, desto eher unterschreiten sie den HOTELLING Preispfad der erschöpfbaren Ressource und bewirken dadurch die Einstellung der Ressourcenförderung. Die Zunahme von  $\delta$  führt folglich zu einer Verschiebung des Schnittpunktes hin zum Ursprung:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \delta} = -(r + \delta)^{-2} \ln \left( \frac{MC_0}{p_0} \right) < 0. \quad (3.48)$$

Übertragen auf die Situation mit zunehmenden Grenzkosten bedeutet dies, dass die erschöpfbare Ressource bereits zu einem früheren Zeitpunkt vollständig vom erneuerbaren Substitut abgelöst wird, als dies ohne einen solchen technologischen Fortschritt möglich wäre. Eine Backstop-Technologie führt damit nicht, wie gemeinhin angenommen, zu einer Ressourcenschonenden Haltung des Produktionssektors. Der Backstoppreis begrenzt als Prohibitivpreis die künftigen Gewinnmöglichkeiten der Ressourcenanbieter und somit sinkt in der Folge der Schattenpreis der Ressource. Der heutige Ressourcenabbau wird damit vergleichsweise attraktiver und die Ressource wird schneller gefördert, als in einer Situation ohne eine solche Backstop-Technologie. Technologischer Fortschritt verstärkt diesen Effekt noch zusätzlich. Jedoch muss betont werden, dass die Schonung der Ressourcenvorräte unter den getroffenen Annahmen auch nicht zu einer Steigerung der gesamten Wohlfahrt führt. Verantwortlich ist hierfür insbesondere der annahmegemäß einheitliche Nutzungszweck der Ressource. Unterstellt man weitere Nutzungsmöglichkeiten, so kann die Backstop-Technologie für einen Nutzungszweck tatsächlich zur Schonung der Ressource für andere Nutzungszwecke beitragen.

Im Gegensatz zu der hier diskutierten Konsequenz der Existenz einer Backstop-Technologie und technologischen Fortschritts für den Erschöpfungszeitpunkt der Ressource, lässt (3.48) aber keine Rückschlüsse auf den Zeitpunkt des Markteintritts des erneuerbaren Substituts zu. Eine Untersuchung diesbezüglich muss hier entfallen.

Vergleicht man die vorangehende Analyse mit der hier vorgenommenen Untersuchung des technologischen Fortschritts, dann liegt der wesentliche Unterschied darin, dass bei Erschöpfen der Ressourcenvorräte die Innovation noch nicht ihre größtmögliche Verbreitung gefunden hat. Durch den technologischen Fortschritt und die dadurch im Zeitverlauf sinkenden Grenzproduktionskosten wird auch der Marktpreis des erneuerbaren Substituts mit fortschreitender Zeit sinken. Im Ergebnis erhöht sich hierdurch der Kreis der Konsumenten und die absolute Verbreitung der Innovation steigt an. Analog zur Situation mit konstanten Grenzkosten hängt jedoch auch hier der weitere Diffusionsverlauf von der unterstellten funktionalen Form des technologischen Fortschritts ab. Eine kontinuierlich steigende Verbreitung ist dabei ebenso denkbar wie ein S-förmiger Verlauf. Wenngleich der Diffusionsverlauf bei zunehmenden Grenzproduktionskosten und die technologische Verbesserung der Innovation hier separat untersucht worden, so wird der Diffusionsverlauf natürlich gleichzeitig von beiden Elementen bestimmt. Die technologische Verbesserung führt zu im Zeitverlauf sinkenden Grenzproduk-

tionskosten, was die Ablösung der erschöpfbaren Ressource in aller Regel beschleunigen sollte. Wiederum verlangt die Ermittlung des genauen Diffusionsverlaufs jedoch die Unterstellung einer konkreten Kostenfunktion, auf welche zu Gunsten einer allgemeinen Argumentation hier jedoch verzichtet wird.

Die Verkürzung des Planungshorizontes, die durch den technologischen Fortschritt noch verstärkt wird, macht eine Anpassung der Preis- und Extraktionspfade der erschöpfbaren Ressource notwendig. Dabei ist es durchaus möglich, dass eine solche Anpassung unter verschiedenen Marktstrukturen in unterschiedlichem Umfang vorgenommen wird oder sogar gänzlich anders ausfällt. Um wie im vorherigen Abschnitt die Höhe des Hotelling Preispfades in den verschiedenen Marktstrukturen vergleichen zu können, wird nun die Wirkung der Backstop-technologie auf den Anfangspreis der Ressource untersucht. Dabei ist zwar in der Regel bei Beginn der Ressourcenextraktion die Backstop-technologie noch unbekannt. Entsprechend wurde der Anfangspreis der Ressource auch nicht an die Existenz der neuen Technologie angepasst. Allerdings kommt es durch die Einführung einer Backstop-technologie dann zu einem Preissprung. Dieser angepasste Marktpreis kann dann als der Anfangspreis bei dem zu diesem Zeitpunkt noch verfügbaren Ressourcenumfang interpretiert werden.

Ein solcher Anfangspreis ist im Optimum der Ausgangspunkt des höchstmöglichen Preispfades, bei welchem die Ressource in dem endogen bestimmten Planungszeitraum erschöpft wird. Mit der Markträumungsbedingung und der als im Zeitverlauf konstant angenommenen isoelastischen Nachfrage lässt sich die kumulierte Ressourcenextraktion ausdrücken als

$$\int_0^{\bar{T}} p_t^{-\alpha} dt = S_0 \quad \text{bzw.} \quad \int_0^{\frac{1}{r+\delta} \ln\left(\frac{MC_0}{p_0}\right)} p_t^{-\alpha} dt = S_0. \quad (3.49)$$

Durch Auflösen des Integrals wird die Anforderung an den Anfangspreis bei Vorhandensein einer Backstop-technologie präzisiert:

$$p_0^{-\alpha} \left[ 1 - \left( \frac{p_0}{MC_0} \right)^{\frac{\alpha}{r+\delta}} \right] = S_0. \quad (3.50)$$

Es ist kaum überraschend, dass bei einer wettbewerblichen Marktstruktur der optimale Anfangspreis mit einer höheren Rate der technologischen Verbesserung des Substituts sinken muss. Der Zusammenhang lässt sich intuitiv über die bereits gezeigte Verkürzung des Planungszeitraums als Folge einer schnelleren Kostensenkung des Substituts herstellen. Die in der Folge zur Erschöpfung des Ressourcenbestands nötigen höheren Extraktionsmengen in den einzelnen Perioden sind nur bei geringeren Marktpreisen möglich. Formal lässt sich dieser Zusammenhang durch totale Differenzierung von (3.50) zeigen:

$$\frac{d p_0}{d \delta} = \frac{p_0 \frac{r}{(r+\delta)^2} \ln\left(\frac{p_0}{MC_0}\right)}{1 - \left(\frac{p_0}{MC_0}\right)^{\frac{\alpha r}{r+\delta}} + \frac{\left(\frac{\alpha r}{r+\delta}\right) \left(\frac{p_0}{MC_0}\right)^{\frac{\alpha r}{r+\delta}}}{\alpha}} < 0 \quad (3.51)$$

Der Wert des Quotienten muss dabei wegen  $p_0 < MC_0$  immer negativ sein. Analog dazu werden die Extraktionsmengen bei einem sinkenden Anfangspreis der Backstopptechnologie steigen. Entsprechend ist nach (3.50) mit einer Senkung des Marktpreises zu rechnen:

$$\frac{d p_0}{d MC_0} = \frac{p_0}{MC_0} \frac{1}{\alpha p_0^{-\alpha} \left(1 - \left(\frac{p_0}{MC_0}\right)^{\frac{\alpha r}{r+\delta}}\right)} > 0. \quad (3.52)$$

$$1 + \frac{\left(\frac{\alpha r}{r+\delta}\right) \left(\frac{p_0}{MC_0}\right)^{\frac{\alpha r}{r+\delta}}}{\alpha p_0^{-\alpha} \left(1 - \left(\frac{p_0}{MC_0}\right)^{\frac{\alpha r}{r+\delta}}\right)}$$

Je geringer also die ursprünglichen Grenzkosten zur Herstellung des Substituts ausfallen, desto niedriger ist der optimale Anfangspreis der Ressource. Interessant hierbei ist, dass bei einer konstanten technologischen Verbesserung des Substituts der Rückgang des Backstoppreises um eine Einheit einen Rückgang des Ausgangspreises um weniger als eine Einheit nach sich zieht: wegen der Annahme, dass  $p_0 < MC_0$  muss  $d p_0 / d MC_0 < 1$  sein.

Diese Ergebnisse hinsichtlich der Preisveränderungen sind einigermaßen ungewöhnlich für einen Markt, der durch wettbewerbliche Strukturen gekennzeichnet ist. Unter der Annahme vollkommener Konkurrenz würde man bei gewöhnlichen Gütern davon ausgehen, dass der Markteintritt weiterer Produzenten keine Auswirkungen auf den Marktpreis des Gutes haben wird. Analog gilt dies auch für Märkte, auf denen das Angebot ausschließlich aus einer erschöpfbaren Ressource besteht. Die Analyse zu Beginn dieses Kapitels hat gezeigt, dass die Abbaurate unter wettbewerblichen Marktstrukturen gesellschaftlich optimal ist. Durch einen weiteren Ressourcenanbieter kommt es hier nicht zu einer Veränderung des Marktpreises. Anders auf einem Markt wie dem Kraftstoffmarkt, dessen Angebot sowohl aus erneuerbaren als auch erschöpfbaren Ressourcen basiert. Während im Modell die Angebotsmenge des erneuerbaren Substituts aufgrund der Grenzkostenpreissetzung unabhängig von der Angebotsmenge der erschöpfbaren Ressource war, gilt dies nicht umgekehrt. Durch den Markteintritt des erneuerbaren Substituts wird ein Prohibitivpreis für die erschöpfbare Ressource und damit eine Untergrenze für die Angebotsmenge im Markt bestimmt. Der Planungshorizont der erschöpfbaren Ressource verkürzt sich. Dabei hängt der Umfang der Verkürzung von der absoluten Höhe der Grenzkosten des Substituts, sowie dem zu Grunde gelegten technologischen Fortschritt ab. Durch die Existenz eines erneuerbaren Substituts für eine erschöpfbare Ressource wird sich also das Ergebnis auf dem betrachteten Markt ändern. Über eine Änderung

der Zusammensetzung des Marktangebots hinaus kommt es auch zu veränderten Angebotsmengen und Marktpreisen.

Diese Überlegungen lassen auch erste Schlüsse bezüglich einer möglichen Förderstrategie erneuerbarer Ressourcen zu. Die Förderung von Forschung und Entwicklung von Biokraftstoffen wirkt sich nicht nur auf deren Herstellkosten und somit auf ihre Wettbewerbsfähigkeit bzw. ihren Markteintritt aus. Das Modell postuliert darüber hinaus auch fallende Preise der mineralischen Energieträger. Eine Förderung von Biokraftstoffen verspricht also die Stärkung der heimischen Biokraftstoffindustrie in zweifacher Weise.

Nach diesen ersten Überlegungen zur Wirkung einer Backstop-Technologie auf den Anfangspreis einer erschöpfbaren Ressource wird dieser nun formal hergeleitet. Der formale Ausdruck für den Ressourcenpreis zeigt die Grenzproduktionskosten des erneuerbaren Substituts als einen wichtigen Einflussfaktor. Hierfür wird von technologischem Fortschritt abgesehen, es gilt  $\delta = 0$  und  $MC_t = b$ . Die Berücksichtigung von technologischem Fortschritt im Ausdruck für den optimalen Anfangspreis macht die Unterstellung einer funktionalen Form der Technologieverbesserung notwendig. Hierdurch nimmt die Komplexität des Ausdrucks für den Anfangspreis zwangsläufig und in nicht unerheblichem Umfang zu und erschwert so die Interpretation sowie den Vergleich mit anderen Marktstrukturen. Aus (3.50) ergibt sich der optimale Anfangspreis der erschöpfbaren Ressource damit als

$$p_0 = \left[ \frac{I}{\alpha r S_0 + b^{-\alpha}} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (3.53)$$

Dieser Ausdruck für den optimalen Anfangspreis zeigt, dass lediglich für den Extremfall unendlich hoher Grenzkosten diese für die Preisfindung der Ressourcenanbieter keine Rolle mehr spielen. In diesem Fall entspricht der Anfangspreis dem in Abschnitt 3.1 hergeleiteten Anfangspreis einer erschöpfbaren Ressource ohne entsprechende Backstop-Technologie:

$$p_0 = \left[ \frac{I}{\alpha r S_0} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (3.6)$$

Als Differenz der optimalen Anfangspreise  $\Delta p_0$  ergibt sich hieraus

$$\Delta p_0 = \left[ \frac{I}{\alpha r S_0 + b^{-\alpha}} \right]^{\frac{1}{\alpha}} - \left[ \frac{I}{\alpha r S_0} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (3.54)$$

Diese Differenz zeigt nicht nur den zwangsläufig sinkenden Anfangspreis der erschöpfbaren Ressource. Sie macht insbesondere deutlich, dass im Falle der Existenz einer Backstop-Technologie eher von einem endogen bestimmten Planungshorizont auszugehen ist. Die Sinnhaftigkeit eines oftmals unterstellten exogenen Planungshorizontes muss daher bezweifelt werden.

Der sinkende Anfangspreis der Ressource ist dabei das Resultat der höheren Extraktionsmengen in Folge des verkürzten Planungszeitraums. Wie bereits diskutiert wurde, führt die Exis-

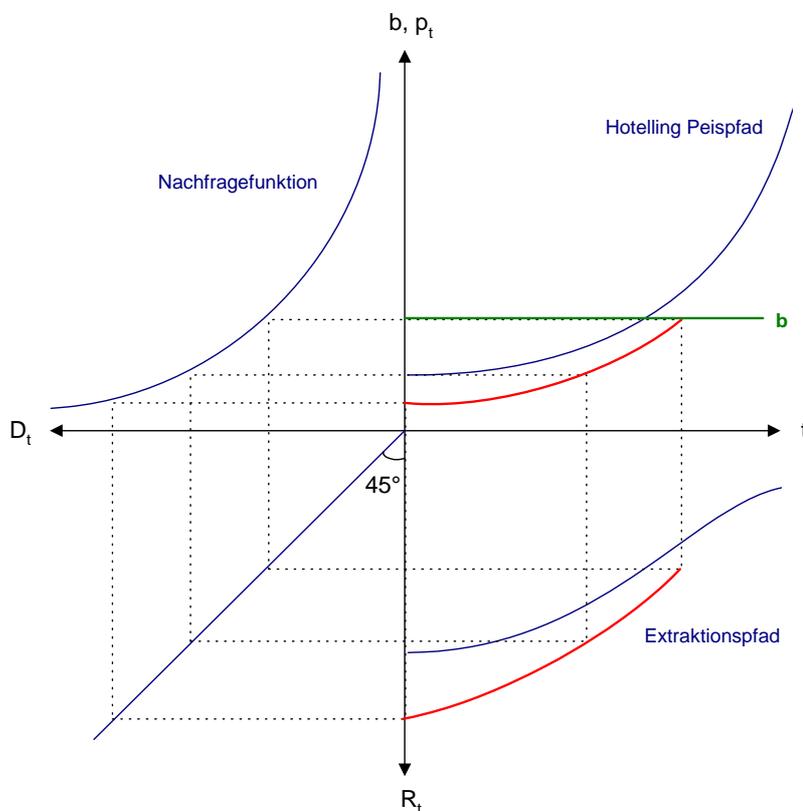
tenz einer Backstopptechnologie nicht zwangsweise und nicht unter den gewählten Modellannahmen zu einer Schonung der vorhandenen Ressourcenvorräte. Der aus (3.53) leicht zu ermittelnde Extraktionspfad bestätigt dies:

$$R_t = \left[ \alpha r S_0 + b^{-\alpha} \right] e^{-\alpha r t} . \quad (3.55)$$

Im Vergleich zur Situation ohne Backstopptechnologie liegt die Ressourcenextraktion hier zu jedem Zeitpunkt höher. Der Term  $b^{-\alpha}$  geht zusätzlich in den Ausdruck für die Ressourcenextraktion ein und bewirkt die Anhebung des Extraktionspfades.

Zusammenfassend werden die Ergebnisse hinsichtlich des veränderten Planungshorizontes sowie der Anpassung der Preis- und Extraktionspfade im Wettbewerb in Abbildung 3.15 dargestellt. Es ist zu erwarten, dass die hier dargestellte Reaktion in anderem Umfang oder sogar gänzlich anders ausfällt, wenn der Abbau der erschöpfbaren Ressource durch ein Monopol stattfindet. Dabei muss wiederum unterschieden werden, ob dieses Ressourcenmonopol selbst im Besitz der Backstopptechnologie ist oder sich vielmehr in Konkurrenz zu verschiedenen Anbietern des erneuerbaren Substituts befindet. Beide Fälle werden nun untersucht und einem Vergleich mit dem Referenzfall vollkommenen Wettbewerbs unterzogen.

**Abbildung 3.15** Endogener Planungshorizont bei Einführung einer Backstopptechnologie



Quelle: Eigene Darstellung

## ANGEBOT EINES RESSOURCENMONOPOLS MIT WETTBEWERBLICHER UMGEBUNG

Zunächst wird unterstellt, dass sich ein Ressourcenmonopolist der Konkurrenz von Herstellern des erneuerbaren Substituts gegenüber sieht. Als Ressourcenmonopolist wird üblicherweise der Anbieter einer erschöpfbaren Ressource bezeichnet, wobei diese Bezeichnung nicht als Charakterisierung der Wettbewerbssituation auf dem Markt zu verstehen ist, sondern vielmehr als Hinweis zur Verteilung der Extraktionsrechte der erschöpfbaren Ressource. Das erneuerbare Substitut hingegen wird wettbewerbsfähig und wiederum mit konstanten Grenzproduktionskosten bezüglich der Produktionsmenge hergestellt. Im Zeitverlauf führt technologischer Fortschritt zu sinkenden Grenzproduktionskosten. Auch durch diese Annahmen wird die reale Marktstruktur des Kraftstoffmarktes natürlich nur unzureichend wiedergegeben. Allerdings können die Ausführungen gleichwohl einen ersten Eindruck davon vermitteln, welche Folgen für den Diffusionsverlauf und den Markteintritt einer Innovation zu erwarten sind, wenn man sich von der optimistischen Annahme eines wettbewerbsfähigen Marktangebots entfernt. Im Gegensatz zu der eben untersuchten wettbewerbsfähigen Extraktion ist der Ressourcenmonopolist in der Lage, seine Monopolstellung auf dem Markt zu sichern, indem er Markteintrittsschranken errichtet. Als solche zählt auch die Preisstrategie des sog. limit pricing. Erwartungsgemäß sollte sich hierdurch der Markteintritt des erneuerbaren Substituts im Vergleich zur Wettbewerbssituation verzögern. Zur Gänze verhindern kann der Ressourcenmonopolist die Diffusion der Innovation nicht, über kurz oder lang wird die Ressource erschöpft sein und das erneuerbare Substitut in den Markt eintreten.

Die folgenden Ausführungen werden zeigen, in welchem Umfang mit einer solchen Verzögerung zu rechnen ist und welche Möglichkeiten zur effizienten Korrektur dieses Marktversagens vorliegen. Von der Untersuchung der üblicherweise angebrachten Forderung nach Zerschlagung eines marktbeherrschenden Unternehmens oder Kartells wird im Hinblick auf die Struktur des globalen Erdölmarktes jedoch abgesehen. Einzig regenerative Energiequellen bieten das Potential einer weitestgehenden Eigendeckung des Energiebedarfs (ZEDDIES 2006a: 123) und damit die Möglichkeit eines wettbewerbsfähigen Energieangebots. Es wird daher die Wirkung einer steuerlichen Begünstigung der Innovation sowie die Förderung von Forschung und Entwicklung auf den Markteintritt kurz umrissen. Damit direkt verbunden ist auch die Frage der Ölpreisabhängigkeit der Wirtschaft, die im Verlauf dieser Arbeit ebenfalls thematisiert wird.

Analog zur Wettbewerbssituation erfolgt auch hier die Ressourcenextraktion zu vernachlässigbaren Kosten. Für die wiederum wettbewerbsfähige Produktion des erneuerbaren Substituts werden konstante Grenzkosten in Höhe von  $MC_t = b$  unterstellt. Diese Grenzkosten bilden den Prohibitivpreis der erschöpfbaren Ressource. Solange der Ressourcenmonopolist mit seinem Marktpreis unter diesem Prohibitivpreis bleibt, behält er seine marktbeherrschende Stellung. Setzt das Ressourcenmonopol jedoch einen Preis höher als  $b$ , so werden die Produzen-

ten des erneuerbaren Substituts diesen Preis unterbieten und das Ressourcenmonopol aus dem Markt drängen. Für das Ressourcenmonopol gilt demnach folgende Nachfragefunktion<sup>13</sup>:

$$R_t = D_t(p_t) = \begin{cases} p_t^{-\alpha} & \forall p_t \leq b \\ 0 & \forall p_t > b \end{cases} \quad \text{wobei } \alpha > 1. \quad (3.56)$$

Unter Beachtung des Prohibitivpreises lautet das Optimierungsproblem des Monopolisten

$$\max_{R_t} \int_0^{\bar{T}} p_t(R_t) \cdot R_t \cdot e^{-rt} dt \quad (3.57)$$

$$\text{s.t. } \dot{S}_t = -R_t \quad (3.58)$$

$$S_0 \text{ gegeben} \quad (3.59)$$

$$\text{und } R_t \geq b^{-\alpha} \quad \text{oder} \quad R_t = 0 \quad (3.60)$$

Dabei wird der Prohibitivpreis analog zur Vorgehensweise in den vorangehenden Abschnitten durch  $R_t \geq b^{-\alpha}$  aus (3.60) als Mengenbeschränkung formuliert. Der Ressourcenmonopolist ist zu keinem Zeitpunkt in der Lage, die Angebotsmenge unter ein bestimmtes Niveau zu verknappen. Jede geringere Menge als die beim Substitutspreis nachgefragte würde einen Preis größer dem Prohibitivpreises implizieren, bei welchem die Nachfrage dann Null wäre. Die periodische Hamiltonfunktion ergibt sich somit als

$$H = p_t(R_t) \cdot R_t - \lambda_t \cdot R_t. \quad (3.61)$$

Die Beschränkung der Kontrollvariablen  $R_t$  führt jedoch zu einer Randlösung, weshalb im Maximumprinzip  $\partial H / \partial R_t \leq 0$  gelten muss. Dabei impliziert  $<$  stets die Extraktionsmenge  $R_t = b^{-\alpha}$ .

$$\frac{\partial H}{\partial R_t} = m_t - \lambda_t \leq 0, \quad (3.62)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial S_t} = \dot{\lambda}_t - r \cdot \lambda_t, \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda_t} = \dot{S}_t, \quad (3.64)$$

$$\lambda_{\bar{T}} \cdot S_{\bar{T}} = 0. \quad (3.65)$$

<sup>13</sup> Die hier unterstellte Nachfragefunktion besagt, dass bei einem Marktpreis von  $b$  die gesamte Marktnachfrage durch das Ressourcenmonopol bedient wird, solange die Angebotsmengen der Ressource  $R_t > 0$ . Zwar erscheint es realitätsnaher anzunehmen, dass bei  $p_t = b$  ein Teil des Marktangebotes aus dem erneuerbaren Substitut besteht. Der Monopolist als Preissetzer würde in einem solchen Fall jedoch einen Preis marginal geringer als  $b$  wählen. Dieser marginale Unterschied in der Preissetzung ändert jedoch nichts an der ökonomischen Aussage des Modells (HOEL 1978a: 15) und ist daher für die vorzunehmende Analyse kaum interessant, daher wurde zur Vereinfachung der Mathematik die Nachfragefunktion entsprechend (3.56) festgelegt.

Entsprechend der üblichen Vorgehensweise lässt sich aus (3.62) schließen, dass der Monopolist seine Extraktionsmenge so wählen wird, dass die hieraus resultierenden Grenzerlöse  $m_t$  zu keinem Zeitpunkt den Wert des Schattenpreises übersteigen. Für diese Schattenpreise gilt wiederum, dass ihre Gegenwartswerte im Zeitverlauf konstant bleiben müssen. Denn wegen  $-\partial H/\partial S_t = 0$  ergibt sich aus (3.63) für die Schattenpreise die Bedingung  $\lambda_t = \lambda_0 e^{rt}$ . Zusammen mit dem Ausdruck für den Grenzerlös  $m_t$

$$m_t = \lambda_t = p_t (1 - 1/\alpha) \quad (3.66)$$

resultiert aus (3.62) schließlich die Bedingung für den optimalen Anfangspreis der erschöpfbaren Ressource:

$$(1 - 1/\alpha) p_t \leq \lambda_0 e^{rt}. \quad (3.67)$$

Um aus dieser Bedingung den optimalen Anfangspreis der erschöpfbaren Ressource ableiten zu können, muss offensichtlich zunächst ihr Schattenpreis ermittelt werden. Hierfür wird auf die Transversalitätsbedingung bei Kontrollproblemen mit endogenem Zeithorizont zurückgegriffen<sup>14</sup>. Diese besagt, dass die Hamiltonfunktion im Erschöpfungszeitpunkt schließlich den Wert Null annehmen muss:

$$H_{\bar{T}} = p_{\bar{T}} (R_{\bar{T}}) \cdot R_{\bar{T}} - \lambda_{\bar{T}} \cdot R_{\bar{T}} = 0. \quad (3.68)$$

Das bedeutet, dass der Ressourcenpreis im Erschöpfungszeitpunkt nicht nur gleich den Grenzkosten des erneuerbaren Substituts ist, sondern auch den Wert des Schattenpreises annehmen muss:  $b = p_{\bar{T}} (R_{\bar{T}}) = \lambda_{\bar{T}}$ . Für den anfänglichen Schattenpreis ergibt sich daher zusammen mit (3.63)

$$\lambda_0 = b e^{-r\bar{T}}. \quad (3.69)$$

Damit lässt sich nun auch der optimale Anfangspreis und davon ausgehend der HOTELLING Preispfad des Ressourcenanbieters bestimmen. Dieser besteht aus zwei Preisphasen. Einer ersten Preisphase, in welcher der Preis wie im ursprünglichen HOTELLING Modell mit dem Zinssatz anwächst und einer zweiten Preisphase, in welcher der Ressourcenpreis dem Backstoppreis entspricht. Formal lassen sich die beiden Preisphasen angeben als:

$$p_t = \text{Min} \left[ b, b e^{-r(\bar{T}-t)} (\alpha/\alpha - 1) \right] \quad (3.70)$$

<sup>14</sup> Andere Autoren ermitteln den Wert des Schattenpreises im Erschöpfungszeitpunkt beispielsweise über Gleichung (3.67). Die Bedingung macht deutlich, dass die Extraktionsmenge im Zeitverlauf nicht zunehmen kann. Es kann argumentiert werden, dass nach einer Ressourcenextraktion von Null in keiner der darauffolgenden Perioden eine positive Menge der Ressource extrahiert werden wird. Durch den positiven Zinssatz wäre es in einem solchen Fall möglich, den Gewinn des Monopolisten zu erhöhen, indem die Extraktion der Ressource in eine frühere Periode verlagert wird. Zusammen mit der Tatsache, dass (3.60) früher oder später bindend sein muss, nimmt die Extraktionsmenge zum Erschöpfungszeitpunkt die niedrigste mögliche Menge an.

Aufgrund der Existenz dieser zweiten Preisphase, der Phase des sog. limit pricing, muss der Anfangspreis der Ressource zwangsläufig höher liegen, als im Falle der wettbewerblichen Extraktion. Der Preispfad des Ressourcenmonopols erreicht den Prohibitivpreis noch vor der vollständigen Erschöpfung des Bestandes.

Als erster hat NORDHAUS auf diese Art der Preissetzung hingewiesen. Das Phänomen des limit pricing tritt dann in verschärfter Form auf „if demand has a price elasticity less than one“ (NORDHAUS 1979: 20). In einem solchen Fall wäre der Grenzerlös des Monopols negativ. Ohne Prohibitivpreis würde das Monopol infinitesimale Mengen der Ressource zu einem unendlich hohen Preis verkaufen. Durch die von den Substitutsproduzenten gesetzte Preisschranke ist dies jedoch nicht möglich. DASGUPTA/HEAL (1974: 343) argumentieren hier, dass das Monopol nun zumindest einen Preis nahe des Prohibitivpreises realisieren wird. Dadurch wählt es gleichzeitig den höchsten Preis, der den Markteintritt von Wettbewerbern verhindern kann. Daher kann diese Form des limit pricing auch als Strategie zur Verhinderung eines Markteintritts angesehen werden. Detaillierter gehen beispielsweise OLSEN (1993), WIRL (1991) oder POWELL/OREN (1989) auf die Methode und Implikationen des limit pricing ein.

Die formale Betrachtungsweise der beiden Preisperioden im Falle erschöpfbarer Ressourcen ist jedoch hauptsächlich auf DASGUPTA/STIGLITZ (1976), HOEL (1978) sowie GILBERT (1978) zurückzuführen. Diese zeigen, dass das Phänomen des limit pricing der zweiten Preisphase unabhängig von der Anfangsausstattung der Ressource oder der Höhe des Prohibitivpreises immer auftreten muss. Mit  $\bar{t}$  sei der Beginn des limit pricing und damit gleichzeitig das Ende der ersten Preisphase bezeichnet. Wegen (3.70) muss daher für den Ressourcenpreis

$$b = b e^{-r(\bar{T}-\bar{t})} (\alpha/\alpha - 1). \quad (3.71)$$

gelten. Die Länge der zweiten Preisphase beträgt damit

$$(\bar{T} - \bar{t}) = -\frac{1}{r} \ln \left( \frac{\alpha - 1}{\alpha} \right). \quad (3.72)$$

Umgekehrt bestimmen Ressourcenbestand und Prohibitivpreis jedoch die Existenz einer ersten Preisphase. In anderen Worten kann es für den Ressourcenmonopolisten Gewinn maximierend sein, bereits zu Beginn des Planungszeitraumes die Ressource zum Substitutspreis anzubieten. Da dieser Fall jedoch trivial ist, wird im Folgenden von der Existenz einer ersten Preisphase ausgegangen. Um dies sicherzustellen, muss bei gegebenem Substitutspreis ein ausreichender Ressourcenbestand vorausgesetzt werden. Dann ergibt sich die Ressourcenbeschränkung mit (3.70) als

$$S_0 = \int_0^{\bar{t}} \left( b e^{-r(\bar{T}-t)} (\alpha/\alpha - 1) \right)^{-\alpha} dt + \int_{\bar{t}}^{\bar{T}} b^{-\alpha} dt. \quad (3.73)$$

Umformen ergibt  $(\alpha/\alpha - 1)^{-\alpha} b^{-\alpha} e^{\alpha r \bar{T}} = \left[ \alpha r S_0 + b^{-\alpha} (\alpha \ln(\alpha - 1/\alpha) + 1) \right]^{\frac{1}{\alpha}}$  als einen Zwischenschritt zur Ermittlung des optimalen Preises. Diese Gleichung lässt sich nun mühelos in

(3.70) einsetzen, womit der optimale Preispfad der erschöpfbaren Ressource definiert werden kann als

$$p_t = \text{Min} \left[ b, e^{rt} \left[ \alpha r S_0 + b^{-\alpha} (\alpha \ln(\alpha - 1/\alpha) + 1) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \right]. \quad (3.74)$$

Der anfängliche Preis, zu dem das Monopol die Ressource anbietet, ist damit

$$p_0 = \left[ \alpha r S_0 + b^{-\alpha} (\alpha \ln(\alpha - 1/\alpha) + 1) \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (3.75)$$

Dieser Ausdruck macht im Vergleich zu (3.53) deutlich, dass das Monopol in einer Situation mit wettbewerblich produziertem Substitut einen höheren Preis verlangen und eine geringere Menge der Ressource am Markt anbieten wird als vor Invention der Backstopptechnologie.

Dieses Ergebnis ist zunächst einmal überraschend, steigt doch der Wettbewerb im Markt an. Ein Mehr an Wettbewerb führt in diesem Fall aber nicht zu sinkenden Marktpreisen. Es kann leicht überlegt werden, dass die Existenz einer Backstopptechnologie dem Ressourcenmonopol die Möglichkeit der freien Preiswahl verwehrt. Es erscheint durchaus rational, dass das Ressourcenmonopol eine Kompensation für die entgangenen künftigen Gewinne durch Preiserhöhungen in der Gegenwart anstrebt. Aus demselben Grund liegt der Ressourcenanfangspreis in dieser Marktstruktur auch über dem des reinen Monopols, welches im nächsten Abschnitt analysiert werden wird. Die Verzögerung der Ressourcenextraktion durch ein Monopol gilt offensichtlich auch bei Einführung einer Backstopptechnologie, unabhängig von der Bereitstellungsform des Substituts. Allerdings wäre es sicherlich verfehlt, das Monopol mit den Worten SOLOWS (1974: 8) als Freund künftiger Generationen zu bezeichnen. Durch den zeitunabhängigen Backstoppreis profitieren künftige Generationen nicht länger von geringeren Preisen aufgrund des Verzichts der heutigen Generation.

Wie im Falle der wettbewerblich extrahierten Ressource hängt auch hier der optimale Ausgangspreis der Ressource von den Grenzkosten zur Produktion des Substituts ab. Der Zusammenhang ist hier jedoch ein umgekehrter. Während der Anfangspreis der Ressource bei Existenz einer Backstopptechnologie in der Wettbewerbssituation mit den Grenzkosten der Substitutsproduktion sank, ist hier das Gegenteil der Fall. Je geringer der Marktpreis des Substituts ausfällt, umso höher wird das Ressourcenmonopol den HOTELLING Preispfad anlegen. Dabei stellt sich nun die interessante Frage, wie gering der Substitutspreis sein muss, damit das Monopol diesen als Anfangspreis der Ressource wählt. Mit  $p_0 = b$  erhält man

$$\bar{b} = \left[ \frac{|\ln(\alpha - 1/\alpha)|}{r S_0} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (3.76)$$

Dieser Ausdruck zeigt die Abhängigkeit der zweiten Preisphase von der Anfangsausstattung der Ressource sowie dem Zinssatz und der Elastizität der Nachfrage. Bei entsprechend ge-

wählten Werten für diese Variablen wird das Ressourcenmonopol von Beginn an limit pricing betreiben. Entsprechend gilt dies auch bei Unterstellung von technologischem Fortschritt. In diesem Fall jedoch fällt der Preisfad der erschöpfbaren Ressource im Zeitverlauf. Die Preisentwicklung der erschöpfbaren Ressource wird in diesem Fall durch den technologischen Fortschritt des erneuerbaren Substituts bestimmt. Je schneller dieser voranschreitet, umso stärker fällt auch der Marktpreis der erschöpfbaren Ressource. Und umso schneller ist entsprechend auch der Erschöpfungszeitpunkt erreicht. Nach Erschöpfung setzt die Verbreitung der Innovation ein. Mit dem sinkenden Marktpreis infolge des technologischen Fortschritts vergrößert sich auch der Kreis der Adopter.

Nun soll jedoch von der Existenz einer ersten Preisphase ausgegangen werden. Auch in diesem Fall lassen sich aus dem Preissetzungsverhalten des Ressourcenmonopols leicht Rückschlüsse auf den Erschöpfungszeitpunkt der Ressource ziehen. Je geringer der Substitutspreis ist und je höher daher der Monopolpreis angelegt wird, umso weiter rückt die endgültige Erschöpfung in die Zukunft. Hier stellt sich die Frage nach der Motivation der Förderung technologischen Fortschritts des erneuerbaren Substituts. Bei der hier untersuchten Marktstruktur führt technologischer Fortschritt mitnichten dazu, dass das erneuerbare Substitut früher in den Markt eintritt. Im Gegenteil verzögert sich der Markteintritt der Innovation sogar noch. Zudem kommt es zu steigenden Marktpreisen im Vorfeld des Markteintritts und damit einhergehend zu Wohlfahrtsverlusten. Inwiefern dies durch die späteren niedrigeren Marktpreise wieder ausgeglichen wird, ist zumindest in diesem Modell fraglich. In der Realität dürften solche Extremsituationen jedoch kaum vorkommen. Insbesondere die verschiedenen Nutzungszwecke von Erdöl werden in der Regel eine solche Preissetzungsstrategie des Ressourcenmonopols zumindest teilweise verhindern. Fest steht jedoch, dass die Förderung von Wettbewerb kein unfehlbarer Mechanismus zur Senkung der Marktpreise ist.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Reaktionen auf die Existenz einer Backstop-technologie und deren technologischen Fortschritt abhängig von der Marktstruktur ist. Ein Ressourcenmonopol reagiert auf die Innovation völlig anders als die wettbewerblich extrahierenden Unternehmen. Der Zeitpunkt des Markteintritts des wettbewerblich produzierten findet im Falle des Ressourcenmonopols zeitverzögert statt. Technologischer Fortschritt verstärkt diesen Effekt noch zusätzlich.

#### **ANREIZE ZUR ENTWICKLUNG EINER BACKSTOPTECHNOLOGIE FÜR EIN MONOPOL**

Die Analyse der optimalen Preis- und Extraktionspfade im reinen Monopol ist nicht allein durch die Generalisierung der konventionellen Monopolproduktion bezüglich erschöpfbarer Ressourcen motiviert. Sie dient darüber hinaus dem Verständnis der Anreize eines Monopols zur Entwicklung und Herstellung eines Substituts, die über den Aufbau von Markteintrittsbarrieren hinausreichen. Es wird ein Monopolist betrachtet, der neben dem gesamten Ressour-

cenbestand  $S_0$  auch das Patent auf ein unbegrenzt verfügbares Substitut inne hat. Dieser Monopolist strebt eine Maximierung der Summe der Gewinne aus den Verkaufsmengen der erschöpfbaren Ressource  $R_t$  und des erneuerbaren Substituts  $x_t$  an. Das Substitut wird mit konstanten Grenzkosten  $b$  produziert. Da diese Technologie in unbegrenztem Umfang zur Verfügung steht, wird der Planungshorizont des Monopolisten hier als unendlich angenommen:

$$\max_{R_t, x_t} \int_0^{\infty} [p_t(R_t + x_t) \cdot (R_t + x_t) - b x_t] \cdot e^{-rt} dt \quad (3.77)$$

$$s.t. \quad \dot{S}_t = -R_t \quad (3.78)$$

$$\text{und } S_0 \text{ gegeben} \quad (3.79)$$

In ähnlicher Weise gehen STIGLITZ/DASGUPTA (1982: 134) vor. Bereits an dieser Stelle ist offensichtlich, dass bei den hier unterstellten Annahmen ähnlich wie im vorherigen Abschnitt das Marktangebot des Monopolisten aus zwei Phasen bestehen muss. Die Zurückhaltung der neuen Technologie ermöglicht es dem Monopolisten, in der ersten Phase ausschließlich die für ihn kostengünstigere Ressource anzubieten. Der Markteintritt des Substituts erfolgt dann erst nach Erschöpfung des Ressourcenbestandes. Für die Analyse der Marktpreise ist dabei entscheidend, dass das Marktangebot zu keiner Zeit aus beiden Ressourcenarten gleichzeitig gebildet wird. In den beiden Phasen kommen daher die bereits bekannten Preissetzungsmechanismen zum Tragen. Entsprechend wird der Monopolist in der ersten Phase das Marktangebot der erschöpfbaren Ressource so wählen, dass der Grenzerlös in Höhe des Zinses steigt:

$$m_t = m_0 \cdot e^{rt} \quad \forall t \leq \bar{T} . \quad (3.80)$$

Bei einer isoelastischen Nachfrage gilt dies auch für den Preis der erschöpfbaren Ressource:

$$p_t = p_0 \cdot e^{rt} \quad \forall t \leq \bar{T} . \quad (3.81)$$

Nach deren Erschöpfung macht der Monopolist von seinem Patent Gebrauch und bietet das Substitut am Markt an. Das Preissetzungsverhalten des Monopolisten in dieser zweiten Phase ist aus den mikroökonomischen Lehrbüchern (FRANK 2005, PINDYCK/RUBINFELD 2005, VARIAN 2007) eingehend bekannt. Der langfristige Marktpreis bleibt im Zeitverlauf konstant und wird wie üblich durch Grenzerlös und Grenzkosten des Substituts bestimmt.

Während der Preissetzungsmechanismus in beiden Phasen also durchaus bekannt ist, bedarf die absolute Preishöhe der ersten Phase weiterer Überlegungen. Bei einem unendlichen Planungshorizont würde der Ressourcenmonopolist den Ressourcenbestand nicht in einem endlichen Zeitrahmen ausbeuten. Bei Existenz eines Substituts muss er jedoch die Vorteile eines höheren Preispfades den entgangenen Gewinnen aus dem Verkauf des Substituts gegenüberstellen. Demzufolge wird er den Anfangspreis der ersten Phase so lange senken, bis der lang-

fristige Marktpreis  $p_\infty$  bei Erschöpfung der Ressource erreicht wird. Dieser lässt sich mit  $m_\infty = b$  einfach ermitteln als

$$p_\infty = \frac{b \alpha}{\alpha - 1}. \quad (3.82)$$

Offensichtlich ist dieser höher als im Referenzszenario, in welchem die Herstellung des Substituts wettbewerblich erfolgt. Weil der Prohibitivpreis des Monopolisten also höher ist als der Prohibitivpreis für die wettbewerblichen Ressourcenanbieter, wird er in der Folge auch einen Anfangspreis und HOTELLING Preispfad wählen, die höher sind als gesellschaftlich optimal. Ein kurzer Vergleich mit dem Anfangspreis der Wettbewerbslösung zeigt dies. Dieser war in (3.53) gegeben als

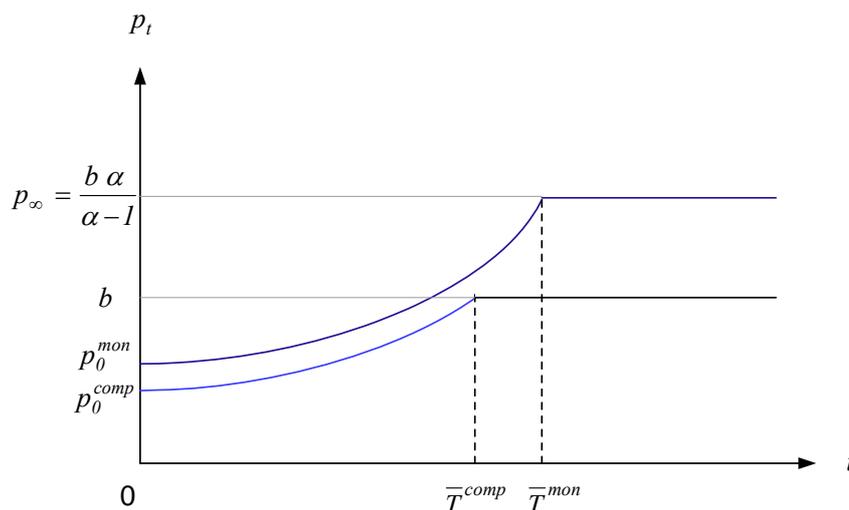
$$p_0 = \left[ \frac{I}{\alpha r S_0 + b^{-\alpha}} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (3.53)$$

Der optimale Anfangspreis des reinen Monopolisten beträgt demgegenüber

$$p_0 = \left[ \frac{I}{\alpha r S_0 + b^{-\alpha} (\alpha/\alpha - 1)^{-\alpha}} \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (3.83)$$

Da stets gilt, dass  $(\alpha/\alpha - 1)^{-\alpha} < 1$  ist, muss der Anfangspreis des reinen Monopolisten zwangsläufig stets über dem der Wettbewerbsextraktion liegen. Entsprechend liegt auch der HOTELLING Preispfad des reinen Monopolisten höher als jener im Referenzfall. Ein Schnittpunkt der beiden HOTELLING Preispfade wird dadurch ausgeschlossen, dass in beiden Fällen der Preis in Höhe des Zinssatzes anwächst.

**Abbildung 3.16** Preispfad des reinen Monopolisten im Vergleich zum Referenzszenario



Quelle: Eigene Darstellung

In der Folge des höheren Preispfades ist das Extraktionsprogramm des reinen Monopolisten konservativer im Vergleich zum Referenzszenario. Der Grund hierfür kann unter anderem in

der unterschiedlichen Bedeutung des Substituts für diesen gesehen werden. Während im Wettbewerb die Absatzmöglichkeiten der Ressourcenanbieter durch die Backstop-Technologie bedroht werden, stellt das Patent für den Monopolisten eine zusätzliche Einkommensquelle dar, mit Hilfe derer er die Endlichkeit der erschöpfbaren Ressource überwinden kann. STIGLITZ /DASGUPTA (1982: 137) zeigen darüber hinaus, dass sich der Effekt noch verstärkt, wenn mit der Extraktionsmenge auch die Preiselastizität der Nachfrage steigt. Abbildung 3.16 zeigt die Anfangspreise und HOTELLING Preispfade der beiden Marktstrukturen im Vergleich. Weniger einfach lässt sich der für den reinen Monopolisten ermittelte Anfangspreis mit jenem des Ressourcenmonopols vergleichen. Mit

$$p_0 = \frac{I}{\left[ \alpha r S_0 + b^{-\alpha} (\alpha \ln(\alpha - I/\alpha) + I) \right]^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (3.75)$$

als Ausdruck für den Anfangspreis im Ressourcenmonopol bestimmt die Höhe der Nachfrageelastizität  $\alpha$  über das Verhältnis der Anfangspreise. Dieses kann ohne weitere Annahmen daher nicht ermittelt werden. Jedoch zeigt ein Vergleich deutlich, dass der Preis eines Monopolisten, welcher ein Patent auf die Backstop-Technologie hat, immer unter dem Monopolpreis ohne Existenz eines erneuerbaren Substituts liegen muss. Entsprechend höher sind die jeweiligen Angebotsmengen am Markt. Die Entwicklung eines Substituts zahlt sich also nicht allein für den Monopolisten aus. Auch unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten kann von einer Verbesserung gesprochen werden.

Mehr noch als die Verzögerung in der Ressourcenausbeutung im Vergleich mit dem Wettbewerbsergebnis ist hier allerdings der Umgang des Monopolisten mit der neuen Technologie von Interesse. Die Entwicklung und Patentierung einer Backstop-Technologie ist für den Ressourcenmonopolisten von zweifacher Bedeutung. Nicht allein eröffnet sie ihm weitere Absatzmöglichkeiten. Darüber hinaus dient das Patent auch als Schutz des Ressourcenabsatzes. Der reine Monopolist hemmt im Gegensatz zum Wettbewerb technologische Neuerungen<sup>15</sup>. Problematisch ist dabei weniger die Zurückhaltung des Patents bis zur Erschöpfung der Ressource. Kritisch muss vielmehr die Wahl des Erschöpfungszeitpunkts  $\bar{T}^{mon}$  gesehen werden. Ein Vergleich der Erschöpfungszeitpunkte beim reinen Monopol und bei vollkommenem Wettbewerb zeigt diese Verzögerung. Wegen  $\alpha > 1$  muss der Erschöpfungszeitpunkt im reinen Monopol immer über dem sozial optimalen Zeitpunkt  $\bar{T}^{comp}$ :

$$\bar{T}^{mon} = \frac{I}{r} \ln \left[ \frac{b \alpha / (\alpha - 1)}{p_0} \right] > \frac{I}{r} \ln \left[ \frac{b}{p_0} \right] = \bar{T}^{comp}. \quad (3.84)$$

Die neue Technologie wird im Monopol damit zu lange zurückgehalten. Je höher allerdings die Elastizität der Nachfrage ist, desto geringer ist der Unterschied im Planungszeitraum.

<sup>15</sup> Die Verzögerung von Inventionen im Monopolfall wird im Vergleich zu anderen Marktstrukturen detailliert bei STIGLITZ et al. (1982) diskutiert und kann für diese Untersuchung als gegeben hingenommen werden.

### 3.3 Zusammenfassung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Analyse der Diffusion einer Innovation im neoklassischen Modellrahmen. Im Ergebnis zeigt auch die neoklassische Theorie trotz aller Vorbehalte einen sukzessiven Übergang auf die Innovation, wie er auch in der Realität zu erwarten ist. Anstelle des sprunghaften Übergangs auf das erneuerbare Substitut bei Annahme konstanter Grenzkosten tritt bei der realitätsnäheren Annahme zunehmender Grenzkosten auch ein realitätsnäherer Diffusionsverlauf. Abhängig von der genauen Form der Herstellkosten des erneuerbaren Substituts verdrängt dieses die erschöpfbare Ressource unterschiedlich schnell vom Markt. Die Marktanteile des erneuerbaren Substituts steigen und nehmen bei geeigneter Kostenfunktion einen S-förmigen Verlauf an. Die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Ergebnisse lassen sich jedoch nicht auf jede beliebige Innovation übertragen. Die Untersuchung bezieht sich auf die Ablösung einer erschöpfbaren Ressource durch ihr erneuerbares Substitut und berücksichtigt, dass die Preisbildung erschöpfbarer Ressourcen fundamental anders erfolgt als bei reproduzierbaren Gütern. Insbesondere muss bei erschöpfbaren Ressourcen eine Knappheitsrente in den Marktpreis einfließen, die aus der Endlichkeit der Ressource resultiert. Daher können aus der Untersuchung Rückschlüsse auf die Verbreitung von Biokraftstoffen gezogen werden. Jedoch hat die Untersuchung keine Aussagekraft für die Diffusion reproduzierbarer Güter, die andere reproduzierbare Güter ablösen sollen.

In Abschnitt 2.3 werden die Einflussfaktoren der Diffusion von Biokraftstoffen mittels eines objektbasierten Ansatzes kategorisiert und systematisiert. Das hier verwendete neoklassische Diffusionsmodell eignet sich insbesondere, um die den Diffusionsobjekten Hersteller und Rahmenbedingungen zugeordneten Diffusionsfaktoren hinsichtlich ihrer Wirkungsweise zu untersuchen. Hervorzuheben sind an dieser Stelle insbesondere vier Faktoren, die den Zeitpunkt des Markteintritts der Innovation sowie den darauf folgenden Diffusionsverlauf bestimmen: die Grenzkosten der Produktion des erneuerbaren Substituts, dessen technologischer Fortschritt, die Extraktionskosten der erschöpfbaren Ressource und vor allem die Marktstruktur auf der Seite des Angebots. Weitere Faktoren, wie beispielsweise der Marktzens, sind für das Untersuchungsziel von eher untergeordneter Bedeutung ist wurden daher fast vollständig vernachlässigt. Hingegen eignet sich dieses neoklassische Diffusionsmodell wenig, um die produkt- und adopterspezifische Diffusionsfaktoren zu analysieren. Die folgenden Kapitel widmen sich diesen Diffusionsobjekten.

Die Einzelergebnisse zur Marktstruktur und den anderen Diffusionsfaktoren werden ausführlich in den jeweiligen Abschnitten diskutiert. Daher soll an dieser Stelle der Fokus auf das übergeordnete Marktverhalten gelegt werden. Das Marktverhalten unterscheidet sich in seinem wesentlichen Prinzip in den verschiedenen Marktstrukturen nicht. Gemein ist allen Marktstrukturen, dass die Existenz und später die Marktpräsenz eines erneuerbaren Substituts in die Preisbildung der erschöpfbaren Ressource einfließen. Diese scheinbare Banalität wird

dann tatsächlich interessant, wenn man sich vergegenwärtigt, dass dies auch für die wettbewerbliche Extraktion der erschöpfbaren Ressource und damit für die wettbewerbliche Preisbildung am Markt gilt. Bei vollkommenem Wettbewerb wird üblicherweise unterstellt, dass sich die Unternehmen als Preisnehmer verhalten. Einzelne Mengenanpassungen haben keine Auswirkungen auf den Marktpreis. Hier jedoch handelt es sich nicht um eine direkte Reaktion auf das erneuerbare Substitut. Dieses muss noch gar nicht auf dem Markt sein, um eine Änderung der Extraktionsmengen und damit eine Änderung des Marktpreises zu bewirken. Die bloße Existenz einer Backstop-Technologie genügt hierfür. Vielmehr verkürzt eine Backstop-Technologie üblicherweise den Planungshorizont der Ressourcen extrahierenden Unternehmen. Hierdurch muss beispielsweise im vollkommenen Wettbewerb die Extraktionsmenge erhöht werden, soll die Ressource am Ende des Planungszeitraumes erschöpft sein. Dadurch bewirkt eine Backstop-Technologie indirekt eine Preisänderung auf dem betrachteten Markt.

So verwundert es nicht, dass umgekehrt die Preissetzung des erneuerbaren Substituts völlig unabhängig von der Existenz einer erschöpfbaren Ressource ist. Das Substitut ist annahmefähig reproduzierbar und unterliegt daher in seiner Herstellung keiner zeitlichen oder mengenmäßigen Beschränkung. Sein Preis bildet sich nach der zeitunabhängigen Gleichgewichtsregel, bei der beispielsweise im Wettbewerb der Produktpreis dessen Grenzkosten bei der Herstellung entsprechen muss. Wäre das Substitut jedoch ebenso wie die abzulösende Ressource erschöpfbar, dann wäre auch hier mit einer indirekten Reaktion des Preises auf die Existenz der anderen erschöpfbaren Ressource zu rechnen.

Die im neoklassischen Diffusionsmodell beschriebenen und analysierten Anpassungsprozesse bezüglich Extraktionsmengen und Marktpreisen sind jedoch eher langfristiger Natur. Im Kraftstoffmarkt hingegen zu beobachten sind kurzfristige Reaktionen. Ähnlich wie die Preisbildung von Kohle und Erdgas orientiert sich auch der Tankstellenpreis von Biodiesel am Preis für mineralischen Dieselkraftstoff. Diese sind jedoch das Ergebnis unzureichenden Wettbewerbs, welcher die strategische Preissetzung ermöglicht.

Die genauere Analyse der Preisbildung von Biodiesel wird Gegenstand der folgenden Kapitel sein. Nach der detaillierten Untersuchung des Ablaufs der Diffusion eines erneuerbaren Substituts werden die folgenden Kapitel die Diffusion von Biokraftstoffen in der Realität untersuchen. Dabei wird der Fokus auf den beiden Ländern Deutschland und Brasilien liegen, mit den jeweils vorherrschenden Biokraftstoffen Biodiesel und Bioethanol. Zunächst gilt es für eine solche Untersuchung jedoch die Grundlage zu schaffen. Im folgenden Kapitel wird daher untersucht, inwiefern Biokraftstoffe tatsächlich als Substitut für mineralische Kraftstoffe dienen können.

## **4 BIOKRAFTSTOFFE ALS ALTERNATIVE ZU FOSSILEN KRAFTSTOFFEN**

In der aktuellen Diskussion um Biokraftstoffe gehen die Meinungen darüber weit auseinander, wie groß ihr Beitrag zum Klimaschutz sein kann oder ob der Einsatz von Biokraftstoffen nicht vielmehr zu einer erhöhten Treibhausgasbilanz führt. Besonders heftig wird diese Kontroverse deshalb ausgetragen, weil die Vielzahl verschiedener Rohstoffe für die Produktion von Biokraftstoffen, die regional unterschiedlichen Anbaubedingungen und Anbauarten sowie eine Vielzahl weiterer Faktoren dazu führen, dass das entstehende Bild von Biokraftstoffen zwangsweise heterogen sein muss. Entsprechend lässt sich diesem breiten Spektrum eine Fülle verschiedenster Argumente pro oder contra Biokraftstoffe entnehmen. Ähnliche Diskussionen werden auch hinsichtlich der Ressourcen schonenden Wirkung von Biokraftstoffen, der Schaffung und Sicherung von Arbeitsplätzen in der Biokraftstoffindustrie und Landwirtschaft oder auch der Bekämpfung der Abhängigkeit der deutschen und europäischen Wirtschaft von Energielieferungen aus dem Ausland geführt. Besonders hitzig wird die Konkurrenz mit dem Anbau von Lebensmitteln diskutiert.

Inwiefern der Einsatz von Biokraftstoffen tatsächlich zu solchen Hoffnungen oder Sorgen berechtigt, hängt maßgeblich von den spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Biokraftstoffarten ab: von ihrem spezifischen Potential zur Vermeidung von Treibhausgasen, ihren Herstellkosten und dem angenommenen technologischen Fortschritt sowie dem geschätzten Umfang, in welchem Biokraftstoffe fossile Kraftstoffe substituieren können. Um zu einer fundierten Bewertung der Perspektive von Biokraftstoffen zum Einsatz im gewerblichen und privaten Transport zu gelangen sowie zum besseren Verständnis der Biokraftstoffmärkte ist es daher hilfreich, zunächst die grundsätzlichen Charakteristika von Biokraftstoffen zu analysieren. Die Untersuchung konzentriert sich im Wesentlichen auf die Rohstoffbasis für die verschiedenen Arten von Biokraftstoffen sowie die jeweiligen Herstellungsprozesse. Dabei wird einerseits zwischen Biokraftstoffen der ersten und zweiten Generation unterschieden, zum anderen zwischen den länderspezifischen Biokraftstoffarten. Die Situation in Deutschland und der EU wird einem Vergleich mit den brasilianischen Gegebenheiten unterzogen. Das südamerikanische Land gilt international als Vorreiter der Einführung und Förderung von Biokraftstoffen.

Mit besonderer Aufmerksamkeit widmet sich dieses Kapitel der Ermittlung der Herstellkosten von Biodiesel. Anhand dieses Biokraftstoffs wird exemplarisch aufgezeigt, welchen Schwankungen die Herstellkosten und damit die Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen unterliegen. Die Bestimmungsfaktoren für die Herstellkosten werden analysiert und gehen in die Berechnung der Herstellkosten für Biodiesel ein. Auf diese Weise können die Herstellkosten für Biodiesel im Zeitverlauf dargestellt werden.

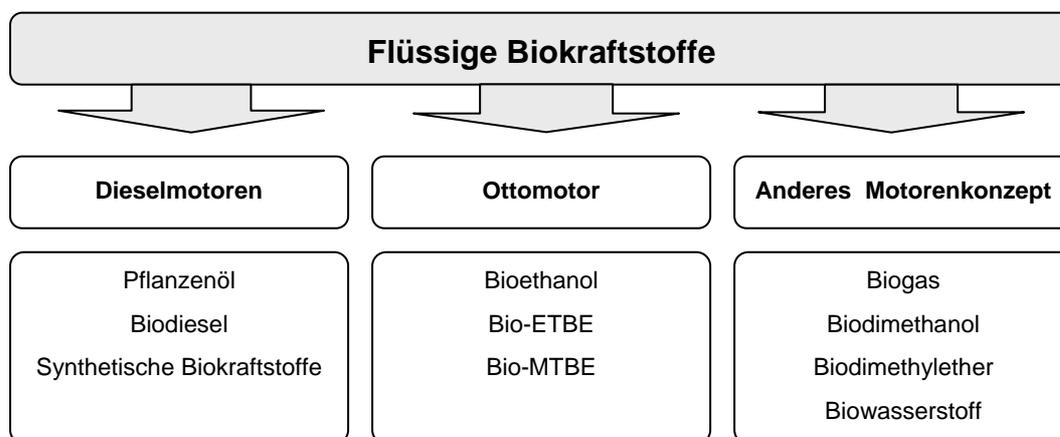
Zur besseren Einordnung der analysierten Biokraftstoffarten Bioethanol, Biodiesel und Biokraftstoffen der nächsten Generation wird zuvor jedoch die Biokraftstofflandschaft überblicksartig dargestellt.

Im Anschluss bedarf es zur Beurteilung der Qualität von Biokraftstoffen als Substitut für mineralische Kraftstoffe einer weiterführenden Analyse hinsichtlich ihrer Produkteigenschaften. Die produktbezogenen Diffusionsfaktoren relativer Vorteil, Kompatibilität, Komplexität sowie Erprobbarkeit und Beobachtbarkeit sind entscheidend für die Diffusion von Biokraftstoffen. Untersucht wird, inwiefern hier Diffusionshemmnisse bestehen. Damit bildet dieses Kapitel die Grundlage für die später durchzuführende Analyse staatlicher Eingriffsmöglichkeiten zum Abbau von Diffusionshemmnissen.

## 4.1 Überblick

Grundsätzlich bedeutet der Begriff Biokraftstoff, dass er im Unterschied zu konventionellen Kraftstoffen biogenen Ursprungs ist. Damit zählen Biokraftstoffe zu den erneuerbaren Energieträgern, die theoretisch bei entsprechenden klimatischen und technischen Voraussetzungen endlos verfügbar sind (HENNIGES 2007: 11). Biokraftstoffe werden auf Basis von Biomasse hergestellt. Die verschiedenen Primärenergieträger der Biomasse können durch thermochemische, physikalisch-chemische oder biochemische Umwandlung zu festen, flüssigen oder gasförmigen Sekundärenergieträgern weiterverarbeitet werden (KALTSCHMITT/HARTMANN 2001: 93). Die folgende Übersicht zeigt das Spektrum der verschiedenen flüssigen Biokraftstoffarten, die als solche durch die EU Richtlinie zur Förderung von Biokraftstoffen anerkannt sind.

**Abbildung 4.1** Klassifikation von flüssigen Biokraftstoffen



Quelle: EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003b: Art. 1, Abs. 2)

Flüssigen Biokraftstoffen wird zumindest mittelfristig das höchste Erfolgspotential am Markt zugesprochen, weil unter anderem die Integration in die vorhandene Infrastruktur konventioneller Kraftstoffe bequem gelingt. Mit Biodiesel und Bioethanol lassen sich auch die bestehenden Antriebstechnologien nutzen, wenngleich insbesondere bei Einsatz von Reinkraftstoff Anpassungen vorgenommen werden müssen. Einen Sonderfall der flüssigen Biokraftstoffe bildet hierbei Wasserstoff aus Biomasse, der mit fossiler Energie erzeugten Wasserstoff in Brennstoffzellen ersetzen kann. Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 zeigen für die Verwendung von Biokraftstoffen in konventionellen Antriebstechnologien, die Herkunft der Biokraftstoffarten sowie ihren Anteil am Gesamtmarkt für Kraftstoffe und den verschiedenen Teilmärkten.

**Tabelle 4.1** Biokraftstoffe für Dieselmotoren: Herkunft und Marktanteile 2005 und 2007

Biokraftstoff	Herkunft	Marktanteil in Deutschland					
		Biokraftstoffmarkt		Dieselmarkt		Gesamtmarkt	
		2005	2007	2005	2007	2005	2007
Pflanzenölmethylester (Biodiesel)	Ölhaltige Pflanzen oder tierische Fette	81,01%	72,00%	6,26%	10,44%	3,43%	6,25%
BtL (Biomass-to-Liquid)	Biomasse	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
Pflanzenöl	Ölhaltige Pflanzen	8,82%	18,00%	<1%	2,61%	<1%	1,56%

Quelle: Eigene Berechnung nach F.O. LICHT (2008: 42), SCHMITZ (2006a: 83) und FNR (2008d)

**Tabelle 4.2** Biokraftstoffe für Ottomotoren: Herkunft und Marktanteile 2005 und 2007

Biokraftstoff	Herkunft	Marktanteil in Deutschland					
		Biokraftstoffmarkt		Benzinmarkt		Gesamtmarkt	
		2005	2007	2005	2007	2005	2007
Bioethanol	Stärke- oder zuckerhaltige Pflanzen	10,17%	9,99%	<1%	2,16%	<1%	<1%
ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether) aus Bioethanol	Stärke- oder zuckerhaltige Pflanzen über Bioethanol	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
BtL (Biomass-to-Liquid)	Biomasse	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
Biomethanol	Biomasse über Synthesegas	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
Biogas	Biomasse	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
DME (Dimethylether) aus Biomasse	Biomasse über Bio- und Synthesegas	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%

Quelle: Eigene Berechnung nach SCHMITZ (2006a: 83) und FNR (2008d)

Der Anteil von Biokraftstoffen am Gesamtmarkt ist wie Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 zeigen noch gering. Während Bioethanol in Brasilien rund die Hälfte des Kraftstoffverbrauchs deckt, beträgt der Anteil aller Biokraftstoffe am Gesamtmarkt in Deutschland noch unter 10%. Dabei kommen nur Biodiesel, Pflanzenöl und Bioethanol signifikante Anteile zu. Andere Biokraftstoffarten, insbesondere BtL-Kraftstoffe, werden noch nicht kommerziell hergestellt.

Innerhalb des deutschen Biokraftstoffmarkts nehmen die Biokraftstoffe zur Verwendung in Dieselmotoren eine beherrschende Stellung ein. Zusammen mit dem eng verwandten Pflanzenöl kommt Biodiesel auf einen Anteil von rund 90% am Biokraftstoffmarkt. Biokraftstoffe zur Verwendung in Ottomotoren haben entsprechend einen Anteil von rund 10% am Biokraftstoffmarkt. Dieses Verhältnis lässt sich insbesondere darauf zurückführen, dass Biodiesel und Pflanzenöl mit deutlich geringeren Anpassungsmaßnahmen als Reinkraftstoff genutzt werden können, als dies bei Bioethanol der Fall ist. Bei Bioethanol beschränkt sich die Absatzmenge im Wesentlichen auf die Beimischung zu Benzin nach der Verwendungsquote, während Biodiesel auch als Reinkraftstoff an Tankstellen abgesetzt wird.

Die Aufteilung des Biokraftstoffmarktes in die Verwendung für Dieselmotoren und Ottomotoren hat sich zwischen 2005 und 2007 nicht signifikant geändert. Einzig das Verhältnis zwischen Biodiesel und Pflanzenöl hat sich zugunsten von letzterem verschoben. Jedoch ist der Biokraftstoffmarkt deutlich gewachsen. Wenngleich sein Anteil 2007 noch unter 10% des Gesamtmarktes liegt, so ist dies doch eine deutliche Steigerung zu 2005. In diesem Jahr lag der Anteil von Biokraftstoffen noch unter 5% des Gesamtkraftstoffaufkommens. Der Biokraftstoffmarkt ist ein junger Markt mit dem entsprechend geringen Marktanteil, jedoch mit einem hohen Wachstumspotential. Gerade dies macht die Entwicklung und Verbreitung von Biokraftstoffen zu einem spannenden Thema von höchster Aktualität.

Anders als die Kategorisierung nach Motorenkonzept können Biokraftstoffe auch anhand der verwendeten Pflanzenbestandteile kategorisiert werden. Man unterscheidet Biokraftstoffe der ersten und Biokraftstoffe der zweiten Generation. Zur Herstellung der bereits verfügbaren Biokraftstoffe der ersten Generation werden aus verschiedenen Energiepflanzen gewonnener Zucker, Stärke oder Öl verwendet. Die hierbei eingesetzten Verfahren gelten gemeinhin als ausgereift und lassen künftige Effizienzsteigerungen in nur geringem Umfang erwarten. Demgegenüber werden Biokraftstoffe der zweiten Generation aus Zellbestandteilen jeglicher Biomasse gewonnen. Dies ist besonders attraktiv, weil auf diese Weise fossile Kraftstoffe durch solche biogenen Reststoffe ersetzt werden können, die ansonsten typischerweise entsorgt werden müssten. Gleichzeitig werden keine Anbauflächen beansprucht. Biokraftstoffe der zweiten Generation werden aufgrund ihrer derzeit noch vergleichsweise hohen Herstellkosten jedoch erst mittelfristig eine Rolle auf dem Kraftstoffmarkt spielen.

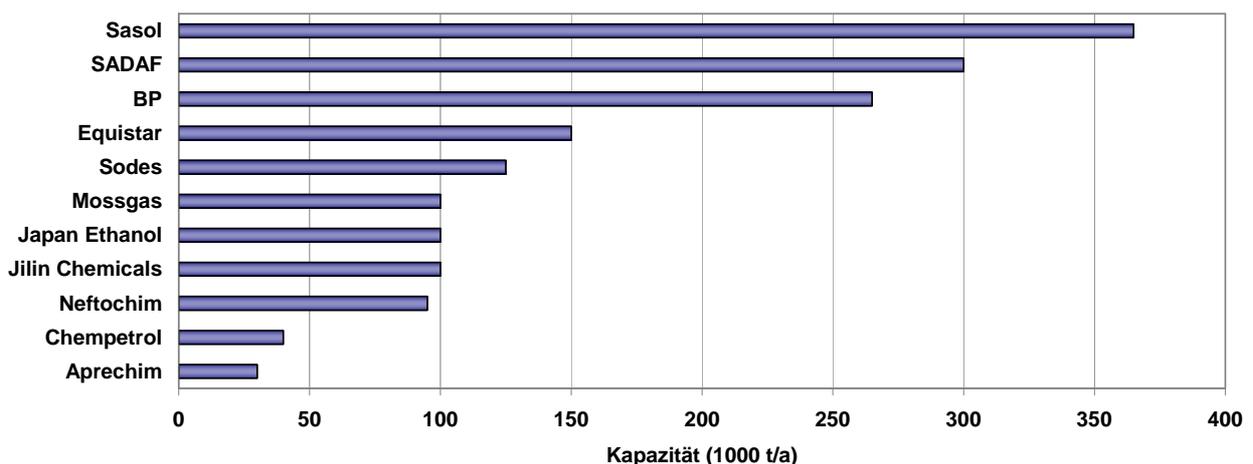
## 4.2 Rohstoffe und Herstellung ausgewählter Biokraftstoffe

### 4.2.1 Bioethanol

Bioethanol hat unter den Biokraftstoffen die längste Tradition im Kraftstoffsektor. Der amerikanische Erfinder Samuel MORREY verwendete bereits 1820 in seinem ersten Verbrennungsmotor ein Gemisch aus biogenem Alkohol und Terpentin, die ersten Ottomotoren Ende des 19. Jahrhunderts wurden mit biogenem Alkohol als Kraftstoff betrieben (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 3ff). Die Verwendung von Alkohol als Biokraftstoff ist jedoch nur eine unter zahlreichen Verwendungszwecken von Alkohol und so existieren innerhalb des Alkoholmarktes vielfältige Verflechtungen zwischen den einzelnen Nutzungszielen. Um dieser Komplexität gerecht zu werden und zum besseren Verständnis des Biokraftstoffmarktes wird daher zunächst der Grundstoff Ethanol näher charakterisiert, bevor schließlich der Kraftstoff Bioethanol detailliert beschrieben wird.

Ethanol lässt sich anhand drei verschiedener Kriterien kategorisieren. Als erstes Kriterium bietet sich die Rohstoffbasis für die Gewinnung von Ethanol an. Die weltweit produzierten Mengen an Ethanol werden nahezu vollständig aus biogenem Material hergestellt. Der Marktanteil synthetischen Ethanols auf Basis von Petrochemikalien, wie beispielsweise dem Ölderivat Ethen, beträgt derzeit weltweit lediglich ca. 7% (GREENER INDUSTRY 2008). Während der Markt für biogenes Ethanol von wettbewerblichen Strukturen geprägt ist, weist der Markt für synthetisches Ethanol auf Anbieterseite wie die folgende Abbildung zeigt tendenziell oligopolistische Strukturen auf. Die größten Produktionskapazitäten gibt es in Großbritannien.

Abbildung 4.2 Die größten Hersteller von synthetischem Ethanol



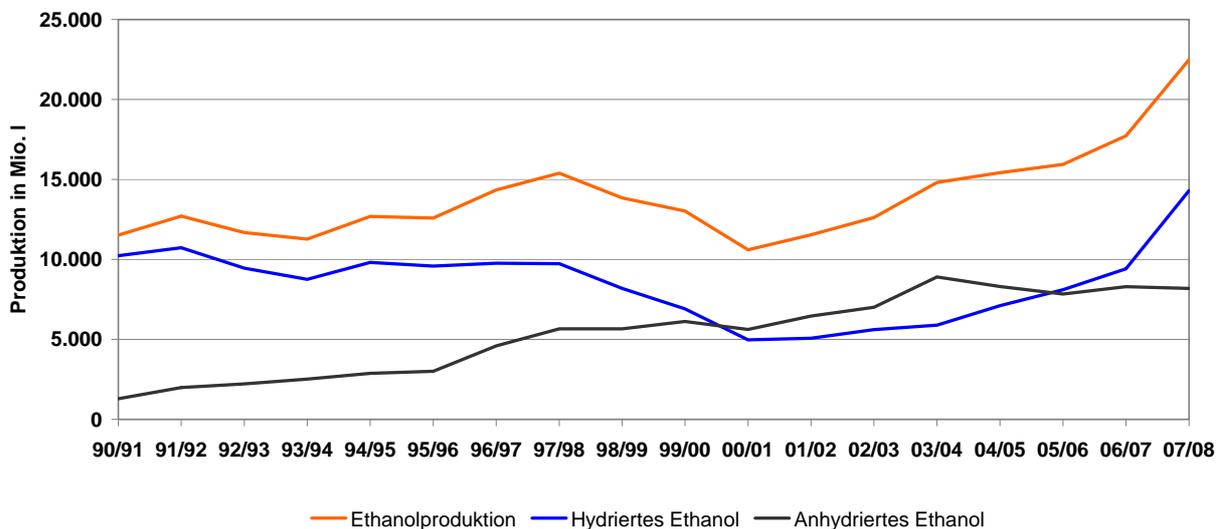
Quelle: BERG (2005: 4)

Chemisch gesehen lässt sich jedoch nicht zwischen synthetischem Ethanol und Ethanol biogenen Ursprungs unterscheiden. In beiden Fällen ist die chemische Zusammensetzung  $C_2H_5OH$ . Der Unterschied liegt vielmehr im isotopischen Aufbau des Kohlenstoffatoms. Ähn-

lich der Vorgehensweise bei der Altersbestimmung archäologischer Fundstücke, kann durch die Methode auch bestimmt werden, ob dem vorliegenden Alkohol ein fossiler Ausgangsstoff oder die wesentlich jüngeren biogenen Ressourcen zugrunde liegen (TAMERS 2006).

Zum zweiten lässt sich Ethanol dahingehend kategorisieren, wie hoch der jeweilige Wasseranteil ist. In der üblicherweise vorliegenden Reinheit von 95% und dem verbleibenden Wasseranteil von 5% spricht man von wasserhaltigem bzw. hydriertem Ethanol. Als Beimischung zu Ottokraftstoff besteht bei wasserhaltigem Ethanol die Gefahr, dass sich das Wasser im Gemisch absetzen könnte. In der Regel findet daher das sog. reine oder anhydrierte Ethanol mit einer Reinheit von bis zu 99,95% Anwendung als Beimischung zu fossilem Benzin. Um diese letzten Spuren von Wasser abzubauen, ist jedoch ein kostspieliger Absorptionsprozess mittels Molekularsieb nötig. BREWSTER (2007b: 3) schätzt die Herstellkosten wasserhaltigen Ethanols als bis zu 20% geringer ein als die reinen Ethanols. Je höher der Ethanolanteil des Kraftstoffgemischs ist, desto geringer fallen die technischen Unterschiede zwischen wasserhaltigem und reinem Ethanol aus. Als Reinkraftstoff schließlich lassen sich nur noch unwesentliche Unterschiede feststellen (BREWSTER 2007a: 17f). So ist es wenig verwunderlich, dass in Ländern mit einem hohen Anteil von Ethanol als Reinkraftstoff wasserhaltiges Ethanol eine dominierende Rolle spielt. Abbildung 4.3 zeigt dies für Brasilien. Hydriertes Ethanol hat hier insbesondere in den letzten Jahren wieder an Bedeutung gewonnen.

**Abbildung 4.3** Produktion von Kraftstoffbioethanol in Brasilien



Quelle: Eigene Darstellung nach ÚNICA (2009a)

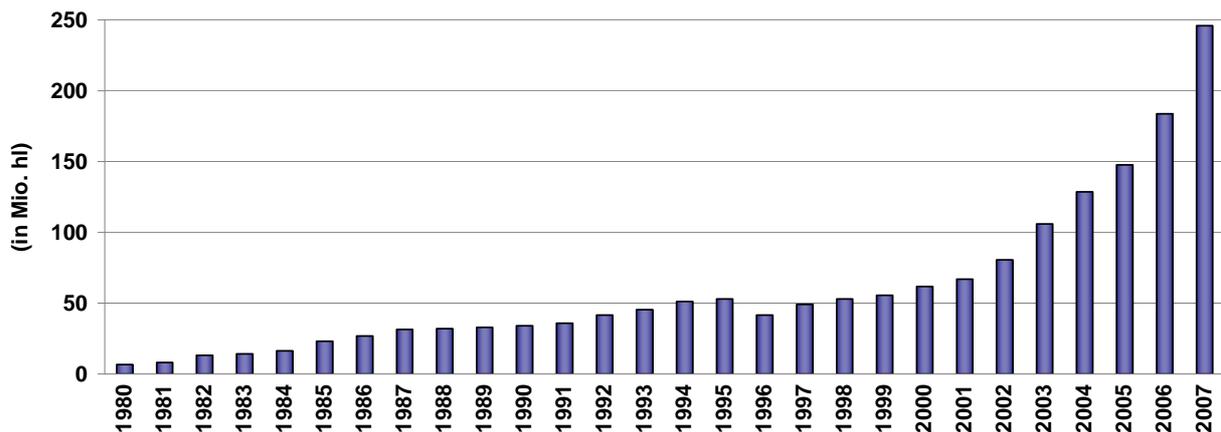
Drittens lässt sich Ethanol schließlich hinsichtlich des Verwendungszwecks unterscheiden. Traditionell wird Ethanol in der Nahrungsmittelindustrie eingesetzt. Zur Gewinnung von Spirituosen wird der Alkoholgehalt auf Trinkstärke herabgesetzt und gegebenenfalls Aroma- und Geschmacksstoffe zugegeben. Daneben wird Ethanol im Lebensmittelbereich zu großen Tei-

len auch zur Herstellung von Essig verwendet. Bei der Verwendung von Ethanol im Nahrungsmittelsektor gelten strenge Qualitätsanforderungen. Unter anderem wird eine hohe organoleptische Reinheit (SCHMITZ 2003: 129) vorausgesetzt. Die Verwendung von synthetischem Ethanol ist in der EU sowie in nahezu allen Industrieländern untersagt. Weltweit betrachtet ist dieser Sektor inzwischen aber der kleinste Nachfrager. 2001 wurden lediglich 13% des weltweit produzierten Ethanols zur Herstellung von Nahrungsmitteln verwendet. Auch für die Zukunft wird mit einer gleichbleibenden oder leicht sinkenden absoluten Nachfrage gerechnet, da durch das veränderte Konsumverhalten die Nachfrage nach Spirituosen stagniert bzw. leicht sinkt (POHLMANN 2000: 365). Ein etwas größerer Anteil mit rund einem Fünftel der weltweiten Ethanolerzeugung wird industriell eingesetzt, beispielsweise als Lösungsmittel für Farben und Lacke oder für pharmazeutische Produkte. Synthetisches Ethanol findet derzeit fast ausschließlich in diesem Bereich Anwendung. Der global bedeutendste Nachfrager nach Ethanol ist jedoch der Kraftstoffsektor. Als Kraftstoff käme prinzipiell sowohl biogenes als auch synthetisches Ethanol in Frage. In diesem Fall wäre der Begriff Biokraftstoff aber sicherlich irreführend. Unter Kraftstoffbioethanol versteht man daher ausschließlich biogenes Ethanol. Die weltweite Produktion von Kraftstoffbioethanol hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Das Produktionsvolumen lag im Jahr 2005 noch bei rund 450 Mio. hl (F.O. LICHT 2006: 395) und stieg bis 2007 auf knapp 500 Mio. hl. Entsprechend stieg auch der Anteil von Kraftstoffbioethanol auf mittlerweile 65% der globalen Produktionsmenge von Alkohol (RFA 2009a, b).

Auf den deutschen Kraftstoffethanolmarkt entfällt davon nur ein kleiner Teil (FNR 2008d). Eine Besonderheit des deutschen Ethanolmarktes im internationalen Vergleich ist jedoch der dabei relativ hohe Anteil von synthetischem Ethanol zur industriellen Verwendung. Mit rund zwei Dritteln liegt dieser Anteil deutlich höher als im internationalen Vergleich. Einerseits ist dies auf die in Deutschland starke Chemische Industrie zurückzuführen, andererseits kann dies auch als Hinweis darauf gewertet werden, dass Deutschland und auch Europa bei der Produktion von Kraftstoffbioethanol wie oben gezeigt global eine eher unbedeutende Rolle einnehmen.

Produziert und eingesetzt wird Kraftstoffbioethanol vorwiegend auf dem amerikanischen Kontinent. Insbesondere die USA lassen dem Aufbau neuer Bioethanolanlagen seit einiger Zeit verstärkt Förderung zukommen. Der damals amtierende Präsident George W. Bush unterzeichnete im August 2005 den sog. „Energy Policy Act“. Das Gesetz soll den Ausbau von erneuerbaren flüssigen Energieträgern fördern. Als Folge dieser Maßnahmen haben die USA im Jahr 2006 Brasilien als weltweit größten Produzenten von Biokraftstoffen abgelöst. Das gelang den USA innerhalb weniger Jahre. Wie Abbildung 4.4 zeigt, konnte die Ethanolproduktion in den vergangenen 10 Jahren fast verfünffacht werden.

**Abbildung 4.4** Ethanolproduktion in den USA



Quelle: Eigene Darstellung nach RFA (2009c)

### **ZUCKER- UND STÄRKEHALTIGE PFLANZEN ALS ROHSTOFFBASIS FÜR BIOETHANOL**

Wie herkömmlicher Alkohol wird auch Bioethanol durch den Prozess der alkoholischen Gärung aus Zucker gewonnen. Für die Herstellung von Bioethanol aus nachwachsenden Rohstoffen eignen sich damit grundsätzlich alle zucker- und stärkehaltigen Feldfrüchte, jedoch spielen zuckerhaltige Rohstoffe global betrachtet die dominierende Rolle bei der Ethanolherzeugung<sup>16</sup>. Abhängig von den regionalen Anbaubedingungen eignen sich unterschiedliche Energiepflanzen für die Produktion von Bioethanol. In Brasilien als einem der weltweit größten Herstellern bzw. Exporteuren von Bioethanol wird vor allem Zuckerrohr als Rohstoff für den Produktionsprozess eingesetzt. In Deutschland hingegen ist die Zuckerrübe der wichtigste Zuckerlieferant, während Getreide den wichtigsten Rohstoffträger für Stärke darstellt. Die Wahl der Energiepflanze wiederum impliziert eine unterschiedlich profitable Bioethanolproduktion in verschiedenen Regionen.

Im Folgenden wird die Rohstoffbasis für die Bioethanolproduktion in Deutschland und Europa einerseits und Brasilien andererseits dargestellt. Das Ziel dieser länderspezifischen Darstellung ist zum einen die Charakterisierung der Zusammensetzung der Ethanolproduktion in den ausgewählten Ländern und die jeweiligen Implikationen für die Kosten der Bioethanolproduktion. Zum anderen erfolgt insbesondere die Abschätzung des künftigen Produktionspotentials von Bioethanol auf Basis der Produktionskapazitäten der jeweils in Frage kommenden Rohstoffe.

Das für Bioethanol verfügbare Produktionspotential wird dabei einerseits durch die Bedarfsdeckung der Nahrungsmittelnachfrage der Bevölkerung eingeschränkt, der absoluten Vorrang gegeben werden muss. Andererseits existieren für Agrarrohstoffe auch andere und mögli-

<sup>16</sup> Daneben existieren auch Verfahren zur Gewinnung von Bioethanol aus den Zellulosebestandteilen von Pflanzen. Damit wäre die Produktion von Bioethanol nicht länger an die Pflanzenfrucht gekoppelt, sondern könnte vielmehr unabhängig von der Art der Pflanze stattfinden. Der Produktionsprozess ist jedoch auf absehbare Zeit noch nicht wirtschaftlich und wird daher im Folgenden nicht betrachtet.

cherweise lukrativere Absatzmöglichkeiten, die naturgemäß ebenfalls Vorrang haben (ZEDDIES 2006b: 15f). Diese Annahmen implizieren, dass die betrachteten Länder prinzipiell ihren Selbstversorgungsgrad bei Nahrungsmitteln beibehalten und auch gleichzeitig attraktive Exportchancen, beispielsweise bei Wein, nicht in Bioethanolpotential umgewandelt werden. Dies gilt in gleicher Weise für die Produktion von Biodiesel in Abschnitt 4.2.2. Demnach stehen als Potential für Bioenergieträger zur Verfügung:

- Brach liegende Flächen im Rahmen der obligatorischen Flächenstilllegung.
- Strukturelle Überschüsse, die bisher im Rahmen der Marktordnung für Intervention und/oder subventionierten Export erzeugt wurden.

Während strukturelle Überschüsse in der Regel präzise den verschiedenen Biokraftstoffen und Bioenergiearten zugeordnet werden können, besteht hinsichtlich der Brachflächen eine gewisse Konkurrenzsituation zwischen Bioethanol, Biodiesel und anderen Energiepflanzen. Methodisch unterstellen die gängigen Studien wie ZEDDIES (2006a, b) oder LAMPE (2006) diesbezüglich die Nutzung der Brachflächen in dem Anbaumix, der jeweils als Fruchtfolge praktiziert wird.

Zunächst wird nun die Rohstoffbasis in Deutschland und der Europäischen Union näher beleuchtet. Zuckerrüben finden fast ausschließlich in der Europäischen Union Verwendung als Grundstoff für die Bioethanolproduktion. In den gemäßigten Klimazonen erbringt die Zuckerrübe auf die Fläche bezogen die höchste Leistung aller Nutzpflanzen bei der Umwandlung von Sonnenenergie in Biomasse. Das ist auf ihre Fähigkeit zur intensiven Photosynthese auch bei relativ niedrigen Temperaturen zurückzuführen. Die Kombination aus Ertrag und Zuckergehalt macht Zuckerrüben in Deutschland zum bevorzugten Zuckerlieferanten. Analog dazu zielt der Getreideanbau zur Ethanolherzeugung auf einen möglichst hohen Stärkegehalt ab. In Deutschland nimmt Getreide mit rund sieben Mio. ha rund drei Fünftel der gesamten Ackerfläche ein. Die gesamte Getreideproduktion verharnte in Deutschland in den letzten Jahren auf gut 40 Mio. t, von denen netto etwas mehr als 8 Mio. t exportiert wurden. Dabei verbleiben Getreideexporte der europäischen Länder traditionell innerhalb der EU Grenzen, so dass der Exportüberschuss der EU-25 seit 2000 jährlich lediglich rund 13 Mio. t Getreide betrug. Dieses Volumen steht potentiell zur Produktion von Kraftstoffbioethanol zur Verfügung.

In Deutschland und der EU-25 ist mit einer starken Zunahme des Bioenergiepotentials zu rechnen. Die Felderträge werden in allen Ländern in der Größenordnung um 1,5% pro Jahr wachsen und insbesondere bei den potentiellen Energiepflanzen werden tendenziell noch höhere Zuwachsraten erwartet. Bei gleichzeitiger Stagnation des Bevölkerungswachstums sowie einem recht konstanten pro Kopf Verbrauch ergibt sich im Saldo für Deutschland ein Flächenpotential von gut 1,1 Mio. ha bis 2010 und 3,05 Mio. ha bis 2020 (THRÄHN et al. 2006: 43, KAVALOV 2004: 13ff). Für das Jahr 2010 ständen bei unterstelltem konstanten Energiemix

dadurch theoretisch ca. 14 Mio. t Getreide und ca. 6,5 Mio. t Zuckerrüben für die Bioethanolherstellung zur Verfügung (ZEDDIES 2006b: 17f, BOCKEY 2006: 5 ).

**Tabelle 4.3** Bioethanolpotential in Deutschland und EU-25

		Deutschland			EU-25		
		2005	2010	2020	2005	2010	2020
Verbrauch Benzin	Mio. t	23,40	20,50	15,60	124,80	113,60	98,00
Bioethanolpotential aus							
Getreide	Mio. t	-	3,79	8,80	-	23,24	55,17
Zuckerrüben	Mio. t	-	0,54	1,05	-	1,70	4,47
gesamt	Mio. l	6,05	54,56	124,11	12,98	314,24	751,46
Möglicher Anteil an Benzin	%	< 1%	15,85	45,10	< 1%	15,43	41,80

Quelle: ZEDDIES (2006b: 22)

Daraus ergeben sich knapp 55 Mio. l potentielle zusätzliche Bioethanolproduktion gegenüber dem Jahr 2005. Addiert man die derzeitige Produktion von 6 Mio. l Bioethanol dazu, dann könnten im Jahr 2010 rund 15% des Ottokraftstoffs durch Bioethanol energetisch substituiert werden. Tabelle 4.3 zeigt, dass dieser Anteil bis zum Jahr 2020 auf 45% steigt, wenn sich bei Nutzung aller verfügbaren Ressourcen der in den letzten Jahren zu beobachtende sinkende Verbrauch an Ottokraftstoff weiterhin fortsetzt.

Diese Berechnung zeigt jedoch lediglich dass in Deutschland und EU-25 vorhandene Bioethanolpotential bis 2020 und macht keine Aussage darüber, ob es ökonomisch sinnvoll ist, dieses auch für die Produktion von Bioethanol zu nutzen oder durch Importe einen noch höheren Biokraftstoffanteil zu erreichen. Essentiell für die Beantwortung dieser Frage sind die heimischen Herstellkosten, die später diskutiert werden.

In Brasilien hingegen wird Bioethanol fast ausschließlich aus Zuckerrohr gewonnen. Als Brasilien in den 1970er Jahren das Proálcool Programm ins Leben gerufen wurde, lag die durchschnittliche Jahresproduktion von Ethanol bei rund 30 Mio. hl. Dabei konnten in den letzten 30 Jahren rasante Produktionssteigerungen erreicht werden. Der größte Teil der Produktion fällt dabei auf Kraftstoffbioethanol, welches mittlerweile auch zu einem wichtigen Exportgut für Brasilien geworden ist. Seit 2000 hat sich das Exportvolumen etwa um den Faktor 15 erhöht (ÚNICA 2008a).

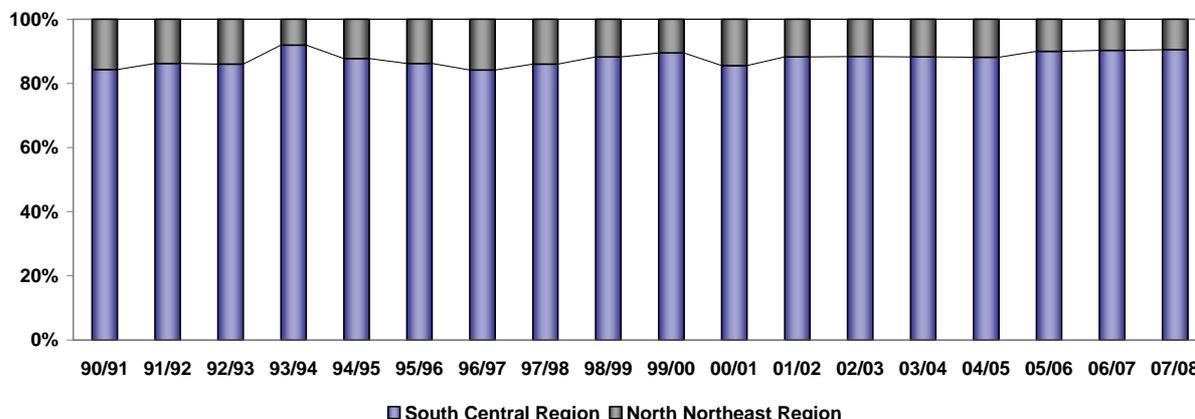
**Tabelle 4.4** Bioethanolproduktion in Brasilien

	Einheit	1975	1990	1995	2000	2005	2007
Ethanolproduktion	Mio. hl	30,08	115,15	126,82	130,22	159,47	224,97
Exporte	Mio. hl	-	-	-	2,27	26,01	35,30
Exportanteil	%	-	-	-	1,74%	16,31%	15,69%

Quelle: Berechnung und Darstellung nach ÚNICA (2008a, 2009a)

Seit 1975 konnten in Brasilien deutliche Ertragssteigerungen erzielt werden. Diese gehen nur zu einem geringen Teil auf die Ausweitung der Anbauflächen zurück. Vielmehr konnten durch die Nutzung von Biotechnologie die Flächenproduktivität erhöht und die Erträge jährlich um gut 3,8% gesteigert werden. Durch intensive Forschung und Züchtung sind die heute angebaute Zuckerrohrsorten nicht nur leistungsfähiger und resistenter gegenüber Schädlingen und Krankheiten, sondern erlauben auch eine längere Anbauzeit. Während Mitte der 1970er Jahre die Anbauzeit noch auf etwa 150 Tage im Jahr beschränkt war, kann Zuckerrohr heute an 220 Tagen angebaut werden. Auch in jüngerer Zeit konnten hierbei noch enorme Fortschritte erzielt werden. Allein 20 der in den letzten zehn Jahren gewonnenen neuen Züchtungen dominieren mit einem Anteil von 70% die Zuckerrohrproduktion des Landes (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 40, KALTNER 2005). Insgesamt sind heute über 500 verschiedene Zuckerrohrsorten bekannt, im Vergleich dazu waren 1970 lediglich zehn Sorten in Brasilien erhältlich. Biokraftstoffe werden insbesondere im südlichen Zentralbrasilien angebaut. Der Beitrag des nördlichen Brasiliens ist dabei mit unter 15% in den vergangenen 18 Jahren vergleichsweise gering. Dabei zeigt Abbildung 4.5 deutlich, dass die Region insbesondere seit 2005 weiter an Bedeutung verliert. Diese Entwicklung reflektiert die vergleichsweise günstigen Anbaubedingungen im Süden Brasiliens.

**Abbildung 4.5** Regionale Produktion von Bioethanol in Brasilien



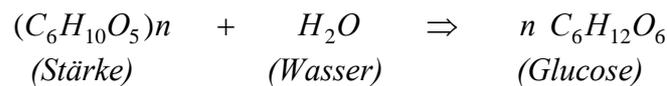
Quelle: Eigene Darstellung nach ÚNICA (2009a)

## DIE HERSTELLUNG VON BIOETHANOL AUS ZUCKER UND STÄRKE

Anders als Pflanzenöle kann Bioethanol nicht direkt aus Pflanzen hergestellt werden, sondern muss durch einen Gärungsprozess aus in Pflanzen enthaltenen Kohlenhydraten gewonnen werden. Dabei werden Kohlenhydrate mit Hilfe von Mikroorganismen gespalten und über mehrere Zwischenprodukte zu Bioethanol umgewandelt. Grundsätzlich sind bei der Herstellung von Bioethanol sechs wesentliche Verfahrensschritte zu unterscheiden. Falls nicht anders gekennzeichnet stützen sich die folgenden Ausführungen auf SCHMITZ (2003).

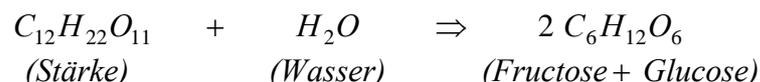
### *Schritt 1: Rohstoffaufbereitung bzw. Zuckeraufschluss*

Der erste Verfahrensschritt bei der Herstellung von Ethanol ist der Aufschluss der stärke- oder zuckerhaltigen Rohstoffe. Da grundsätzlich nur Zucker durch die alkoholische Gärung in Ethanol und Kohlendioxid umgewandelt werden kann, wird bei stärkehaltigen Pflanzen ein Verfahrensschritt vorgeschaltet, bei dem die im Korn enthaltene Stärke in niedermolekularen Zucker umgewandelt wird. Diese Reaktion ist eine Hydrolyse, wobei die Stärke mit Wasser vermischt und auf Reaktionstemperatur gebracht wird.



Dieser komplexe mikrobiologische Vorgang wurde hier stark vereinfacht dargestellt und läuft in der betrieblichen Praxis ungleich komplizierter ab. Um an das Stärkekorn zu gelangen muss das Getreide in einem ersten Verarbeitungsschritt vermahlen werden. Man unterscheidet dazu heute zwei gängige Verfahren, die sich hinsichtlich der Investitionskosten und des Energieaufwands unterscheiden. Das Trockenmahlverfahren mittels Hammermühlen ist energetisch aufwändiger als das Nassmahlverfahren, zeichnet sich jedoch durch geringere Investitionskosten aus<sup>17</sup>. In der Regel lohnen sich Nassmahlverfahren nur bei gleichzeitiger Stärke- und Keimölgewinnung.

Bei der Verarbeitung von zuckerhaltigen Rohstoffen ist der Verfahrensschritt des Rohstoffaufschlusses einfacher. Bei der in Europa traditionell verarbeiteten Rübenmelasse liegt der Zucker als Disaccharid vor, der von Hefe in Monosaccharide gespalten und vergoren werden kann. Der Vorgang lässt sich wie folgt abbilden:

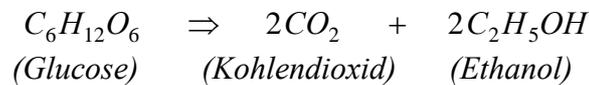


---

<sup>17</sup> Gleichzeitig verschlechtern Trockenmahlverfahren jedoch die Energiebilanz von Bioethanol. Auf diese Weise verschlechtert sich durch das Trockenmahlverfahren auch die Klimabilanz, wenn Bioethanol fossiles Benzin ersetzt. Dieser Effekt verstärkt sich dann noch, wenn die zugeführte Energie besonders aus besonders klimaintensiven Energieträgern wie Braunkohle beruht. Detailliert wird dies in Kapitel 5 analysiert.

### *Schritt 2: Fermentation des aufgeschlossenen Zuckers*

Bei der Fermentation des aufgeschlossenen Zuckers wird den Monosacchariden Hefe zugegeben. Diese entwickelt unter den Produktionsbedingungen ein Enzym, die sog. Zymase, welches die Glucose in Ethanol und Kohlendioxid umsetzt:



Bei der industriellen Produktion unterscheidet man drei Verfahren zur Fermentation (KIM/DALE 2005: 431): das Batch-, das Kaskaden- und das kontinuierliche Verfahren. Beim Batch-Verfahren als dem ältesten Verfahren findet die vollständige Gärung in einem Gärbehälter statt bis der Zuckerabbau abgeschlossen ist. Die relative Vorteilhaftigkeit des Verfahrens liegt in der äußerst robusten Gärführung im Vergleich zu den anderen Verfahren (SOKHANSANJ et al. 2002: 349). Die einmal gewonnene ethanolhaltige Maische wird relativ kurzfristig aus dem Prozess mittels Destillation herausgenommen. Dadurch wird das bestehende Infektionsrisiko mit anderen Mikroorganismen weitgehend ausgeschlossen.

Demgegenüber durchläuft die Maische beim Kaskadenverfahren hintereinandergeschaltete Gärbehälter. Auf diese Weise können die einzelnen Fermentationsschritte in den verschiedenen Behältern optimal gesteuert werden. Im Ergebnis ermöglicht dieses Verfahren hohe Ethanolausbeuten bei geringem Energieaufwand. Allerdings stellt dieses Verfahren höhere Anforderungen an das Betriebspersonal als das Batch-Verfahren.

Beim kontinuierlichen Gärverfahren schließlich wird der gesamte Fermentationsprozess in einem Gärbehälter betrieben. Dabei wird gleichzeitig Hefe gezüchtet und Ethanol erzeugt, zuckerhaltiges Substrat zugegeben und vergorene Maische abgezogen. Dieses Verfahren ermöglicht einen hohen Automatisierungsgrad und kommt darüber hinaus praktisch ohne direkte Betreuung durch Betriebspersonal aus.

### *Schritt 3: Destillation*

Das Ethanol, welches sich bei der Fermentation gebildet hat, befindet sich immer noch in der Maische. Unabhängig von der Wahl des Verfahrens zur Fermentation folgt im nächsten Schritt daher die Separierung des Ethanols von der fermentierten Maische. Diese wird als Destillation bezeichnet. Die Destillation erfolgt in übereinander angeordneten Kochböden in einer Kolonne. Im untersten Teil der Kolonne wird die Maische mit Hilfe eines Wärmetauschers aufgeköcht, so dass der entweichende Dampf durch die durchlässigen Böden aufsteigen kann. Am Kopf der Kolonne entweicht dann ein Ethanol-Wasserdampf-Gemisch, das einen Ethanolanteil zwischen 82- 87% aufweist.

#### *Schritt 4: Rektifikation*

Dieses Gemisch muss auf einen Ethanolgehalt von ca. 95% verstärkt werden. Da bei der Gärung neben Ethanol einerseits auch niedere Alkohole wie Methanol und Aldehyde und andererseits höhere Alkohole wie Propanol und Fuselöl entstehen, werden diese Nebenprodukte abgetrennt. Diese Aufkonzentrierung und Reinigung von Nebenprodukten nennt sich Rektifikation.

Da die Qualitätsansprüche für Kraftstoffbioethanol geringer sind als bei traditioneller Verwendung im Lebensmittelbereich, kann die apparative Ausrüstung für die Rektifikation vergleichsweise einfacher gestaltet werden, was zu geringerem Investitions- und Energiebedarf führt. Bei der Herstellung von Kraftstoffbioethanol kann darüber hinaus auch der während des Rektifikationsprozesses gewonnene und für den menschlichen Genuss nicht geeignete Vor- und Nachlauf dem Kraftstoffbioethanol vor der Dehydrierung wieder zugeführt werden.

#### *Schritt 5: Entwässerung*

Abhängig vom Verwendungszweck wird das so entstandene wasserhaltige Ethanol unter zusätzlichen Kosten absolutiert, also entwässert. Während Reinethanolmotoren problemlos mit wasserhaltigem Ethanol betrieben werden können, benötigt Ethanol als Zusatz zum Ottokraftstoff mit dem in Deutschland derzeit üblichen Mischungsanteil von 5% eine Reinheit von mindestens 99%. In diesem Fall wird Ethanol als rein bzw. anhydriert bezeichnet. In der Praxis hat sich in den letzten Jahren hierfür das Molekularsiebverfahren durchgesetzt, das auf dem Prinzip der Absorption beruht. Das Verfahren erfordert nur geringe Betriebskosten im Vergleich zum Membranverfahren oder dem Einsatz von Schlepptmitteln.

#### *Schritt 6: Reststoffaufarbeitung*

Bei der Ethanolerzeugung fällt bei der Destillation als Reststoff die sog. Schlempe an, die alle Inhaltsstoffe des Rohstoffes außer dem Zucker oder der Stärke enthält (BALTZ et al. 1982: 260). In Großbrennereien erfordert die Reststoffaufarbeitung wesentliche Investitionen und stellt einen wichtigen Kostenfaktor der Ethanolerzeugung dar. So entfallen beispielsweise etwa 45% des gesamten Investitionsvolumens auf Anlagen zur Aufarbeitung der Getreideschlempe. Ebenfalls rund die Hälfte des gesamten Energieaufwandes ist für die Verarbeitung der Schlempe erforderlich.

Diesen Kosten müssen jedoch die Erlöse aus dem weiteren Verwendungszweck der Schlempe gegenübergestellt werden. Profitabel erscheint insbesondere Weiterverarbeitung der proteinreichen Getreideschlempe zu Futtermitteln. Dies macht die Verwendung der Schlempe als Rohstoff für Biogasgewinnung oder als Dünger unattraktiv.

## HERSTELLKOSTEN VON BIOETHANOL

Die Herstellung von Bioethanol aus Getreide oder Zuckerrüben unterscheidet sich durch die unterschiedlichen Anforderungen an die Aufbereitung des Grundstoffes. Bioethanolanlagen in Deutschland besitzen die technische Ausrüstung, um beide Rohstoffe verarbeiten zu können. Eine differenzierte Betrachtung der Herstellkosten für beide Rohstoffe ist damit bezüglich der Investitionskosten einer Bioethanolanlage nicht nötig. Differenzen in den Herstellkosten ergeben sich vornehmlich durch unterschiedliche Rohstoffpreise je hl. In Brasilien sind die Bioethanolanlagen zumeist an Anlagen zur Zuckerproduktion angegliedert. Die Zuckerproduktion basiert fast ausschließlich auf dem Rohstoff Zuckerrohr. Nicht angegliederte Bioethanolanlagen verarbeiten ebenfalls fast ausschließlich Zuckerrohr.

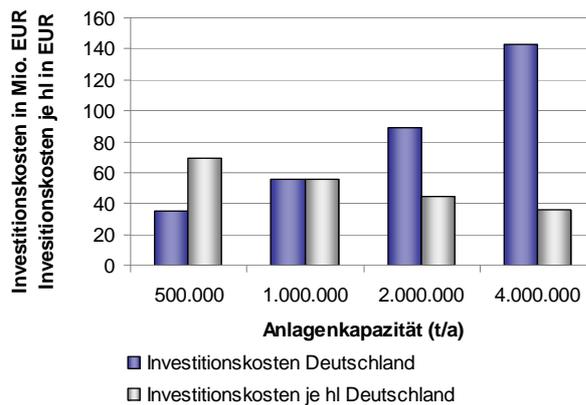
Die folgenden Ausführungen betrachten im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit insbesondere auch das Potential zur Kosteneinsparung der einzelnen Kostenpositionen. Die Berechnungen in diesem Abschnitt sind, falls nicht anders gekennzeichnet, HENNIGES (2007: 47ff) entnommen. Als wesentliche Herstellkosten lassen sich durch die Beschreibung des Produktionsprozesses folgende Positionen identifizieren:

- Investitionskosten
- Personalkosten
- Betriebsmittel
- Rohstoffe
- Sonstige Nebenkosten
- Nebenprodukterlöse

Die Investitionskosten für Gebäude und Maschinen nehmen mit steigenden Kapazitäten der Anlage zu. Länderunterschiede ergeben sich dabei vor allem durch die signifikanten Unterschiede in den Materialkosten und die unterschiedlichen kalkulatorischen Zinssätze, die der Investitionsrechnung zu Grunde gelegt werden müssen. Die Kapitalbeschaffung gestaltet sich beispielsweise in Brasilien aufgrund des vergleichsweise höheren Risikos teurer als in Europa. Entsprechend wird für Brasilien ein Zinssatz von 10%, für Deutschland ein Zinssatz von 5% unterstellt. Im Ergebnis belaufen sich die Investitionskosten für eine Bioethanolanlage mit einer Kapazität von 2 Mio. hl in Deutschland auf rund 90 Mio. EUR, während eine Anlage derselben Kapazität in Brasilien eine Investitionssumme von etwa 48 Mio. EUR benötigt (HENNIGES 2007: 268, 274).

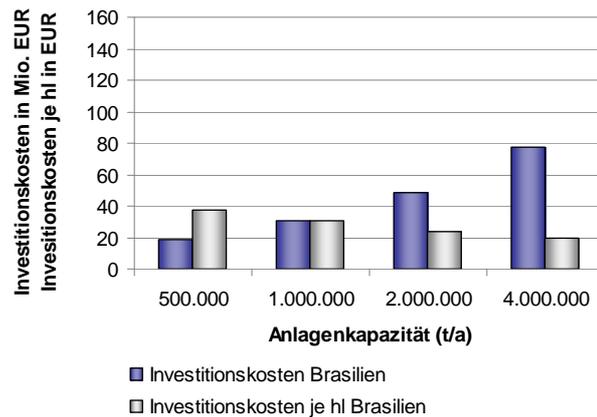
Das größte Potential zur Kosteneinsparung pro hl bieten Skaleneffekte, die durch eine Ausweitung der Kapazität erzielt werden können. Während Rohstoffe, Betriebsmittel und Nebenkosten annähernd konstant bleiben, können durch größere Kapazitäten die Investitionskosten pro Kapazitätseinheit deutlich gesenkt werden, wie die folgenden Abbildungen zeigen.

**Abbildung 4.6** Anlageninvestitionen Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung nach Henniges (2007: 267ff)

**Abbildung 4.7** Anlageninvestitionen Brasilien



Quelle: Eigene Darstellung nach Henniges (2007: 267ff)

In der Preiskonkurrenz mit konventionellen Kraftstoffen werden sich Bioethanolanlagen auf Dauer nur bei hohen Kapazitäten behaupten können. Abbildung 4.6 zeigt, wie bei einer Erhöhung der Anlagenkapazität von 500.000 t/a auf 4.000.00 t/a die Investitionskosten pro hl fast halbieren. Im Jahr 2005 wurde in Deutschland Bioethanol im Umfang von lediglich etwa 6 Mio. hl erzeugt (ZEDDIES 2006b: 23). Die Erzeugungsmenge impliziert bereits ineffiziente Kapazitäten der Bioethanolanlagen. Allein aus diesem Grund ist die deutsche Bioethanolproduktion im internationalen Wettbewerb wenig konkurrenzfähig. Brasilianische und US-amerikanische Anlagenbetreiber können demgegenüber auf effiziente Anlagenkapazitäten bauen. Der größte Produzent weltweit ist Archer Daniels Midland (ADM) in den USA mit einer Kapazität von etwa 34 Mio. hl (SCHMITZ 2003: 120).

Die Skaleneffekte der weiteren Kostenpositionen bei der Produktion von Bioethanol lassen sich aus Tabelle 4.5 ersehen. Deutlicher noch als bei den Investitionskosten sind die Skaleneffekte bei den Personalkosten. Eine Vergrößerung der Kapazität von 1 Mio. t/a auf 4 Mio. t/a verringert die Personalkosten auf nur noch etwa ein Drittel des Ausgangswerts. Dies gilt gleichermaßen für Deutschland und Brasilien. Allerdings machen Personalkosten nur einen geringen Anteil der Gesamtkosten aus: Bei einer Kapazität von 2 Mio. hl beträgt der Anteil in Deutschland nur rund 1,7%, in Brasilien liegt er mit etwa 1,3% sogar noch etwas tiefer. Insgesamt sind die Einsparungen in diesem Bereich trotz der größten Skaleneffekte eher vernachlässigbar.

Die größte Position bei der Berechnung der Herstellkosten nehmen die Rohstoffkosten ein. Tabelle 4.5 zeigt jedoch, dass diese unabhängig von der Kapazität der Bioethanolanlagen sind und so sind hier keine Skaleneffekte zu verzeichnen. Im Gegenteil verlangen höhere Kapazitäten auch ein größeres Einzugsgebiet und so muss mit steigenden Transportkosten gerechnet werden. In der Betrachtung werden diese jedoch vernachlässigt und konstante Rohstoffkosten unterstellt. Die kostensenkende Wirkung der Skaleneffekte bei den anderen Kostenpositionen

führt dazu, dass der relative Anteil der Rohstoffe an den Herstellkosten bei steigender Kapazität zunehmen wird. Bei den unterstellten Rohstoffpreisen beläuft beträgt dieser Anteil bis zu 60% der Brutto Herstellkosten.

Ganz ähnlich ist der Einsatz von Betriebsmitteln in Deutschland zu bewerten. Skaleneffekte sind hier als eher gering einzustufen, aber der Anteil an den Herstellkosten von etwa 33% bei Weizen und ca. 27% bei Zuckerrüben macht sie zum zweitgrößten Kostenfaktor der Bioethanolherstellung in Deutschland. In Brasilien hingegen betragen die Betriebsmittelkosten nur einen Bruchteil des Wertes für Deutschland. Deutlich geringer ist ebenfalls ihr Anteil an den Gesamtkosten in Brasilien.

Je kosteneffizienter eine Bioethanolanlage also arbeitet, desto stärker wirken sich Schwankungen im Marktpreis der Roh- und Betriebsstoffe auf die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen Kraftstoffen aus. Entsprechendes gilt für die Nebenprodukterlöse. Die bei der Herstellung von Bioethanol oder Biodiesel anfallenden Nebenprodukte werden auf den verschiedenen Großhandelsmärkten angeboten. Ebenso wie die Rohstoffe unterliegen auch diese Nebenprodukte erheblichen Preisschwankungen auf den Großhandelsmärkten.

Zur vollständigen Beurteilung der Herstellkosten müssen die bereits angesprochenen Nebenprodukterlöse von den Herstellkosten subtrahiert werden. Wie bereits ausgeführt wurde, wird beispielsweise die proteinreiche Getreideschlempe als Futtermittel in der Nutztierhaltung eingesetzt. Der Anteil ist dabei nicht unerheblich. Werden die Nebenprodukterlöse bei der Berechnung der Herstellkosten berücksichtigt, so müssen diese um rund 14% bei Weizen und etwa 10% bei Zuckerrüben nach unten korrigiert werden. Eine solche Anwendung ist bei den Reststoffen aus Zuckerrohr nicht möglich, daher entfällt dieser Korrekturfaktor hier.

Ein großes Einsparpotential bietet darüber hinaus die Variation der hergestellten Qualität im Hinblick auf den Einsatz von Bioethanol als Beimischung oder Reinkraftstoff. Ab einem Anteil von 20% wird der Einsatz von wasserhaltigem Ethanol in Gemischen als technisch unproblematisch angenommen (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2002). Da wasserhaltiges Ethanol bei der Herstellung bis zu 20% unter den Herstellkosten reinen Ethanols liegt (BREWSTER 2007b: 3), ist davon auszugehen, dass die Produktion von Bioethanol künftig noch anwendungsspezifischer ausfallen dürfte.

**Tabelle 4.5** Herstellkosten von Bioethanol in Deutschland und Brasilien

	Deutschland								Brasilien			
	Kapazität 1 Mio. t				Kapazität 2 Mio. t				Kapazität 0,85 Mio. t		Kapazität 2 Mio. t	
	Weizen		Zuckerrübe		Weizen		Zuckerrübe		Zuckerrohr		Zuckerrohr	
<b>Kostenpositionen</b>	EUR/hl	%	EUR/hl	%	EUR/hl	%	EUR/hl	%	EUR/hl	%	EUR/hl	%
<b>Investitionen Gebäude</b>	0,89	1,6	0,89	1,7	0,71	1,4	0,71	1,4	0,56	3,4	0,49	2,8
<b>Investitionen Maschinen</b>	5,77	10,5	5,77	10,8	4,61	8,9	4,61	9,2	2,99	15,7	2,27	129
<b>Nebenkosten</b>	2,23	4,1	2,23	4,2	1,78	3,4	1,78	3,5	1,27	6,7	0,97	5,5
<b>Personalkosten</b>	1,51	2,8	1,51	2,8	0,90	1,7	0,90	1,8	0,42	2,2	0,23	1,3
<b>Rohstoffkosten</b>	26,80	48,8	28,73	54,0	26,80	51,6	28,62	56,9	10,98	57,6	10,98	62,4
<b>Betriebsmittel</b>	17,71	32,3	14,09	26,5	17,18	33,0	13,67	27,2	2,74	14,4	2,66	15,1
<b>Herstellkosten (brutto)</b>	54,91	100	53,21	100	51,99	100	50,29	100	19,06	100	17,61	100
<b>Nebenprodukterlös</b>	7,20	13,1	5,50	10,3	7,20	13,9	5,50	10,9	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Herstellkosten</b>	47,71	86,89	47,71	89,7	44,79	86,15	44,79	89,1	19,06	100	17,61	100

Quelle: HENNIGES (2007: 267ff)

### 4.2.2 Biodiesel

Die erstmalige Verwendung von Biodiesel ist untrennbar mit der Erfindung des Dieselmotors verknüpft. Nachdem er mit verschiedenen Ölen experimentiert hatte, gelangt Rudolf DIESEL die Konstruktion eines Motors, der mit Erdnussöl betrieben wurde. Wie Henry FORD sah vor diesem auch Rudolf DIESEL die Zukunft der Kraftstoffe in landwirtschaftlichen Erzeugnissen. Wörtlich erklärte er in einer Rede 1912: „The Use of Vegetable Oils for engine fuel may seem insignificant today, but such oils may become, in the course of the time, as important as petroleum and the coal tar products at the present time.“. Dennoch wendeten sich im frühen 20. Jahrhundert die Produzenten der Dieselmotoren Petroleum als Kraftstoff zu. Die schier unerschöpflichen Vorräte fossiler Energieträger boten eine deutlich weniger kostspielige Kraftstoffherzeugung. Die Massenherstellung von Pflanzenölen wurde damit für die nächsten 60 Jahre kaum weiter verfolgt.

Mit der Ölkrise in den 1970er Jahren flammte das Interesse an alternativen Kraftstoffen wieder auf und 1983 wurde nach erfolgreichen Tests mit Dieselmotoren schließlich der Produktionsprozess für hochwertigen Biodiesel fertig gestellt. Der Bau der ersten Pilotanlage war 1987 abgeschlossen und die Biodieselanlage verarbeitete fortan jährlich rund 30.000 Tonnen Rapssaat. Wenig später wurden in Amerika und Europa die ersten Biodieselanlagen zur kommerziellen Nutzung gebaut.

Der Markt für Pflanzenöl ist wettbewerblich strukturiert, daher erfolgt die Preisbildung abhängig von Angebot und Nachfrage nach Pflanzenölen. Für die Abschätzung der Marktchancen von Biodiesel als Substitut für konventionellen Dieselkraftstoff sind damit die Höhe sowie die Entwicklung der Nachfrage nach Pflanzenöl aus anderen Sektoren entscheidend. Daher wird an dieser Stelle ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten zur industriellen Nutzung von Pflanzenöl gegeben. Diese können regional sehr unterschiedlich ausfallen, so dass ein besonderes Augenmerk auf die europäische Situation gelegt wird.

Zwar sind Pflanzenöle oft teurer als Mineralöle, sie bieten gleichzeitig jedoch auch neuartige Funktionalitäten. *Crambe abyssinica* beispielsweise produziert ein Öl mit einem hohen Erucasäuregehalt, das in der Kunststoffindustrie zum Einsatz kommt. Im Pflanzenölsektor sind nach NNFCC (2005: 37) und JOHANSSON (2000: 97) sechs industrielle Anwendungszwecke vorherrschend: Oberflächenaktive Stoffe und Seifen, Schmiermittel, Farben und Beschichtungen, Lösemittel, Polymere und Linoleum. Während in Deutschland Pflanzenöle für alle sechs industriellen Anwendungszwecke bereits eingesetzt werden, ist die Marktdurchdringung EU-weit noch nicht besonders fortgeschritten. Die stärkste Aktivität in Europa verzeichnet momentan der Einsatz von Pflanzenöl zur Herstellung oberflächenaktiver Stoffe und Seifen. Hier lag bereits im Jahr 2000 eine Marktdurchsetzung von bereits über 50% vor. In anderen Anwendungsbereichen spielen Pflanzenöle kaum eine signifikante Rolle. Die aktuelle Marktdurchdringung von nachwachsenden Rohstoffen in den anderen Schlüsselbereichen liegt bei

unter 5%. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dies künftig auch nur marginal ändert. Im Bereich der oberflächenaktiven Stoffe und Seifen hingegen kann abhängig von den staatlichen Maßnahmen zur Förderung nachwachsender Rohstoffe eine Marktdurchdringung von bis zu 65% erreicht werden (NNFCC 2005: 40). Da dieser Markt jedoch eng begrenzt ist, geht von dieser Nachfragesteigerung kaum eine signifikante Preiswirkung aus. Die industriellen Verwendungszwecke von Pflanzenöl stellen damit kurz- und mittelfristig keine signifikante Begrenzung der Wachstumschancen für Biodiesel dar. Anders bei Pflanzenölen, die zur Verwendung im Lebensmittelbereich gedacht sind. Abhängig von den jeweiligen Marktpreisen kann es hier zu einem zusätzlichen Angebot für die Herstellung von Biodiesel kommen. Für die Food vs. Fuel Debatte wird auf Abschnitt 5.1.5 verwiesen.

### **ÖLPFLANZEN ALS ROHSTOFFBASIS FÜR BIODIESEL**

Grundsätzlich eignen sich zur Dieselproduktion alle ölhaltigen Pflanzenbestandteile. In der Regel wird Biodiesel jedoch aus Raps-, Soja-, Sonnenblumen- oder Palmöl hergestellt. Zudem bietet die Produktion von Biodiesel eine interessante Möglichkeit der Weiterverwertung von Altspeseölen. In den USA fallen nach Angabe der Environmental Protection Agency Altspeseöle aus Restaurants jährlich in Höhe von 1,14 Mio. hl an. Aufgrund des stark begrenzten Umfangs darf allerdings bezweifelt werden, dass ein signifikanter Teil der Biodieselproduktion auf Basis von Altspeseöl stattfinden wird.

Der wichtigste Rohstoff für die Biodieselherstellung in Europa ist Rapsöl (43%), gefolgt von Sojaöl (30%) und Sonnenblumenöl (20%). In Deutschland hingegen wird Biodiesel fast ausschließlich aus Raps gewonnen. Dabei ist die Rapsanbaufläche mit etwa 1,4 Mio. ha nahezu an eine biologische Anbaugrenze gelangt. Bei entsprechenden politischen Rahmenbedingungen wäre gleichwohl noch eine Steigerung auf bis zu 2 Mio. ha möglich. Daraus ergibt sich für das Jahr 2010 ein theoretisches Produktionspotential für Biodiesel von 1,3 Mio. t Rapssaat (ZEDDIES 2006b: 12).

Der Anteil von Biodiesel ist in Deutschland mit 5,2% im Jahr 2005 deutlich höher als der Anteil von Bioethanol am Gesamtvolumen der Ottokraftstoffe. Trotz des weiten Verbreitungsgrades in Deutschland und der Akzeptanz dieses biogenen Kraftstoffes in der Bevölkerung, bietet Biodiesel für die Zukunft nur einer geringe Perspektive. Vergleicht man die möglichen Produktionsmengen von Biodiesel in Deutschland und der EU mit dem erwarteten Dieselverbrauch, dann wird deutlich, dass im Dieselmotorkraftstoffbereich die EU Ziele für Biokraftstoffe nicht verwirklicht werden können. Nach Tabelle 4.6 beträgt der mögliche Biodieselanteil in der Europäischen Union 2,18% im Jahr. Insgesamt soll dem EU Ziel entsprechend 2010 ein Biokraftstoffanteil von 5,75% erreicht werden. Ausführlich stellt Kapitel 5 die nationalen und europäischen Ziele sowie die Biokraftstoffstrategie dar, mit welcher diese Ziele erreicht werden sollen.

**Tabelle 4.6** Biodieselpotential in Deutschland und EU-25

	Einheit	Deutschland			EU-25		
		2005	2010	2020	2005	2010	2020
<b>Verbrauch Diesel</b>	Mio. t	29,70	31,30	28,60	158,60	165,00	178,20
<b>Biodieselpotential aus</b>							
<b>Rapssaat</b>	Mio. t	-	2,316	2,982	-	3,44	6,06
<b>Sonnenblumensaat</b>	Mio. t	-	0,011	0,01	-	0,73	1,22
<b>gesamt</b>	Mio. t	1,80			2,00		
<b>Möglicher Anteil an Diesel</b>	%	5,20	6,40	8,75	1,10	2,18	3,52

Quelle: Eigene Darstellung nach Zeddies (2006b: 22)

Die Möglichkeiten zur Steigerung der Biodieselproduktion sind offensichtlich äußerst begrenzt. Steigerungen in der Pflanzenölproduktion pro ha sind nicht zu erwarten. Die Anbaumethoden sowie die Verfahren zur Ölgewinnung sind ausgereift. Einzig die Nutzung stillgelegter Ackerflächen und die Umwandlung von Grünflächen zu Ackerland bietet eine begrenzte Steigerung des Produktionsvolumens, wengleich der Ertrag pro ha auf diesen Flächen wegen der geringeren Bodenqualität deutlich unter den bislang genutzten Ackerflächen liegt. Bei einem annähernd konstanten Verbrauch von Diesel bis zum Jahr 2020 wird sich der Anteil von Biodiesel nur geringfügig erhöhen. Zwar ließe sich durch entsprechenden Import von Pflanzenöl oder Biodiesel ein höherer Anteil erreichen, es stellt sich jedoch die Frage, ob dies beispielsweise hinsichtlich des erklärten Ziels der Energiesicherheit wünschenswert ist. Hierzu sei jedoch auf Kapitel 5 verwiesen.

Weltweit gesehen spielt Biodiesel im Vergleich zu Bioethanol bislang eine eher untergeordnete Rolle. Insgesamt werden weltweit nur etwa 50 Mio. hl Biodiesel produziert, ein Bruchteil der weltweiten Bioethanolproduktion von jährlich 500 Mio. hl (SCHMITZ 2007: 8). Auch in Ländern, in denen bereits Biokraftstoffe eingesetzt werden, ist Biodiesel noch recht neu und teilweise noch nicht kommerziell verfügbar (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 334), wie beispielsweise in Indien. Der überwiegende Teil der Biodieselproduktion findet dabei in Europa statt. Mit einer Produktionsmenge von rund 43 Mio. hl Biodiesel ist Europa der weltweit größte Produzent des Biokraftstoffs. Davon wiederum wird über die Hälfte in Deutschland erzeugt. Während bislang Biodiesel also hauptsächlich von regionaler Bedeutung für Deutschland war, gewinnt Biodiesel nun sukzessive auch international an Bedeutung.

Vor allem geschieht dies mit dem Ziel der Wiederverwertung von Altpeiseöl. So erfolgt beispielsweise in China derzeit ein Aufbau neuer Produktionskapazitäten zur Biodieselgewinnung aus den jährlich anfallenden 70 Mio. t Altpeiseöl. Die gegenwärtige Produktion von

etwa 635.000 hl jährlich soll damit bis um Jahr 2010 verdreifacht werden. Auch in Brasilien beginnt die Biodieselproduktion erst langsam. Mit ihrem „Biodiesel Production and Use Programme“ verfolgt die brasilianische Regierung eine ähnliche Strategie wie mit dem Programm Proálcool 1975. Die Biodieselproduktion beginnt jedoch zunächst recht verhalten. Ziel ist die Produktion von rund 25 Mio. hl im Jahr 2013.

## **DIE HERSTELLUNG VON BIODIESEL**

Im Gegensatz zu Bioethanol kann Biodiesel durch physikalisch-chemische Umwandlung direkt aus den ölhaltigen Pflanzen gewonnen werden. Eine Rohstoffaufbereitung, wie der Zuckeraufschluss bei Bioethanol, ist bei der Herstellung von Biodiesel nicht notwendig, wenn gleich auch das gewonnene Pflanzenöl bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen muss. Dem eigentlichen Herstellungsprozess ist damit die Vollraffinierung von Rapsöl vorangestellt, welches den folgenden Ausführungen als das für Deutschland bedeutendste Pflanzenöl beispielhaft auch für andere Pflanzenöle zugrunde liegt.

Die Herstellung von Biodiesel erfolgt in zwei Schritten. Nach der Vollraffinierung des Pflanzenöls beginnt der eigentliche Prozess zur Gewinnung von Biodiesel, die sog. Umesterung.

### *Schritt 1: Vollraffinierung des Rapsöls*

Raps enthält bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 8-9% einen Ölanteil von etwa 39%. Durch verschiedene moderne Verfahren kann das Rapsöl heute fast vollständig ausgebeutet werden. Dabei werden zunächst etwa 70% des in der Pflanze vorhandenen Öls durch Pressen der Rapssamen gewonnen (HENNIGES 2007: 28). Verschiedene Walzwerke und Pressen erreichen diese Ölausbeute unter dem Einfluss von Dampf. Durch die Erwärmung des Rapses auf etwa 80°C wird die Viskosität des Öls herabgesetzt und es tritt infolgedessen leichter aus. Das verbliebene sog. Rapsexpellerschrot enthält immer noch rund 18% Öl. Nach dem Pressen wird er zerkleinert und unter Zugabe des Lösungsmittels n-Hexan kann dieser verbliebene Ölanteil fast vollständig extrahiert werden (FLAIG/MOHR 1993: 87). Der Ölgehalt im verbleibenden Rapsextraktionsschrot beträgt nunmehr weniger als 1%.

Um den für die Herstellung erforderlichen Qualitätsansprüchen zu genügen muss das gewonnene Pressrohöl verschiedene Reinigungsstufen durchlaufen. Zunächst wird es mit Wasser und Phosphorsäure entschleimt, im Anschluss mit Natronlauge entsäuert, mit Bleicherde entfärbt und schließlich mit Wasserdampf desodoriert (HENNIGES 2007: 30). Das dadurch entstandene vollraffinierte Rapsöl kann entweder direkt in modifizierten Dieselmotoren verwendet oder zu Biodiesel weiterverarbeitet werden (KALTSCHMITT/HARTMANN 2001: 215).

## *Schritt 2: Der Prozess der Umesterung*

Durch die sog. Umesterung zu Biodiesel kann eine geringere Viskosität des Öls erreicht werden (DEMIRBAS 2008: 4). Biodiesel ist den Eigenschaften des fossilen Diesels durch seine niedermolekulare Struktur wesentlich ähnlicher als das hochmolekulare vollraffinierte Pflanzenöl. Bei der Umesterung wird diese niedermolekulare Struktur erreicht, indem dem Pflanzenöl niederwertiger Alkohol beigegeben wird. In der Regel erfolgt dies in Form von Methanol, aber auch die Beigabe von Ethanol ist grundsätzlich denkbar. Natrium oder Kaliumhydroxid werden als Katalysator für den Prozess eingesetzt. Der niederwertige Alkohol verdrängt den im Rapsöl enthaltenen höherwertigen Alkohol und liefert im Ergebnis Ester und Glycerin (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 34). Zur Gewinnung von Biodiesel aus diesem Ester sind nun nur noch geringfügige Aufarbeitungen/Reinemachen notwendig.

Dieser einfache Vorgang liegt allen Veresterungsverfahren zugrunde. Üblicherweise unterscheidet man analog zu den Ausführungen zur Herstellung von Bioethanol das Batch-, semi-kontinuierliche und kontinuierliche Verfahren. Aus den Ausführungen wird offensichtlich, dass diese Verfahren weitaus weniger komplex ablaufen, als dies bei Bioethanol der Fall war. Eine ausführliche Darstellung dieser Prozesse bieten KALTSCHMITT/WIESE (1992) sowie KALTSCHMITT/REINHARDT (1997).

Das flüssige Glycerin, welches als Nebenprodukt bei der Biodieselproduktion entsteht, stellt einen wertvollen Grundstoff für die kosmetische Industrie, Medizin und Nahrungsmittelproduktion dar, wird jedoch ebenso als Futtermittel verwendet (CARDONA et al. 2007: 3). Die hieraus resultierenden Gewinne werden hinsichtlich der Herstellkosten im nächsten Abschnitt diskutiert.

## **DIE KOSTEN DER BIODIESELPRODUKTION IM ZEITVERLAUF**

Ähnlich wie bei der Herstellung von Bioethanol machen auch bei Biodiesel die Rohstoffkosten den überwiegenden Anteil der Herstellkosten aus. Genau lässt sich dieser Anteil jedoch nicht angeben, denn er hängt von den jeweiligen Großhandelspreisen für Raps ab. Bei einem Rapspreis von 270 EUR/t, wie er Mitte des Jahres 2007 gezahlt wurde, ergibt sich ein Anteil der Rohstoffkosten in Höhe von knapp 80% an den Gesamtherstellkosten (ENGUÍDANOS et al. 2002: 15). Um also die Herstellkosten für Biodiesel beziffern zu können, muss der Großhandelspreis für Raps ermittelt werden.

Wie andere Agrarerzeugnisse ist auch Raps längst zu einem Produkt geworden, das an der Börse gehandelt wird. Zu den Börsen, die einen Handel mit Raps anbieten, gehört beispielsweise die Intercontinental Exchange (ICE), die früher als Winnipeg Commodity Exchange (WCE) bekannt war. Der ICE Terminkontrakt für Raps dient nach eigenen Angaben der ICE (2009) als Bezugspunkt für den weltweiten Handel mit Raps. Die Handelsprodukte für Raps

sind im Vergleich zu anderen Märkten und insbesondere dem Weltmarkt für Erdöl relativ simpel. Neben den schon erwähnten Terminkontrakten wird Raps noch auf dem Spotmarkt und in Optionen gehandelt.

Zur Bezifferung der Herstellkosten werden als Rohstoffkosten im Folgenden die Spotpreise für Raps nach ZMP (2008a) angenommen. Terminkontrakte erscheinen hierfür wenig geeignet. Bei Terminkontrakten können sich in gewissem Sinne sowohl Käufer als auch Verkäufer von Raps einen bestimmten Preis sichern (LEPP 2009), für den Raps zu einem späteren Zeitpunkt gekauft oder verkauft wird. Terminkontrakte dienen also dazu, mögliche Kursverluste abzufedern. Sie stellen jedoch eine Sicht auf die Zukunft dar, die sich nicht bewahrheiten muss. Das aktuelle Angebot und die aktuelle Nachfrage werden vielmehr in den jeweiligen Spotpreisen reflektiert. Das gilt auch für diejenigen Biodieselanlagen, die direkt an Rapsfelder angegliedert sind. Auch hier muss der Spotpreis für Raps den Ausschlag für die Produktionsentscheidung geben. Abbildung 4.8 zeigt die Spotpreise für Raps seit Januar 2001.

**Abbildung 4.8** Durchschnittliche Wöchentliche Börsennotierungen Raps



Quelle: Eigene Darstellung nach ZMP (2008a)

Die Abbildung zeigt die hohe Volatilität der gehandelten Rapspreise, insbesondere im Jahr 2008. Hier bewegten sich die Preise zwischen etwa 300 EUR/t und 500 EUR/t. Das entspricht einer Schwankung der Rohstoffkosten für die Produktion von Biodiesel von 60% innerhalb eines Jahres. Die Volatilität hängt unter anderem zusammen mit den Preisbewegungen anderer Ölpflanzen und Wechselkursen, aber insbesondere ist die fallende Nachfrage auf Konsumentenseite für den Preisverfall ab Mitte 2008 verantwortlich. Nicht zu leugnen ist ebenfalls die hohe Korrelation mit den Preisbewegungen auf dem Weltmarkt für Erdöl.

In entsprechender Weise gilt dies auch für die Nebenprodukterlöse der Biodieselproduktion. Insgesamt muss also festgehalten werden, dass die Rohstoffkosten der Biodieselproduktion

sowie die Nebenprodukterlöse im Zeitverlauf stark schwanken. Die Herstellkosten für Biodiesel müssen diesen Preisbewegungen folgen. Im Folgenden wird die Entwicklung der Herstellkosten für Biodiesel im Zeitverlauf dargestellt und analysiert.

Die Herstellkosten für einen bestimmten Zeitpunkt setzen sich zusammen aus einem fixen und einem variablen Kostenbestandteil. Als variabler Kostenbestandteil gehen die durchschnittlichen wöchentlichen Börsennotierungen für Raps nach ZMP (2008a) ein, wie sie oben bereits dargestellt wurden. Ebenfalls berücksichtigt werden bei der Berechnung die unterschiedlichen Börsennotierungen bzw. Großhandelspreise für die im Produktionsprozess anfallenden Nebenprodukte Rapsschrot und Glycerin. Dabei dienen ZMP (2008b) und BOCK (2004) als Datenquelle. Es wird davon ausgegangen, dass je hl produzierten Biodiesels 15 kg Rapsschrot und 0,9 kg Glycerin anfallen (SCHMITZ 2006b: 201). Der fixe Kostenbestandteil der Herstellkosten setzt sich aus den weiteren Kostenpositionen zusammen. Hierfür wird wiederum auf die Arbeiten von HENNIGES (2007: 122) verwiesen. Es werden die rechnerischen Kosten einer Biodieselanlage mit einer Kapazität von 1,24 Mio. hl/a Biodiesel unterstellt<sup>18</sup>.

**Tabelle 4.7** Herstellkosten für Biodiesel in Deutschland

	<b>Kapazität 1,124 Mio. hl/a</b>	<b>Kapazität 2 Mio. hl/a</b>
<b>Kostenpositionen</b>	EUR/hl	EUR/hl
Investitionen Gebäude	0,57	0,5
Investitionen Maschinen	3,69	3,1
Nebenkosten	1,38	1,18
Personalkosten	1,42	0,9
Betriebsmittel	12,12	12,1
<b>Herstellkosten (brutto ohne Rohstoffkosten)</b>	<b>19,18</b>	<b>17,78</b>

Quelle: In Anlehnung an HENNIGES (2007: 122)

Die Berechnung der Herstellkosten im Zeitverlauf findet dabei auf wöchentlicher Basis statt. Der gewählten zeitlichen Auflösung kommt dabei eine große Bedeutung zu. Sie muss das Marktverhalten der Biodieselproduzenten korrekt abbilden. Es ist sicherlich nicht davon auszugehen, dass hier ein täglicher Handel mit Raps stattfindet. Daher scheint eine wöchentliche Auflösung die beste Wahl für die Ermittlung der Herstellkosten.

<sup>18</sup> Auf die Analyse der Skaleneffekte einer Kapazitätserweiterung kann an dieser Stelle verzichtet werden. Hier gibt es nur geringfügige Unterschiede zu einer Bioethanolanlage. Diese wurden in Abschnitt 4.2.1 ausführlich erläutert. Gleichwohl soll hier der Hinweis nicht fehlen, dass Skaleneffekte ein zu nutzender Faktor für die Erreichung der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilen Kraftstoffen sind. Gleichzeitig gelingt es auf diese Weise, die Kosten des Klimaschutzes durch Biokraftstoffe zu senken.

Die absolute Höhe der Herstellkosten ist dabei weniger aussagekräftig als ihre Bewegungen im Zeitverlauf. Die absolute Höhe hängt von den getroffenen Annahmen hinsichtlich der einzelnen Kostenpositionen und der Anlagenkapazität ab und hat daher nur für diesen Referenzfall Gültigkeit. Die Bewegung der Herstellkosten jedoch spiegelt die Preisentwicklung des Rohstoffes Raps und der Nebenprodukterlöse für Glycerin und Rapsschrot wider. Unabhängig von der Anlagenkapazität oder der absoluten Höhe der einzelnen Kostenpositionen dürften daher alle Biokraftstoffproduzenten ähnliche Kostenentwicklungen erfahren haben.

**Abbildung 4.9** Entwicklung der Herstellkosten für Biodiesel



Quelle: Eigene Berechnung

Es ist offensichtlich, dass sich die Entwicklung der Herstellkosten für Biodiesel in dieser Berechnung in erster Linie an den oben dargestellten Notierungen für Raps orientieren wird. Abbildung 4.9 zeigt dies deutlich. Die Rohstoffkosten sind der bei weitem überwiegende Kostenfaktor für die Biodieselproduktion. Die Nebenprodukterlöse aus Glycerin und Rapsschrot haben einen deutlich geringeren Einfluss auf die Herstellkosten.

Die hohe Volatilität des Rapspreises ist daher auch in den Herstellkosten für Biodiesel wieder zu finden. Daraus kann gefolgert werden, dass die Wettbewerbsfähigkeit von Biodiesel gegenüber fossilem Diesel ebenso stark schwanken muss. Instrumente zur Stärkung der Konkurrenzfähigkeit von Biodiesel müssen dies berücksichtigen. Gleichzeitig sind auch die Kosten des Klimaschutzes durch Biodiesel starken Schwankungen unterworfen. Eine Förderung von Biodiesel mit dem Ziel des Klimaschutzes muss daher zunächst kritisch betrachtet werden. Die hohe Volatilität der Klimaschutzkosten erschwert doch deutlich die Prognose der Zielerreichungskosten und kompliziert den Vergleich mit alternativen Maßnahmen zum Klimaschutz.

### 4.2.3 Biokraftstoffe der nächsten Generation

Während Biokraftstoffe der ersten Generation, zu denen auch Bioethanol und Biodiesel zählen, schon seit den frühen Tagen des Automobils in unterschiedlichem Umfang und unterschiedlicher Form als Kraftstoffe eingesetzt werden, sind synthetische Biokraftstoffe bislang noch nicht am Markt erhältlich. Derzeit beschränkt sich die Produktion auf einige wenige Versuchsanlagen.

Doch schon heute werden mit diesen BtL-Kraftstoffen große Erwartungen verknüpft. BtL steht dabei für Biomass-to-Liquid und gehört wie GtL (Gas-to-Liquid) und CtL (Coal-to-Liquid) zu den synthetischen Kraftstoffen, deren Bestandteile genau auf die Anforderungen moderner Motorenkonzepte zugeschnitten sind. Im Gegensatz zu Bioethanol und Biodiesel können BtL-Kraftstoffe einen weit größeren Anteil des Kraftstoffbedarfs in Deutschland ersetzen. Schätzungen sprechen von 20-25% des gesamten Kraftstoffbedarfs in Deutschland. Für Europa wird das Potential von BtL-Kraftstoffen mit rund 40% sogar noch deutlich höher vermutet (FNR 2008a). Damit können BtL-Kraftstoffe in wesentlich größerem Umfang zur Substitution von fossilen Kraftstoffen beitragen, als dies Bioethanol und Biodiesel vermögen.

#### DIE ROHSTOFFBASIS DER BtL-KRAFTSTOFFE

BtL-Kraftstoffe haben das Potential, die Rohstoffbasis zur Herstellung von Biokraftstoffen dramatisch zu vergrößern. In den 1920er Jahren ist es den deutschen Forschern Franz FISCHER und Hans TROPSCH erstmals gelungen, aus den Zellulosebestandteilen von Biomasse Biodiesel zu gewinnen. Das Verfahren ist heute als Fischer-Tropsch-Verfahren bekannt. Mit diesem und weiteren Verfahren kommt als Rohstoff zur Herstellung von Biokraftstoffen jegliche Art von zellulosem Material in Frage. Die Palette erstreckt sich dabei von Energiepflanzen, die eigens für die Kraftstoffherzeugung angebaut und vollständig verwertet werden bis hin zu Reststoffen von Stroh und Holz. Diese ohnehin anfallenden Mengen an Reststoffen sind besonders interessant, da hier die Rohstoffkosten am geringsten ausfallen dürften und keine Flächenkonkurrenz zur Produktion von Lebensmitteln auftritt.

**Tabelle 4.8** Kraftstofftrag verschiedener Biokraftstoffe

	Bioethanol		Zuckerrohr	Biodiesel	BtL
	Zuckerrüben	Getreide		Raps	
<b>Kraftstoffäquivalent (l/ha)</b>	4.054	1.660	4.197	1.408	3.907
<b>Bruttokraftstofftrag (GJ/ha)</b>	132	54	137	51	135
<b>Nettokraftstofftrag (GJ/ha)</b>	88	30	116	38	118

Quelle: SCHMITZ (2006a: 74)

Tabelle 4.8 vergleicht den Kraftstofftrag verschiedener Arten von Biokraftstoffen. Mit knapp 4.000 l/ha erzielt BtL einen vergleichsweise hohen flächenbezogenen Kraftstofftrag. Gegenüber BtL-Kraftstoffen schneiden Bioethanol aus Getreide und Biodiesel auf Basis von Raps vergleichsweise schlecht ab. In der Folge können diese Biokraftstoffe der ersten Generation bei gleicher Flächeninanspruchnahme auch nur einen geringeren Kraftstoffanteil abdecken, als dies bei BtL-Kraftstoffen vermutlich möglich sein wird.

Die Entwicklung von Technologien zur Gewinnung von BtL-Kraftstoffen bewegt sich in unterschiedliche Richtungen und stellt unterschiedliche Anforderungen an die Rohstoffe. So eignet sich die Verwendung von Holz als Rohstoffbasis für die Herstellung von Biokraftstoff mittels Gasifikation oder dem Fischer-Tropsch-Verfahren besser als beispielsweise Stroh. Im Vergleich zu diesem enthält Holz weniger Chlor, welches zu Verschmutzungen bei der Gasifikation führen kann. Gräser wiederum geben eine hervorragende Rohstoffbasis für die Biochemische Umwandlung ab, da sie weniger Lignin enthalten.

#### **DIE HERSTELLUNG VON BtL-KRAFTSTOFFEN IN VERSUCHSANLAGEN**

Als Rohstoff für BtL-Kraftstoffe dienen die zellulösen Bestandteile der Biomasse. Von Natur aus ist Zellulose resistent gegenüber der Zergliederung in ihre einzelnen Bestandteile. Der Vorgang ist daher ungleich aufwändiger als beispielsweise der Zuckeraufschluss bei der Herstellung von Bioethanol. Grundsätzlich unterscheidet man bei der Herstellung von BtL-Kraftstoffen zwei wesentliche Verfahren: die thermo-chemische und die biochemische Konversion (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 61f).

Bei der Herstellung von BtL-Kraftstoffen existieren zwei Verfahren der thermo-chemischen Konversion. Ein Verfahren besteht darin, die zellulöse Biomasse in einem Reaktor unter Zuführung von Wärme, Druck und Sauerstoff zu vergasen (FNR 2008c). Sauerstoff wird in lediglich geringen Mengen als Vergasungsmittel zugeführt, um eine Verbrennung des entstehenden Synthesegases zu verhindern.

Das gewonnene Synthesegas wird mittels Fischer-Tropsch-Verfahren zu BtL-Kraftstoff weiterverarbeitet. Davor ist jedoch noch die Reinigung des Synthesegases als Zwischenschritt erforderlich. Sie bildet das Bindeglied zwischen der Gaserzeugung und ihrer Nutzung. Das Synthesegas besteht vor allem aus Wasserstoff ( $H_2$ ), Kohlenmonoxid ( $CO$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ). Jedoch könnten die ebenfalls darin enthaltenen Schadstoffkomponenten wie etwa Schwefel- oder Stickstoffverbindungen die Katalysatoren im Fischer-Tropsch-Verfahren beschädigen. Für die Reinigung stehen großtechnische Verfahren zur Verfügung, die als weitgehend ausgereift gelten. Kostensenkungen sind hier durch die Ergebnisse der BtL-Produktion in den verschiedenen Versuchsanlagen nicht mehr oder zumindest nur in sehr geringem Umfang zu erwarten. Dies trifft aber nicht auf die eigentliche Vergasung zu. Es existieren hier

noch eine Reihe technischer Probleme, die vor der kommerziellen Nutzung des Verfahrens gelöst werden müssen. Entsprechend besteht hier noch großes Potential zur Kostensenkung.

Der Vergasung sehr ähnlich ist das zweite thermo-chemische Verfahren zur Gewinnung von BtL-Kraftstoff die Pyrolyse. Ebenfalls unter hohen Temperaturen wird die Biomasse hier unter Ausschluss von Sauerstoff in flüssiges sog. Bio-Öl, Aktivkohle und leichte Gase umgewandelt, die dem Synthesegas sehr ähnlich sind. Während bei der Vergasung jedoch Temperaturen von 600°C bis 1100°C nötig sind, findet die Pyrolyse bei 475°C statt. Das in Deutschland vorherrschende Verfahren, soweit der derzeitige Entwicklungsstand eine solche Aussage überhaupt zulässt, ist jedoch die Biomasse Vergasung. Daher soll an dieser Stelle nicht detaillierter auf die Pyrolyse eingegangen werden.

Nach der Gasreinigung folgt der eigentliche Syntheseschritt. Neben dem bekannteren Fischer-Tropsch-Verfahren wird das Synthesegas beim Methanol-to-Gasoline-Verfahren in einem Zwischenschritt zunächst in Methanol umgewandelt. Der Kraftstoff wird danach in einem weiteren Verfahrensschritt aus dem Methanol gewonnen (SCHINDLER 1997: 170ff).

Die größeren Zukunftsperspektiven bietet jedoch das Fischer-Tropsch-Verfahren. Auf diese Weise wird schon seit fast 100 Jahren BtL-Kraftstoff hergestellt. Nach der Entwicklung 1925 am Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohleforschung in Mülheim wurde es vor allem während des zweiten Weltkrieges von Deutschland und Japan zur Gewinnung von Kraftstoff auf Basis des verfügbaren Rohstoffs Kohle eingesetzt. Später nutzte Südafrika Coal-to-Liquid-Kraftstoffe als Antwort auf das internationale Ölembargo (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 64). Unabhängig vom genutzten Rohstoff wird das Synthesegas beim Fischer-Tropsch-Verfahren in flüssige Kohlenwasserstoffe umgewandelt.

Die im Syntheseschritt erzeugten flüssigen Kohlenwasserstoffe werden im nachfolgenden Produktionsschritt in Schwer-, Mittel- und Leichtfraktionen selektiert. Durch Veredelung und Blending können die gewünschten Kraftstoffeigenschaften bei der Produktaufbereitung gezielt angepasst werden (FNR 2008c). Im Vergleich zu Biokraftstoffen der ersten Generation sind bei synthetischen Biokraftstoffen daher keine Änderungen der Fahrzeugmotoren nötig.

Die Weiterentwicklung des thermo-chemischen Verfahrens und insbesondere des Syntheseschritts mittels Fischer-Tropsch-Verfahren findet hauptsächlich in Europa statt. Das Unternehmen Choren, an dem die Daimler AG, die Volkswagen AG sowie die Shell AG beteiligt sind, hat im Jahr 2003 eine Demonstrationsanlage in Freiberg eröffnet (RUDLOFF 2005). Die Kapazität der Anlage beträgt rund 13.000 t BtL-Kraftstoff jährlich und bildet die Basis für den Bau kommerzieller Anlagen mit einer Kraftstoffkapazität in der Größenordnung von 200.000 t jährlich (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 70). Die kommerzielle Produktion wird in den nächsten 10 Jahren erwartet. International können hauptsächlich Skandinavien, Brasilien und nicht zuletzt die USA Forschungserfolge bei der Kommerzialisierung des Verfahrens vermel-

den. Sowohl das US Department of Energy als auch die Europäische Kommission sind an diversen Biomasse Pilotanlagen beteiligt, welche vornehmlich zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen errichtet wurden (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2006a: 9).

Das andere wesentliche Verfahren zur Umwandlung von zelluloser Biomasse in Biokraftstoff, die Hydrolyse, beruht auf bio-chemischen Prozessen. Dabei wird zunächst die Zellulose in ihre Zuckerbestandteile aufgespalten. Mittels Organismen zur Fermentation erfolgt in einem nächsten Schritt die Umwandlung des Zuckers zu Bioethanol. Hauptsächlich werden hierfür Bakterien, aber auch Hefe verwendet. Während Fermentationsorganismen für die Umwandlung von Glukose in Ethanol bereits verfügbar sind, erforderten die C-5 Zuckermoleküle, die aus der Zellulose gewonnen werden, die Entwicklung ganz neuer Fermentationsorganismen.

Die Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der bio-chemischen Konversion sind hauptsächlich auf die Verbesserung der Fermentationsorganismen sowie Verfahren zur Umwandlung der Zellulose in Glukose anstelle von C-5 Zuckermolekülen ausgerichtet (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 62f). Bei diesen beiden Richtungen verspricht man sich die größten Potentiale zur Kostensenkung. So konnte beispielsweise durch das Engagement des US Department of Energy in Form einer Forschungsförderung eine 30-fache Senkung der Herstellkosten für Fermentationsorganismen erreicht werden (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 279f).

## **PROGNOSTIZIERTE HERSTELLKOSTEN**

BtL-Kraftstoffe werden derzeit nur in Pilotanlagen hergestellt. Hingegen wird die Technologie zur Vergasung von fossilen Energieträgern bereits kommerziell genutzt. Im Jahr 2004 existierten weltweit 117 solcher Anlagen, die nicht nur BtL-Kraftstoffe, sondern auch Chemikalien oder Elektrizität produzieren (NOVOZYMES UND BBI INTERNATIONAL 2005: 23). Weitere 38 Anlagen befinden sich in der Planungsphase und sollen bis 2010 in Betrieb genommen werden können.

Die besonderen Anforderungen des Rohstoffs Biomasse verteuern die zur Herstellung von BtL-Kraftstoff notwendigen Prozesse, so dass eine kommerzielle Produktion bislang noch nicht stattfinden kann. Belastbare Studien zu ökonomischen und ökologischen Betrachtungen werden zurzeit erarbeitet, liegen bislang aber noch nicht vor (FNR 2008b). Schätzungen gehen jedoch davon aus, dass sich die Kosten zur Herstellung von synthetischem Dieselmotorkraftstoff innerhalb der nächsten 5-10 Jahre etwa halbieren und dann bei ca. 0,48 EUR/l liegen werden. Derzeit betragen die Herstellkosten zwischen 0,95 EUR/l und 1,20 EUR/l. Mit einem längeren Zeithorizont von 15 Jahren wären bei dem angenommenen technologischen Fortschritt Herstellkosten von 0,29 EUR/l synthetischen Dieselmotorkraftstoffs möglich.

Ein entscheidender Kostenfaktor für die Zukunft werden die Investitionskosten sein, die zur Umrüstung von Biokraftstoffanlagen der ersten Generation nötig sind. Es gibt verschiedene

Gründe, die eine Angliederung von Anlagen zur Produktion von BtL-Kraftstoffen an bestehende Bioethanol- oder Biodieselanlagen wahrscheinlich machen. Die Rohstoffverfügbarkeit in unmittelbarer Nähe der Produktionsanlage ist unabhängig vom Biokraftstoff ein wesentlicher Kostenfaktor. Bioethanol- und Biodieselanlagen verarbeiten bereits große Mengen von Biomasse. Nebenprodukte mit zellulosen Anteilen, wie beispielsweise Bagasse, können als Rohstoffbasis für die Produktion von BtL-Kraftstoffen dienen. Dabei wirkt sich die Kapazität einer Bioethanol- oder Biodieselanlage über die Rohstoffverfügbarkeit in nicht unerheblichem Umfang auf die Herstellungskosten von BtL-Kraftstoff aus (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 73). Insofern ist die Verbreitung von Biokraftstoffen der nächsten Generation mittelbar mit der Verbreitung von Biokraftstoffen der ersten Generation verknüpft. Bioethanol- und Biodieselanlagen könnten als Kinderstube der BtL-Kraftstoffe dienen (WALLACE 2005).

### 4.3 Die Produkteigenschaften von Biokraftstoffen

Sieht man einmal von Flexible-Fuel-Fahrzeugen ab, die mit Ausnahme von Brasilien als Antriebstechnologie weltweit bislang eine untergeordnete Rolle spielen, dann sind die heute gängigen modernen Motorenkonzepte in erster Linie für den Betrieb mit fossilen Kraftstoffen konzipiert und optimiert. Die für die Antriebsleistung benötigte Energie liegt in mineralischen Kraftstoffen in Form von Kohlenstoffketten vor. Anders bei Energiepflanzen, aus denen Biokraftstoffe gewonnen werden. Hier ist die Energie hauptsächlich in Form von Glucose bzw. Stärke oder Pflanzenöl gespeichert. Daher sind die im vorangehenden Kapitel beschriebenen aufwändigen Prozesse notwendig, um die in Pflanzen gespeicherte Energie in eine Form zu wandeln, die mit den derzeit gängigen Otto- bzw. Dieselmotoren kompatibel ist.

Bis zu welchem Grad dies möglich ist, entscheidet über die Substituierbarkeit fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe und damit in der Konsequenz über deren Verbreitung im Kraftstoffmarkt. Hier zeigt sich hier wieder der Zusammenhang zur Invention, die im Wesentlichen die produktbezogenen Diffusionsfaktoren bestimmt. Deren exponierte Bedeutung wiederum für die Diffusion von Biokraftstoffen spiegelt sich in einer entsprechenden Fokussierung dieses Kapitels wider. Die technischen Eigenschaften von Biokraftstoffen wurden zum Teil bereits in Abschnitt 4.2 untersucht. Darauf aufbauend analysieren die folgenden Ausführungen Biokraftstoffe im Hinblick auf die produktbezogenen Diffusionsfaktoren relativer Vorteil, Kompatibilität, Komplexität sowie Erprobbarkeit und Beobachtbarkeit. Ein Vergleich mit dem mineralischen Substitut identifiziert mögliche Diffusionshemmnisse bei Biokraftstoffen. Hierdurch wird die Grundlage für die Analyse der Förderung der Diffusion von Biokraftstoffen in Kapitel 5 gelegt, welche eben auf den Abbau jener Diffusionshemmnisse abzielen muss. Die Analyse beschränkt sich wiederum im Wesentlichen auf die Biokraftstoffe Bioethanol und Biodiesel.

### 4.3.1 Relativer Vorteil

Der relative Vorteil von Biokraftstoffen wird hauptsächlich durch ihre technische Leistungsfähigkeit bestimmt. Die Bewertung der technischen Leistungsfähigkeit muss bei Substituten stets den Vergleich mit dem Konkurrenzprodukt einschließen. Nicht analysiert werden hingegen weitere von ROGERS (1995: 206ff) genannte Entscheidungskriterien, wie beispielsweise das Ausmaß des Netzwerkcharakters, die Modernität oder nicht-ökonomische Größen. Diese spielen bei Verbrauchsgütern wie Biokraftstoffen für die individuelle Übernahmeentscheidung eine eher untergeordnete Rolle. Überlegungen zum Umwelt- und Klimaschutz sind von zentraler Bedeutung für die Entscheidung einer staatlichen Förderung von Biokraftstoffen. Der Kreis von Adoptern, die in der Vergangenheit bei Ihren Fahrzeugen eine Umrüstung aus Umweltschutzgründen entgegen ökonomischer Gesichtspunkte haben vornehmen lassen, ist jedoch eng begrenzt.

Ein Ansatz zur Operationalisierung des Begriffs der technischen Leistungsfähigkeit stammt von VAN WYK (1984: 102f). Er nimmt eine Unterteilung in Strukturkriterien einerseits, wie etwa Größe und Aufwändigkeit eines Produkts, und Leistungskriterien andererseits vor, bei denen er besonders die Bedeutung der Effizienz einer Innovation für deren Diffusion betont. Ist eine Innovation bei sonst gleichen Bedingungen effizienter als das bereits am Markt befindliche Produkt, so stellt die Innovation als Substitut sicherlich eine Verbesserung dar. Die Beurteilung der Effizienz von Biokraftstoffen wird jedoch dadurch erschwert, dass im Vergleich zu fossilem Kraftstoff sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen vorliegen. Tabelle 4.9 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kriterien zur Beurteilung der Effizienz von Bioethanol, Tabelle 4.10 für Biodiesel.

**Tabelle 4.9** Technische Eigenschaften von Ethanol und Benzin

		Kraftstoff	
		Ethanol	Benzin
<b>Dichte bei 15°C</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	790	750
<b>Heizwert (Durchschnitt)</b>	[MJ/kg]	26,8	43,5
	[MJ/l]	21,17	32,63
	[kWh/l]	5,88	9,06
<b>Kraftstoffäquivalenz</b>	[l]	0,649	1,00
<b>Oktanzahl</b>		107	96
<b>Dampfdruck</b>	[kPa]	16	60/90*
<b>Siedepunkt</b>	[°C]	78	25-215
<b>Sauerstoffgehalt</b>	[Gew-%]	35	0-2

\*Sommer-/Winterkraftstoff (max.)

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN (2001: 35ff), HENNIGES (2007: 21)

Im Vergleich der Kraftstoffarten liegt die Stärke von Bioethanol einerseits in der deutlich höheren Oktanzahl. Bioethanol erfüllt im Gegensatz zu reinem Benzin die Anforderungen moderner Motoren an die Klopfestigkeit des Kraftstoffes. Damit entfällt bei Bioethanol die Notwendigkeit, einen Oktanzahlverbesserer einzusetzen, um unkontrollierte Spontanverpuffungen zu verhindern. Bei Benzin wird zu diesem Zweck MTBE (Methyl-Tertiär-Butyl-Ether) zugesetzt.

Zum anderen fördert ein hoher Sauerstoffgehalt den Wirkungsgrad von Motoren. Gemäß Strukturformel liegt der Sauerstoffgehalt von Bioethanol bei 35%, also deutlich über dem Wert für Benzin. Zur Messung der sich daraus ergebenden Veränderung des Wirkungsgrades eignen sich insbesondere sog. Flexible-Fuel Motoren, die einen Betrieb sowohl mit Benzin als auch in bestimmten Mischungen mit Bioethanol erlauben. SCHMITZ (2003) zeigt, dass bei einem Ford Focus 1,6 l der Wirkungsgrad von 100 PS bei Benzin durch die Verwendung von E85 auf 105 PS gesteigert werden kann.

Gleichzeitig jedoch erhöhte sich der Kraftstoffverbrauch erwartungsgemäß. Bioethanol besitzt einen durchschnittlichen Heizwert von 21,17 MJ/l und liegt damit deutlich unter dem Heizwert von Benzin. In Kraftstoffäquivalenten ausgedrückt entspricht 1 l Bioethanol daher etwa 0,65 l Benzin und 1 l E85 etwa 0,7 l Benzin. Der Mehrverbrauch liegt bei bis zu 30%.

Biodiesel steht in seinen Kraftstoffeigenschaften fossilem Diesel sehr nahe. Viskosität, Dichte und Zündwilligkeit dargestellt, sind technisch gesehen als äquivalent zu beurteilen. Biodiesel zeigt im Vergleich zu Bioethanol auch eine deutlich höhere Kraftstoffäquivalenz, jedoch muss auch bei Biodiesel mit einem höheren Verbrauch im Vergleich zu fossilem Kraftstoff gerechnet werden. Das Kraftstoffäquivalent beträgt bei Biodiesel ca. 0,91, es kann nur zum Teil durch den höheren Wirkungsgrad bei Biodiesel ausgeglichen werden.

**Tabelle 4.10** Technische Eigenschaften von Biodiesel und Diesel

		Kraftstoff	
		Biodiesel	Diesel
<b>Dichte bei 15°C</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	875-900	820-845
<b>Durchschnittlicher Heizwert</b>	[MJ/kg]	37,60	43,00
	[MJ/l]	32,65	35,87
<b>Kraftstoffäquivalenz</b>	[l]	0,91	1,00
<b>Durchschnittliche Cetanzahl</b>		56	50
<b>Kinematische Viskosität</b>	[mm <sup>2</sup> /s]	3,5-5	2,0-4,5
<b>Flammpunkt</b>	[°C]	110	55

Quelle: HENNIGES (2007: 32)

Der erhöhte Kraftstoffverbrauch bei Biodiesel und Bioethanol stellt im Rahmen des produktbezogenen Diffusionsfaktors relativer Vorteil das wohl größte Diffusionshemmnis für Bioethanol dar. Solange er potentiellen Adoptern preislich nicht abgegolten wird, bleiben fossile Kraftstoffe die Alternative mit den relativ vorteilhafteren Eigenschaften.

Mit zunehmender Verbreitung könnte sich bei Bioethanol und insbesondere bei Biodiesel zudem eine Angebotsknappheit bemerkbar machen, wenn auf Importe verzichtet wird. Auf EU Flächen produzierter Biodiesel wird im Jahr 2020 lediglich rund 3,5% des Diesel ersetzen können. Bei Bioethanol beträgt dieser Anteil gut 40% (ZEDDIES 2006b: 22). Von einer vollständigen Substitution konventioneller Kraftstoffe kann daher mittelfristig nicht gesprochen werden. Dies wird erst mit der nächsten Generation von Biokraftstoffen möglich sein.

### **4.3.2 Kompatibilität**

Der Verlauf der Diffusion einer Innovation begründet sich jedoch nicht allein auf der relativen Vorteilhaftigkeit dieser Neuerung. Vielmehr müssen das Produkt und seine Anwendung auch mit den Gegebenheiten vereinbar sein, die in dem Markt vorherrschen, in welchem das Produkt platziert werden soll. ROGERS (1995: 224) unterscheidet drei Dimensionen dieser von ihm als Kompatibilität bezeichneten Produkteigenschaft.

Die erste Dimension der Kompatibilität mit den vorliegenden Bedürfnissen dürfte für Biokraftstoffe im Hinblick auf die bisherigen Ausführungen als gegeben bestätigt werden. Die beiden weiteren Dimensionen sind bezogen auf den potentiellen Adopter und betreffen die Kompatibilität der Innovation mit den vorhandenen Werten und Überzeugungen einerseits sowie die Kompatibilität mit den vorliegenden Bedürfnissen andererseits. Es ist schwer vorstellbar, dass sich eine Innovation entgegen den in einer Gesellschaft gelebten Werten und Überzeugungen am Markt durchsetzen kann. Ein Beispiel hierfür wäre die geringe Akzeptanz der Antibabypille in einigen überwiegend katholischen Gesellschaften (HINTEMANN 2000: 121). Da Umweltschutz eines der Themen ist, welches die deutsche Bevölkerung am meisten beschäftigt, besteht hier eine hohe Kompatibilität mit den vorhandenen Werten. Gleichwohl darf die gesellschaftliche Akzeptanz eines Anbaus von Energiepflanzen auf umgewandelten Regenwaldflächen bezweifelt werden. Auch der Import von Biokraftstoffen kann zu einem Verlust der gesellschaftlichen Akzeptanz führen. Unter Klimaschutzaspekten ist der Import möglicherweise der heimischen Produktion von Biokraftstoffen vorzuziehen. Gleichzeitig bedeutet dies aber auch einen Verlust an Arbeitsplätzen, der nicht mit den gesellschaftlichen Werten in Europa vereinbar ist. Durch eine entsprechende Ausgestaltung der Förderung von Biokraftstoffen lässt sich dies jedoch weitestgehend verhindern. Insofern kann die Kompatibilität von Biokraftstoffen mit gesellschaftlichen Werten hier grundsätzlich bestätigt werden.

Die für diese Untersuchung relevante Dimension ist die Kompatibilität der Innovation mit den im jeweiligen Markt vorhandenen Techniken, Produkten oder Handlungsweisen. Die Nutzung

von Kraftstoffen ist zumindest mittelfristig an die vorhandenen Motorenkonzepte gekoppelt, die bislang hauptsächlich auf fossile Kraftstoffe ausgerichtet sind. Kritisch für die Diffusion von Biokraftstoffen ist also vor allem die Vereinbarkeit mit den vorhandenen Motorenkonzepten. Die höchste Vereinbarkeit versprechen Bioethanol und Biodiesel. Trotz einiger Schwierigkeiten, auf die im Folgenden näher eingegangen wird, sind diese die einzigen Biokraftstoffe, die bereits flächendeckend eingesetzt werden. Demgegenüber bildet Biowasserstoff aufgrund des Technologiewechsels und dem hierzu nötigen Aufbau eines Tankstellennetzes erst langfristig eine Alternative zu fossilen Kraftstoffen und anderen Biokraftstoffen.

Der größte Anteil von Bioethanol findet in Deutschland als Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen Verwendung. Für diesen Zweck eignet sich ausschließlich reines Ethanol, weshalb hier höhere Herstellkosten als bei wasserhaltigem Ethanolreinkraftstoff anfallen. Wie eben dargestellt zeichnet sich Bioethanol jedoch durch eine hohe Klopfestigkeit aus und kommt daher als Oktanzahlverbesserer für Benzin in Frage (SCHMITZ 2003: 53). Zu diesem Zweck wird Benzin derzeit noch MTBE zugesetzt. Im Hinblick auf den Heizwert ist der Einsatz von Bioethanol zur Verbesserung der Oktanzahl als nachteilig einzustufen. Der Heizwert von MTBE liegt mit 26,10 MJ/l deutlich über dem Heizwert von Bioethanol. Allerdings wird der Einsatz von MTBE recht kontrovers diskutiert, da es im Verdacht steht, krebserregend zu sein. Insbesondere besteht auch die Gefahr, dass MTBE ins Grundwasser entweicht, wo es nicht abgebaut werden kann (PAHLKE et al. 2000: 2). Die gesellschaftliche Akzeptanz von MTBE ist in den letzten Jahren deutlich gesunken.

Die Beimischung von Bioethanol zu konventionellem Kraftstoff unterliegt aufgrund des hohen Sauerstoffgehalts von Bioethanol einer Beschränkung. Ohne spezielle Kennzeichnung dürfen Ottokraftstoffe in der EU einen Sauerstoffgehalt von maximal 2,7% enthalten (RICHTLINIE 98/70/EG 1998). Sauerstoff fördert zwar die Verbrennung und erhöht den Wirkungsgrad von Motoren. Bei steigendem Anteil von Bioethanol sinkt allerdings auch der Energiegehalt des Gemisches und der Kraftstoffverbrauch steigt. Das Bioethanol jedoch 35% Sauerstoff enthält, ist die Beimischung von Bioethanol auf höchstens 5% beschränkt. Typischerweise ist daher auch die Garantie der Autohersteller auf diesen Wert begrenzt, während in den USA oder Kanada in der Regel E10 verwendet wird und die Garantie der Autohersteller entsprechend höher ausfällt.

Technische Probleme ergeben sich jedoch in erster Linie durch den unterschiedlichen Dampfdruck von Bioethanol und Benzin. Der Dampfdruck ist ein Maß für die Flüchtigkeit eines Kraftstoffes und zentrale Voraussetzung für dessen Einsatz im Ottomotor, um ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch zu ermöglichen (HENNIGES 2007: 25). Sommer-(Winter-) Ottokraftstoffe dürfen nur einen Dampfdruck von höchstens 60 (90) kPa aufweisen. Obschon Bioethanol einen wesentlich geringeren Dampfdruck von 16 kPa aufweist, kommt es bei Beimischung von Bioethanol zur sog. Dampfdruckanomalie. Im Vergleich zu reinem Benzin fällt

der Dampfdruck nicht etwa geringer aus, sondern steigt zunächst an. Bei einem Anteil von 5% Bioethanol ist der Dampfdruck am höchsten und fällt erst bei einem Anteil von 40% unter die zulässige Höchstgrenze von 60 kPa (GUDERJAHN 2005). Heute bieten sich zwei Wege der technischen Lösung an. Zum einen wird konventionellem Ottokraftstoff beispielsweise in Frankreich und Spanien anstelle von Bioethanol das aus selbigem gewonnene ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether) beigemischt. Mit denselben chemischen Eigenschaften wie MTBE lassen sich bei ETBE auch dieselben Nachteile identifizieren und hierbei insbesondere die vermutete karzinogene Wirkung. Darüber hinaus legt auch der Energieverlust von rund 20% bei der Umwandlung von Bioethanol zu ETBE eine andere technische Lösung nahe. So wird in vielen europäischen Ländern und allen voran in Schweden der Dampfdruck von Benzin vor der Beimischung von Bioethanol herabgesetzt und so die Erhöhung des Dampfdrucks durch die Beimischung von Bioethanol kompensiert (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 16).

Die bereits angesprochene Wasseraffinität von Bioethanol ist die dritte Schwierigkeit, die bei der Beimischung von Bioethanol entsteht. Wasser entzieht dem Gemisch den Ethanolanteil, so dass die Oktanzahl wieder auf das Niveau von Benzin sinkt. Bei der Beimischung von Bioethanol zu fossilem Benzin entstehen daher weitere Kosten, um die Klopfestigkeit des Gemischs zu garantieren.

Im Vergleich zu Benzin besitzt Bioethanol einige technische Vorteile, die sich im Hinblick auf die Beimischung von Bioethanol positiv auf die Motorenleistung auswirken. Schwierigkeiten können mit einem zu rechtfertigenden technischen Aufwand gelöst werden. Hingegen können Ottomotoren aus technischen Gründen nicht ohne Modifikationen mit Ethanolreinkraftstoff betrieben werden. Bioethanol als Reinkraftstoff stellt höhere Ansprüche an die verwendeten Materialien in Ottomotoren als Benzin, da es reaktionsfreudiger als die unterschiedlichen Kohlenwasserstoffe in Benzin ist. Der Korrosion von Stahlbauteilen und der Zersetzung von Farb- und Lackanstrichen kann durch einfache Korrosionsschutzmittel Abhilfe geschaffen werden. Aus Elastomeren bestehende Bauteile wie Gummidichtungen und Schläuche müssen ausgewechselt werden, da hier die Funktionsfähigkeit der Teile durch mögliches Aufquellen vermindert wird. Insgesamt lassen sich die genannten Schwierigkeiten jedoch weitestgehend problemlos lösen (HENNIGES 2007: 24f sowie SCHÜTTEL 2006: 45).

Die Tendenz geht dabei weg von reinen Materialanpassungen zu sog. Flexible-Fuel Motoren, die seit 1992 in den USA erhältlich sind und in jüngerer Zeit auch in Schweden und Kanada eingesetzt werden. Insgesamt beläuft sich die Zahl der Fahrzeuge, die mit Flexible-Fuel Motoren ausgerüstet sind auf rund 6 Mio. zu Beginn des Jahres 2006 (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 252). Nahezu alle großen Autohersteller bieten diese E85 Flexible-Fuel Motoren an, darunter Daimler, General Motors, Ford, Nissan und Mazda (NATIONAL ETHANOL VEHICLE COALITION ). Diese Motoren sind in der Lage, mit beliebigen Mischungen von bis zu 85%

Bioethanol und Benzin zu laufen<sup>19</sup>. Dazu verfügen sie über Sensoren, die automatisch den Bioethanolanteil im Tank erkennen. Die Elektronik des Motors kalibriert sich daraufhin selbstständig, ohne dass ein Eingreifen des Fahrers notwendig wäre. 2003 kam in Brasilien eine Variante des E85 Flexible-Fuel Motoren auf den Markt, die auch den Betrieb mit reinem Bioethanol ermöglicht sowie jeglichen Mischungen von E20/E25 und E100. Dieser Flexible-Fuel Motor wurde sofort zum Verkaufsschlager, da E100 in Brasilien teils deutlich günstiger ist als das E20/E25 Gemisch. Entgegen der Situation in Europa oder den USA wird E100 in Brasilien ebenso wie E20/E25 an fast jeder Tankstelle in Brasilien angeboten. Rund 70% der im Dezember 2005 verkauften Autos sind mit dieser Motorenart ausgerüstet und seit 2003 wurden insgesamt mehr als 1,3 Mio. Fahrzeuge verkauft. Die dritte Generation von Flexible-Fuel Motoren steht derzeit kurz vor ihrer Marktreife. Diese Motoren werden sowohl mit reinem Benzin und Bioethanol, als auch mit allen Mischungsverhältnissen laufen.

Bei Biodiesel stellt sich die Situation ähnlich dar. Auch hier besteht die größte Herausforderung in dessen Materialverträglichkeit sowie den Lagerungseigenschaften. Die gängigerweise für den Einsatz von fossilem Diesel verwendeten Dichtungen und Leitungen müssen durch solche Kunststoffe ersetzt werden, die resistent gegenüber Biodiesel sind und daher beim Kontakt mit Biodiesel nicht aufquellen. Das Aufquellen birgt zudem die Gefahr, dass Biodiesel in die Motorölkammer eintritt, wodurch es zu Motorölverdünnungen kommen kann. Zu den Eigenschaften von Biodiesel gehört darüber hinaus, dass es sich dabei um ein äußerst wirkungsvolles Lösungsmittel handelt. Bei langjährigem Betrieb mit fossilem Diesel bilden sich Ablagerungen in der Kraftstoffleitung und im Tank. Die Lösungseigenschaften gehen so weit, dass diese gelöst werden und den Kraftstofffilter verstopfen.

Grundsätzlich betont BOCKEY (2005a: 3, 2005b:175), dass moderne Dieselmotoren auf fossilen Dieselmotoren hin optimiert sind. Um den daraus resultierenden Nachteilen für Biodiesel zu begegnen, muss Biodiesel an den Motor angepasst werden. Dazu wurde in Deutschland die Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel (AGQM) gegründet. Erste Resultate ermöglichen eine verbesserte Lagerfähigkeit von Biodiesel. Durch Einsatz von Additiven wird die Oxidationsanfälligkeit von Biodiesel vermindert und so Ablagerungen an Einspritzdüsen und Brennraum gesenkt (HENNINGES 2007: 34). Entwicklungsbedarf für die Anpassung von Biodiesel besteht aber weiterhin.

Trotz der genannten Schwierigkeiten beim Einsatz von Biokraftstoffen in konventionellen Motoren, soll im Folgenden die Kompatibilität als erfüllt betrachtet werden. Dafür spricht auch, dass in den meisten Fällen eine entsprechende Umrüstung der Motoren zum Betrieb mit Bioethanol und Biodiesel mit geringen Kosten möglich ist.

---

<sup>19</sup> Der Grund für die Beschränkung auf einen Anteil von 85% Bioethanol liegt hauptsächlich in der Kaltstartproblematik. Diese Generation verfügt noch nicht über ein Kaltstartsystem (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 252).

### **4.3.3 Komplexität**

Die Schwierigkeiten von potentiellen Adoptern, eine Innovation zu verstehen oder auch anzuwenden, stellen ein bedeutendes Diffusionshemmnis dar. Je komplexer eine Innovation ist, desto größer ist auch die Unsicherheit über den Nutzen eines Produktes beim potentiellen Adopter und folglich sinkt der Erwartungswert des Nutzens. Zwar kann der potentielle Adopter beispielsweise durch Informationssuche die Komplexität des Produktes verringern, jedoch sind diese Anstrengungen mit erhöhten Transaktionskosten verbunden, die ähnlich wie ein Preisaufschlag zu bewerten sind, und entsprechend diffusionshemmend wirken. Obwohl die technische Kompatibilität von Biokraftstoffen mit den vorhandenen Motorenkonzepten wie eben dargestellt äußerst komplex ist, so tragen doch die Motorenfreigaben der diversen Autohersteller wesentlich zur Verringerung der Komplexität von Biokraftstoffen bei. Die größten Unsicherheiten bestehen dann in der Höhe des zusätzlichen Kraftstoffverbrauchs. Dem könnte jedoch vergleichsweise einfach entgegengewirkt werden, indem an Tankstellen analog zur Regelung im Lebensmittelbereich eine Vergleichsgrundlage beispielsweise auf Basis des Energiegehalts angegeben wird.

### **4.3.4 Erprobbarkeit und Beobachtbarkeit**

Gerade bei komplexen Innovationen ist die Möglichkeit einer probeweisen Anwendung der Innovation besonders bedeutend. Hierdurch wird die bestehende Unsicherheit über die Innovation verringert und der Nutzen der Neuerung kann unter individuellen Bedingungen ermittelt werden. Dies betrifft insbesondere das Frühstadium der Innovation. Ist erst eine gewisse Verbreitung erreicht, so sinkt die Unsicherheit aufgrund der Erfahrungen früherer Adopter (ROGERS 1995: 243).

Bei Verbrauchsprodukten ist die Erprobbarkeit in der Regel jedoch unproblematisch. Die Produktentscheidung ist bei Verbrauchsgütern nicht von langfristig bindender Natur. Nach dem Verbrauch des Gutes muss die Adoptionsentscheidung erneut getroffen werden und kann zu Gunsten eines anderen Gutes ausfallen. Biokraftstoffe bilden unter den Verbrauchsgütern jedoch einen Sonderfall. Für die Nutzung von Biodiesel als Reinkraftstoff oder Bioethanol als E85 sind wie beschrieben Anpassungen der Motoren vorzunehmen und diese gegebenenfalls an das jeweilige Gemisch anzupassen. Daher ist die Erprobbarkeit von Biokraftstoffen in Europa nur eingeschränkt gegeben. Anders in Brasilien, wo Flexible-Fuel Motoren eine große Bandbreite möglicher Mischungsverhältnisse abdecken. Daher müssen die Informationsdefizite hinsichtlich der Eigenschaften der Biokraftstoffe auf andere Weise behoben werden. Es besteht kein Zweifel daran, dass die Kenntnis der Eigenschaften von Biokraftstoffen sowie das Vertrauen der potentiellen Adopter in diese für die Diffusion von Biokraftstoffen entscheidend sind. Eine Möglichkeit, die daher in Europa und Brasilien gleichermaßen ergriffen wurde, ist die Zertifizierung des Biokraftstoffs. Europäische und brasilianische Normen ge-

währleisten eine Biokraftstoffqualität, die der potentielle Adopter als Basis seiner Übernahmeentscheidung nutzen kann.

Ähnlich zur eigenständigen Erprobung lassen sich einige Innovationen mittels Beobachtung bei anderen Adoptern beurteilen. Bei Biokraftstoffen sind die Leistung sowie die Qualität der Innovation jedoch nur sehr eingeschränkt durch Beobachtungen abzuschätzen. Beobachtungen bei anderen Adoptern sind meist nur während eines kurzen Zeitraums möglich. Etwaige Qualitätsnachteile gegenüber fossilen Kraftstoffen, wie beispielsweise das Aufquellen von Dichtungen, offenbaren sich erst in einer wesentlich längeren Frist. Darüber hinaus wird die Möglichkeit zur Beobachtung dadurch eingeschränkt, dass den wenigsten Fahrzeugen anzusehen ist, welcher Kraftstoff getankt wurde und welche Leistung der Kraftstoff beim jeweiligen Fahrzeug erbringt. Die potentiellen Adopter können sich bei der Übernahmeentscheidung also nur bedingt auf die Beobachtung ihrer Umwelt stützen. Nach ROGERS (1995: 244) stellt dies ein Diffusionshemmnis dar. Auch können Biokraftstoffe daher keinen Prestigeeffekt für sich in Anspruch nehmen, da dieser direkt mit der Darstellbarkeit der Adoption gekoppelt ist (HINTEMANN 2000: 123).

#### 4.4 Zusammenfassung

Die Ausführungen in diesem Kapitel haben verdeutlicht, wie unterschiedlich verschiedene Biokraftstoffarten in ihren technischen Eigenschaften, Herstellkosten oder ihrem Potential zur umfangreichen Substitution mineralischer Kraftstoffe sind. Daher ist es kaum möglich, ein generelles Bild von Biokraftstoffen zu entwerfen. Dies verschärft sich noch, wenn, wie in Kapitel 5, der mögliche Beitrag von Biokraftstoffe zu verschiedenen Zielen, wie etwa Klimaschutz, Ressourcenschonung oder der Schaffung von Arbeitsplätzen, untersucht wird.

Zusammenfassend können im Hinblick auf die drei Zielsetzung des Kapitels folgende Schlussfolgerungen gezogen werden. Zunächst ist festzuhalten, dass nicht alle Biokraftstoffe gleichermaßen das Potential besitzen, einen signifikanten Teil der Kraftstoffnachfrage in Zukunft zu decken. Biodiesel schneidet unter den untersuchten Biokraftstoffen am schlechtesten ab. Heute entfällt der weitaus überwiegende Anteil von Biokraftstoffen auf Biodiesel. Damit ist das Potential von Biodiesel zur Substitution mineralischen Diesels jedoch auch fast schon erschöpft. Eine umfangreichere Substitution von mineralischen Kraftstoffen ist mit dem Biokraftstoff Bioethanol möglich. Schätzungen gehen davon aus, dass im Jahr 2020 etwa 40% des Benzinbedarfs in der Europäischen Union durch Bioethanol aus heimischem Anbau gedeckt werden könnten. Die Rückschlüsse auf die Förderung der verschiedenen Biokraftstoffe liegen hier auf der Hand. Umfangreiche Förderungen von Forschung und Entwicklung von Biodiesel müssen zumindest kritisch hinterfragt werden. Vielmehr gilt es, die kommerzielle Nutzung von Biokraftstoffen der zweiten Generation voranzutreiben. Ihr Potential zur De-

ckung eines umfangreichen Kraftstoffbedarfs übersteigt das von Biodiesel und Bioethanol. Detailliert wird die Förderung von Biokraftstoffen jedoch in Kapitel 5 diskutiert.

Weiterhin zeigen die Ausführungen, dass Biokraftstoffe in Deutschland und Europa bislang nur in wenigen Ausnahmefällen konkurrenzfähig gegenüber dem mineralischen Substitut sind. Studien von LEVELTON (2002), WOODS et al. (2003) oder JUNGMEIER et al. (2003) zeigen, dass dies beispielsweise bei der Produktion von Biodiesel aus Altspeisefetten der Fall ist. Anders in Brasilien, wo Biokraftstoffe heute auch ohne staatliche Förderung einen Anteil von rund 50% am Kraftstoffmarkt besitzen. Die Herstellkosten von Biokraftstoffen werden mittelfristig jedoch auch in Europa deutlich sinken. Insbesondere werden Kostenreduktionen bei Biokraftstoffen der zweiten Generation erwartet. Skaleneffekte bei steigenden Produktionskapazitäten leisten hierzu jedoch nur einen geringen Beitrag. Die weitaus größte Kostenposition stellen bei Biodiesel und Bioethanol die jeweiligen Rohstoffkosten dar. Von den Rohstoffkosten hängt die Wettbewerbsfähigkeit eines Biokraftstoffs ab. Detailliert wurde dies für Biodiesel untersucht. Im Ergebnis konnten die Veränderungen der Herstellkosten im Zeitverlauf ermittelt werden. Die starken Schwankungen in den Rohstoffkosten führen zu einer ebenso starken Veränderung der Wettbewerbsfähigkeit dieses Biokraftstoffs. Jegliche Förderung zur Stärkung der Konkurrenzfähigkeit von Biokraftstoffen muss diesen Zusammenhang beachten und flexibel darauf reagieren, soll die Förderung erfolgreich sein. Bei BtL-Kraftstoffen ist die Bedeutung der Rohstoffkosten hingegen geringer. Die Rohstoffkosten für die zellulösen Pflanzenbestandteile liegen deutlich niedriger als die Preise für Raps oder Zuckerrüben. Kostensenkungen beim vergleichsweise aufwändigen Produktionsprozess wirken sich daher deutlicher auf die Herstellkosten aus als bei anderen Biokraftstoffen.

Zuletzt haben die Ausführungen gezeigt, dass Bioethanol und Biodiesel keine perfekten Substitute für fossile Kraftstoffe sind. Unter den produktspezifischen Bestimmungsfaktoren bestehen besonders im Hinblick auf den relativen Vorteil sowie der Kompatibilität ernsthafte Diffusionshemmnisse. So weisen Biokraftstoffe einen geringeren Energiegehalt auf als fossile Kraftstoffe. Dieses Diffusionshemmnis muss über einen geringeren Marktpreis abgeglichen werden, sonst ist nicht mit einer weiteren Verbreitung von Biokraftstoffen zu rechnen. Bei der Kompatibilität von Biokraftstoffen mit den gängigen Motorenkonzepten kommt die Analyse zu einem zweifachen Ergebnis. Zunächst lassen sich sowohl Otto- als auch Dieselmotoren mit geringem finanziellen Aufwand so umrüsten, dass auch Mischungen mit einem höheren Biokraftstoffanteil möglich werden. Gleichzeitig jedoch müssen die in Europa gängigen Motoren auf jedes neue Gemisch eingestellt werden. Der hieraus resultierende Zeitaufwand stellt ein starkes Diffusionshemmnis für die Verbreitung von Biokraftstoffen dar. Die Diffusionshemmnisse bei der Erprobbarkeit und Beobachtbarkeit der Qualität von Biokraftstoffen hingegen lassen sich deutlich einfacher beheben. Durch die Zertifizierung von Biokraftstoffen sind bestehende Informationsdefizite verhältnismäßig einfach zu verringern.

Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass Biokraftstoffe zwar keine vollkommen Substitute für mineralische Kraftstoffe sind. Trotzdem sind sie geeignet, einen großen Teil des Kraftstoffbedarfs in Deutschland und Europa zu decken. Das größte Diffusionshemmnis besteht bei Biokraftstoffen in der mangelnden Konkurrenzfähigkeit gegenüber mineralischen Kraftstoffen. Die Ausführungen des folgenden Kapitels werden zeigen, inwiefern die Förderung von Biokraftstoffen in der Lage ist, die Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen zu verbessern und auch andere bestehende Diffusionshemmnisse abzubauen.

## 5 DIE STAATLICHE FÖRDERUNG VON BIOKRAFTSTOFFEN

Die Analyse des Diffusionsprozesses und der Diffusionsfaktoren, wie sie auch in den vorhergehenden Kapiteln vorgenommen wurde, bildet den Ausgangspunkt für den dritten Schwerpunkt in der Diffusionsforschung. Dieser besteht in der Untersuchung der staatlichen Förderung des Diffusionsprozesses.

Zunächst stellt sich dabei natürlich die Frage, warum der Staat überhaupt aktiv die Verbreitung von Innovationen beeinflussen sollte und den Ablauf nicht vielmehr dem freien Spiel der Markt- und Wettbewerbskräfte überlässt (STREIT 1991: 12). Dieser Frage wird in Abschnitt 5.1 nachgegangen. Üblicherweise werden Staatseingriffe mit dem Vorliegen von Marktversagen gerechtfertigt. In der Tat können Treibhausgasemissionen infolge ihrer Klimawirkung als Externalitäten klassifiziert werden, so dass der Endverbraucherpreis weder bei mineralischen noch bei biogenen Kraftstoffen die tatsächlichen Kosten und Nutzen zureichend widerspiegelt. Für eine nähere Erörterung des Vorliegens von Externalitäten wird jedoch auf PITAFI et al. (2006), BROWN (1974), BABU et al. (1997) und TAHVONEN (1997) verwiesen. Vielmehr wird untersucht, ob Biokraftstoffe geeignet sind, um die Ziele zu erreichen, die üblicherweise mit ihrer Verbreitung assoziiert bzw. angestrebt werden. Dazu gehört die Frage der Klimawirkung von Biokraftstoffen ebenso wie die Möglichkeit zur Schonung knapper Ressourcen, die Sicherung der Energieversorgung oder die nachhaltige Entwicklung ländlicher Gebiete. Umgekehrt jedoch besteht durch den verstärkten Anbau von Energiepflanzen jedoch auch die Gefahr, dass die Flächenkonkurrenz zu einem gefährlichen Rückgang der Lebensmittelproduktion führt.

Die Antwort auf die Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen ist dabei noch vergleichsweise einfach zu finden. Deutlich schwieriger lassen sich Ergebnisse im Hinblick auf den zweiten Untersuchungsschwerpunkt dieses Kapitels ermitteln. Es soll, ähnlich wie bei KEMP (1997), analysiert werden, inwiefern das vorhandene Instrumentarium staatlicher Fördermaßnahmen geeignet ist, die bestehenden Diffusionshemmnisse abzubauen und so die Verbreitung von Biokraftstoffen zu fördern. Inwiefern ein Instrument tatsächlich geeignet ist, hängt dabei nicht nur davon ab, ob eine entsprechende Beeinflussung des Diffusionsprozesses erreicht werden konnte. Tatsächlich muss neben der Effektivität der Zielerreichung auch die Kosteneffizienz der jeweiligen Maßnahme beurteilt werden. Möglicherweise übersteigen die Kosten einer Maßnahme den hieraus erzielten Nutzen oder ein anderes Instrument führt zu besseren Ergebnissen. Diese Arbeit beschränkt sich dabei auf eine qualitative Bewertung der möglichen oder im konkreten Fall eingesetzten Instrumente zur Förderung der Verbreitung von Biokraftstoffen. Zur quantitativen Beurteilung und dem weiten Feld der Kosten-Nutzen-Analysen empfiehlt sich CARSON/HANEMANN (2005), AHLHEIM et al. (2006) oder BRENT (2006).

Hierzu werden in Abschnitt 5.2 zunächst die Instrumente vorgestellt, durch welche der Staat die Verbreitung von Biokraftstoffe fördern kann, bevor die konkreten Maßnahmen zur Förderung von Biokraftstoffen in Deutschland und Brasilien dargestellt werden. Die Ausführungen in diesem Kapitel zur Effektivität und Effizienz des Förderinstrumentariums beschränken sich zunächst auf eine theoretische Analyse. Ergänzt werden sie im folgenden Kapitel 6, welches den Blick auf die realen Gegebenheiten fokussiert und die Wirkung der Fördermaßnahmen auf die Verbreitung von Biodiesel in Deutschland untersucht.

## 5.1 Die Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen

### 5.1.1 Die Klimawirkung von Biokraftstoffen

Biokraftstoffe werden bevorzugt öffentlichkeitswirksam als CO<sub>2</sub>-neutral dargestellt. Dahinter steht der Gedanke, dass die bei der Kraftstoffverbrennung entstehenden Treibhausgase der Atmosphäre zuvor durch den Anbau der Energiepflanzen entzogen wurden. Zur Erzeugung von Biokraftstoffen muss in den meisten Fällen jedoch zusätzlich fossile Energie eingesetzt werden, beispielsweise in Form von Kunstdünger oder Pestiziden (ITAS 2006: 37). Während es in der Vergangenheit vorkam, dass der fossile Energiebedarf zur Produktion von Biokraftstoffen deren Energiegehalt überstieg, weisen Biokraftstoffe heute in der Regel eine positive Energie- und Klimabilanz auf (REINHARDT 1999: 21f, HENKE/KLEPPER 2006: 9).

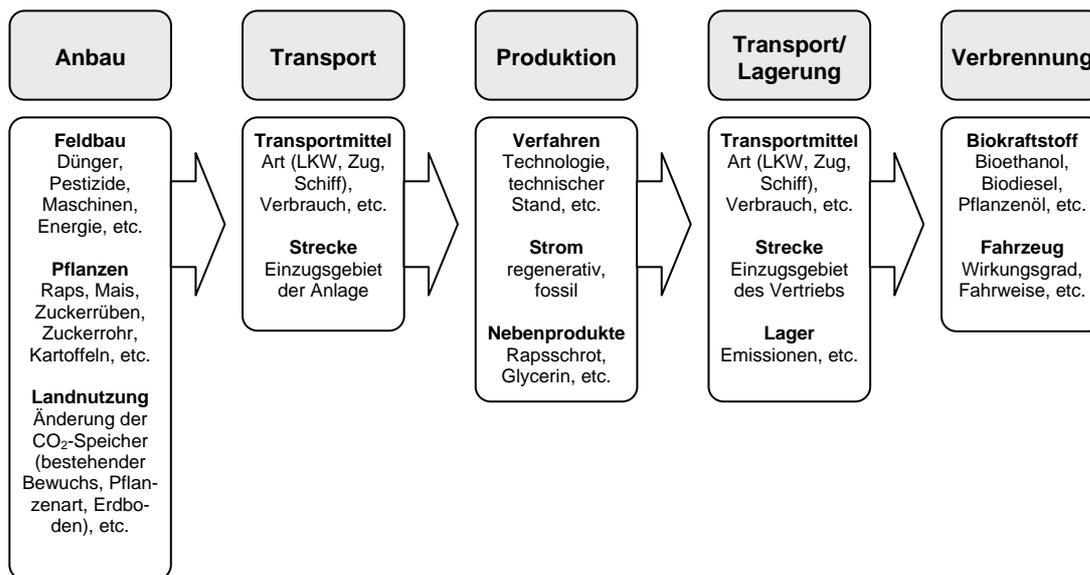
Die Strategie Deutschlands zur Erreichung seiner Klimaziele schließt daher den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen im Straßenverkehr ein. Deutschland hat sich 1998 im Kyoto-Protokoll zu einem verbindlichen Klimaziel verpflichtet. Zwischen 2008 und 2012 soll der Ausstoß von Treibhausgasen im Vergleich zu 1990 um 21 % sinken (KYOTO PROTOKOLL 1998). Im Rahmen des sog. Burden Sharing der Europäischen Union stimmte Deutschland einer Erhöhung dieses Ziel auf 24% zu.

Eine effiziente Klimapolitik zur Erreichung dieses Ziels muss darauf ausgerichtet sein, die einzelnen zur Verfügung stehenden Minderungsoptionen entsprechend der Höhe ihrer spezifischen Kosten zu ergreifen. Inwiefern die Förderung von Biokraftstoffen aus klimapolitischen Gründen tatsächlich gerechtfertigt ist, wird in diesem Abschnitt erörtert. Dazu werden zunächst das Potential von Biokraftstoffen zur Vermeidung von Treibhausgasen sowie die Kosten dieser Emissionsvermeidung ermittelt. Im Anschluss werden die ermittelten Ergebnisse einem Vergleich mit alternativen und möglicherweise kostengünstigeren Minderungsoptionen unterzogen. Aus diesem Vergleich wird abgeleitet, ob und welche Form der Förderung von Biokraftstoffen und klimapolitischen Gesichtspunkten Ziel führend ist.

## CO<sub>2</sub>-MINDERUNG DURCH BIOKRAFTSTOFFEN

Zur Bestimmung der Klimawirkung von Biokraftstoffen bzw. ihrem Potential zur Minderung der Treibhausgasemissionen, muss der gesamte Lebenszyklus analysiert werden. Abbildung 5.1 zeigt schematisch den Lebenszyklus von Biokraftstoffen mit einer Auswahl verschiedener Faktoren, anhand derer sich die Klimawirkung von Biokraftstoffen bestimmt.

**Abbildung 5.1** Emissionsfaktoren von Biokraftstoffen im Lebenszyklus



Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildung zeigt deutlich, dass zunächst einmal nicht pauschal von der Klimawirkung von Biokraftstoffen gesprochen werden kann. Es muss stets zwischen verschiedenen Biokraftstoffen unterschieden werden. Der Anbau von Raps hat eine andere Wirkung auf die CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Erde als Zuckerrüben und auch die Pflanze selbst besitzt eine andere Speicherkapazität als andere Energiepflanzen. Damit aber nicht genug, auch innerhalb einer Biokraftstoffart lässt sich keine allgemein gültige Aussage zur Klimawirkung des Biokraftstoffs treffen. Vergleicht man die Produktion von Biodiesel an verschiedenen Standorten, dann unterscheiden sich nicht nur die Transportstrecke und das gewählte Transportmittel, sondern auch die Stromgewinnung zur Produktion und das Produktionsverfahren.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Berechnung der Klimabilanz von Biokraftstoffen höchst sensitiv gegenüber den getroffenen Annahmen über die Einflussfaktoren ist. So unterstellen beispielsweise LEIBLE et al. (2006) unterschiedliche Arten der Stromerzeugung für die Produktion von Bioethanol. Wird für die Stromerzeugung eine Biogasanlage eingesetzt, dann lassen sich durch den Ersatz von Benzin durch Bioethanol rund 94% der Treibhausgasemissionen einsparen. Wird jedoch Strom aus einem Braunkohlekraftwerk verwendet, dann

schrumpft dieser Wert auf 7%. Ähnlich gehen auch SCHINDLER/WEINDORF (2006) oder SENN (2003) in ihren Untersuchungen vor.

Weiterhin stehen hinter Abbildung 5.1 implizit Annahmen über Systemgrenzen. Eine vollständige Erfassung der Emissionsfaktoren von Biokraftstoffen ist aufgrund des prohibitiv hohen Informationsaufwands zur Ermittlung der Emissionsfaktoren und deren Quantifizierung nicht möglich (VOß 1991: 78, UN 2007: 48). So müssen Untersuchungen zur Klimawirkung von Biokraftstoffen Annahmen über die Systemgrenzen treffen. Im Idealfall schließen die Systemgrenzen alle relevanten Emissionsfaktoren ein, also alle Emissionsfaktoren, die einen signifikanten Einfluss auf die Klimawirkung von Biokraftstoffen haben. Eben diese Relevanz einiger Emissionsfaktoren wird in verschiedenen Studien recht unterschiedlich beurteilt. So schließen die Systemgrenzen zwar meist den Energieverbrauch beim Einsatz von Landmaschinen, nicht jedoch den Energiebedarf von Erntehelfern mit ein (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 177). Nach QUIRIN et al. (2004a, b) resultieren die unterschiedlichen Schätzungen des CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials von Biokraftstoffen hauptsächlich aus den getroffenen Annahmen über die Anbauart sowie die Verwendung der anfallenden Nebenprodukte. Dieses Ergebnis basiert auf der Untersuchung von mehr als 800 Studien, von denen 69 detailliert analysiert wurden, und wird größtenteils durch LARSON (2005) bestätigt. Abhängig von den betrachteten Systemgrenzen ermitteln einzelne Studien auch eine negative Klimawirkung von Biokraftstoffen. Beispielsweise schätzt PIMENTEL (1991, 2001) die zusätzlichen Treibhausgasemissionen durch Ethanol auf Maisbasis rund 30% höher als bei mineralischem Benzin. Zu ähnlichen Resultaten kommen auch PIMENTEL/PATZEK (2005). Die Vorgehensweise dieser Untersuchungen ist jedoch insofern zweifelhaft, als auf eine Energiezurechnung zu den Nebenprodukten der Ethanolerzeugung vollständig verzichtet wird (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 178).

Es gilt also festzuhalten, dass die Klimawirkung von Biokraftstoffen im Wesentlichen von der Art des Kraftstoffs, den gezogenen Systemgrenzen und den Annahmen zu den verschiedenen Emissionsfaktoren abhängt. Im Folgenden soll nun ein Überblick über die Klimawirkung von Biokraftstoffen gegeben werden. Hierzu wurden in Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 aktuelle Studien mit den jeweiligen Ergebnissen zum CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotential von Biokraftstoffen aufgelistet. Entsprechend den Ausführungen dieses Abschnitts wird dabei einerseits zwischen den Biokraftstoffarten Bioethanol und Biodiesel und andererseits zwischen den verschiedenen Energiepflanzen unterschieden. Hinsichtlich der Systemgrenzen konnte bei der Auswahl der Studien keine einheitliche Vorgehensweise sichergestellt werden. Das liegt natürlich zum einen an der begrenzten Zahl der Studien, zum anderen an der teilweise mangelhaften Beschreibung der Systemgrenzen. Da es an dieser Stelle jedoch nicht um einen exakten Wert für das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von Biokraftstoffen sondern um die Abschätzung einer Größenordnung geht, stellen uneinheitliche Systemgrenzen nur eine geringe Einschränkung dar. Zunächst soll die Klimawirkung von Bioethanol näher betrachtet werden, im Anschluss daran die Klimawirkung von Biodiesel.

**Tabelle 5.1** CO<sub>2</sub>-Vermeidung im Lebenszyklus von Bioethanol als Reinkraftstoff

	<b>Studie</b>	<b>Vermeidung von CO<sub>2</sub> durch den Ersatz von Benzin (%)</b>
<b>Getreide</b>	WUPPERTAL INSTITUT (2005)	45
	ARMSTRONG et al. (2002)	47
	LEVY (1993)	32-35
	GOVER et al. (1996)	47
	LEIBLE et al. (2006)	94*/-7**
<b>Mais</b>	FARRELL et al. (2006)	20-32
	MARLAND/TURHOLLOW (1991)	21
	WANG (2001)	25
	LEVELTON (2002)	38
<b>Zuckerrübe</b>	LEVY (1993)	35-56
	ARMSTRONG et al. (2002)	35-56
	GENERAL MOTORS (2002)	41
	WUPPERTAL INSTITUT (2005)	56
	LEIBLE et al. (2006)	34
<b>Zuckerrohr</b>	MACEDO et al. (2004)	87-96***
	LOIS CORREA (2002)	83
	BEER et al. (2002)	49-55

*\*Strom aus Biogasanlage \*\*Strom aus Braunkohlekraftwerk \*\*\*abhängig vom Wassergehalt*

Quelle: Eigene Recherche sowie Worldwatch Institute (2007: 180)

Tabelle 5.1 zeigt deutlich die Unterschiede in der Klimawirkung von Bioethanol abhängig vom verwendeten Rohstoff. Bioethanol auf Basis von Zuckerrohr hat demzufolge das höchste Vermeidungspotential. Abhängig vom Wassergehalt kann man hier für Brasilien von einer Vermeidung von 83% bis 96% ausgehen. Das Vermeidungspotential, das BEER et al. (2002) für Australien berechnen, liegt deutlich darunter. Durch den Ersatz von Benzin durch Bioethanol können hier aber immer noch rund 50% der Treibhausgasemissionen vermieden werden. Offensichtlich sind die Anbaubedingungen in Brasilien deutlich klimafreundlicher als die Bedingungen in Australien.

Die geringste Vermeidung von Treibhausgasemissionen lässt sich mit Bioethanol auf Basis von Mais erreichen. Einzig LEVELTON (2002) gibt hier einen mittleren Wert der Vermeidung von 38% an. Dies lässt sich jedoch auf die optimistischen Annahmen zur Energieerzeugung bei der Produktion von Biokraftstoffen zurückführen.

Die Untersuchung der vorliegenden Studien zum Vermeidungspotential von Bioethanol bestätigt damit die vorhergehenden theoretischen Überlegungen. Die getroffenen Annahmen zu den Anbaubedingungen und der Art der Stromerzeugung der Produktion bestimmen zu einem großen Teil die Klimawirkung von Biokraftstoffen. Das Vermeidungspotential eines Biokraftstoffs ist somit niemals selbsterklärend. Der angegebene Wert bedarf stets einer weiteren Erläuterung.

Durch die Angaben zum Vermeidungspotential von Bioethanol lässt sich nun auch abschätzen, wie viel Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union durch den Anteil von Bioethanol am Kraftstoffmarkt vermieden werden. Das in Tabelle 5.1 angegebene Vermeidungspotential bezieht sich jeweils auf Bioethanol als Reinkraftstoff. Geht man für Europa von einem Bioethanolanteil von 5% aus, dann werden lediglich 2,35% der benzinbedingten Treibhausgasemissionen eingespart. Diese Berechnung berücksichtigt die Rohstoffbasis in Europa sowie das Kraftstoffäquivalent des Biokraftstoffs. In den USA wird Bioethanol Benzin in der Konzentration E10 beigemischt. Aufgrund des geringeren Vermeidungspotentials von Bioethanol auf Basis von Mais werden durch die Beimischung nach WANG et al. (1999) nur rund 1% der Emissionen von mineralischem Benzin vermieden.

**Tabelle 5.2** CO<sub>2</sub>-Vermeidung im Lebenszyklus von Biodiesel als Reinkraftstoff

	Studie	Vermeidung von CO <sub>2</sub> durch den Ersatz von Diesel (%)
<b>Raps</b>	ARMSTRONG et al. (2002)	21
	WUPPERTAL INSTITUT (2005)	68
	LEVY (1993)	44-48
	GENERAL MOTORS (2002)	49
	LARIVÉ (2005)	40
	SCHARMER/GOSSE (1996)	51
	BEER et al. (2001)	54
	RICHARDS (2000)	58
	LEIBLE et al. (2006)	53
	<b>Soja</b>	NOVEM/ADL (1999)
LEVELTON (2002)		63
BEER et al. (2001)		65
SHEEHAN (1998)		78

Quelle: Eigene Recherche sowie Worldwatch Institute (2007: 181)

Auch bei Biodiesel ist die Spanne der möglichen Treibhausgasreduktion sehr weit. Dabei stellt die Produktion von Biodiesel aus Soja die klimapolitisch sinnvollste Rohstoffwahl dar. Durchschnittlich ließen sich damit rund 65% der Treibhausgasemissionen von mineralischem

Diesel als Reinkraftstoff einsparen. Bei Raps beträgt das Potential zur Einsparung von Treibhausgasemissionen durchschnittlich noch etwa 50%. Ebenso wie bei Bioethanol lassen sich die Unterschiede der Ergebnisse durch die unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Emissionsfaktoren im Lebenszyklus von Biodiesel erklären. Am wichtigsten sind dabei die Energieerzeugung für die Biodieselproduktion und die geographischen Besonderheiten des Anbaugebiets.

Bei einem Biodieselanteil von 5% ergibt sich für Europa eine Reduktion der kraftstoffbedingten Treibhausgasemissionen um lediglich 1%. Der Berechnung liegt als Rohstoffbasis ausschließlich Raps zu Grunde, der Energiegehalt von Biodiesel wurde ebenfalls berücksichtigt.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich Biokraftstoffe in ihrem Potential zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen teils sehr unterscheiden. Bei Bioethanol ist dieser Unterschied noch deutlicher als bei Biodiesel. Im Wesentlichen ist dieser Unterschied auf die verwendete Rohstoffbasis zurückzuführen. Daher stellt sich die Frage, ob die Beurteilung der Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen nicht vielmehr an deren Rohstoffbasis als an den Biokraftstoff gekoppelt sein sollte. Entsprechende Überlegungen gibt es bereits auf EU-Ebene. Die Biokraftstoffquote soll sich künftig an der Klimawirkung des beigemischten Kraftstoffs orientieren.

Die Frage nach der Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen lässt sich aber allein durch das positive Vermeidungspotential von Biokraftstoffen noch nicht beantworten. Entscheidend ist nicht nur, ob es zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen kommt. Vielmehr muss ebenfalls berücksichtigt werden, wie hoch die Kosten dieser Vermeidung sind und ob andere Maßnahmen nicht zu einer gesamtwirtschaftlich kostengünstigeren Erreichung der gesteckten Klimaziele führen.

## **CO<sub>2</sub>-VERMEIDUNGSKOSTEN VON BIOKRAFTSTOFFEN**

Die vorangehenden Ausführungen haben gezeigt, dass die Angabe eines Vermeidungspotentials von Biokraftstoffen mit einigen Schwierigkeiten behaftet ist. Eine generelle Angabe ist nicht einmal für einen bestimmten Biokraftstoff mit einer bestimmten Rohstoffbasis möglich. Hier bestehen immer noch signifikante Unterschiede, beispielsweise je nach Region, in der die Energiepflanzen angebaut und der Biokraftstoff hergestellt wird. Genauso spezifisch sind auch die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Biokraftstoffen. Dies wird im Folgenden detailliert erläutert, bevor eine Einschätzung der Vermeidungskosten getroffen wird.

Die Kosten der Emissionsvermeidung durch den Einsatz von Biokraftstoffen können definiert werden als die Differenz in den Herstellkosten derjenigen Menge an Biokraftstoff, welche geeignet ist, gegenüber mineralischem Kraftstoff eine Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent einzusparen. Die Vermeidungskosten von Biokraftstoffen sind daher als sog. Fuel Switch Kosten aufzufassen.

Darunter versteht man im Allgemeinen die Verlagerung von emissionsintensiven Brennstoffen auf emissionsarme Brennstoffe. Zur Berechnung der Vermeidungskosten müssen daher zwei Fragen beantwortet werden. Wie viel Biokraftstoff muss eingesetzt werden, um eine Tonne CO<sub>2</sub> einzusparen? Und wie hoch ist die Differenz in den Herstellkosten dieser Menge an Biokraftstoff im Vergleich zu mineralischem Kraftstoff?

Die Beantwortung beider Fragen ist nicht trivial. Die erste Frage zielt zum einen auf den Energiegehalt des Biokraftstoffs im Vergleich zu mineralischem Kraftstoff ab. Dieser lässt sich chemisch mit einfachen Mitteln exakt bestimmen, weshalb sich auch die Kraftstoffäquivalenz des jeweiligen Biokraftstoffs leicht berechnen lässt. Zum anderen jedoch verlangt die Beantwortung der ersten Frage die Angabe der spezifischen Treibhausgasemissionen eines Biokraftstoffs im Lebenszyklus. Die Schwierigkeiten einer exakten Quantifizierung des CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials wurden bereits ausführlich erläutert. Daher beinhalten die Berechnungen der Kosten der Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Biokraftstoffen immer eine Ungenauigkeit in unbestimmter Höhe.

Die Beantwortung der zweiten Frage nach der Differenz in den Herstellkosten des Biokraftstoffs und des mineralischen Kraftstoffs ist ebenfalls recht komplex. Ausführlich wurde die damit verbundene Problematik bereits in Kapitel 4 bei der Ermittlung der Herstellkosten für Biodiesel erörtert. Daher genügt an dieser Stelle der Verweis auf diese Ausführungen. Weniger problematisch erscheint die Ermittlung der Herstellkosten mineralischer Kraftstoffe. Hier können pragmatisch die Notierungen für Mitteldestillate in ARA (Amsterdam Rotterdam Antwerpen) als Herstellkosten unterstellt werden.

Werden beide Fragen beantwortet, so können die Kosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung von Biokraftstoffen unter den jeweils gemachten Annahmen ermittelt werden. Oftmals wird in der Literatur ein einzelner Wert für die Vermeidungskosten angegeben. Eine solche Momentaufnahme kann die Vermeidungskosten jedoch nur bedingt wiedergeben. Anders als beispielsweise beim Bau einer Windkraftanlage, kann bei Biokraftstoffen nicht mit annähernd konstanten Vermeidungskosten gerechnet werden. Insbesondere hängt die Höhe der Vermeidungskosten auch von den Preisentwicklungen am Weltmarkt für Erdöl ab. Die hohe Volatilität dieses Marktes überträgt sich auf die Vermeidungskosten durch den Einsatz von Biokraftstoffen. Im Jahr 2008 war diese Volatilität besonders hoch. Auf dem Weltmarkt für Erdöl wurde das Produkt Brent zu Preisen zwischen gut 140 USD/bbl und rund 40USD/bbl gehandelt (EIA 2008). Entsprechend entwickelten sich auch die Marktpreise für Mitteldestillate wie Diesel. Ebenso verändern sich die Herstellkosten von Biokraftstoffen im Zeitverlauf sowie deren Vermeidungspotential. Die Verbesserung der Anbaumethoden und auch die Nutzung der Gentechnik versprechen eine höhere Biokraftstoffproduktion je Hektar Ackerfläche und so ein steigendes Vermeidungspotential. Die Entwicklung der Vermeidungskosten durch den Einsatz von Biokraftstoffen wird im Folgenden nun dargestellt.

Beispielhaft wird die Berechnung der Vermeidungskosten für Biodiesel durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich in qualitativer Hinsicht jedoch auch auf andere Biokraftstoffe übertragen. Formal können die hier als *GVK* bezeichneten Vermeidungskosten formuliert werden als

$$GVK = \frac{GK_{BK} (EUR/hl) KA_{BK} - GK_{FK} (EUR/hl)}{EF_{FK} (tCO_2/hl) - EF_{BK} (tCO_2/hl) KA_{BK}} \quad (5.1)$$

Wie bereits erläutert geht in die Berechnung der Kosten der Emissionsvermeidung durch den Einsatz von Biodiesel zum einen der spezifische Kostenfaktor ein, der hier den Zähler des Quotienten bildet. Er ergibt sich aus der Differenz der Herstellungskosten von Biodiesel  $GK_{BK}$  und des mineralischen Kraftstoffs Diesel  $GK_{FK}$ . Bei der Berechnung der Kostendifferenz wird der geringere Energiegehalt von Biokraftstoffen durch Multiplikation mit dem Faktor für die Kraftstoffäquivalenz  $KA_{BK}$  im Vergleich zum jeweiligen mineralischen Kraftstoff berücksichtigt. Bei Biodiesel beträgt der Faktor für die Kraftstoffäquivalenz  $KA_{BK} = 0,91$ . Die Angabe der Herstellkosten erfolgt in beiden Fällen in EUR je hl des Kraftstoffs.

Diese Darstellung unterscheidet sich von dem in der Biokraftstoffliteratur üblichen Ansatz, die Kostendifferenz von Biokraftstoffen auf anschauliche Weise je gefahrenen Kilometer anzugeben. Solchen Berechnungen wird ein spezifischer Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs unterstellt, welcher abhängig von Fahrzeugtyp und Fahrweise unterschiedlich ausfällt. Obgleich anschaulich, so taugt dieser Ansatz doch nur bedingt dafür, eine allgemein gültige Aussage zu den CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Biokraftstoffen treffen. Entgegen der üblichen Vorgehensweise werden daher in dieser Analyse die Differenz in den Herstellkosten der Volumeneinheit hl betrachtet. Auf diese Weise ist es möglich, die Vermeidungskosten je Tonne CO<sub>2</sub> anzugeben. Damit lehnt sich diese Analyse an die in der Energiewirtschaft gängige Methode zur Berechnung der Vermeidungskosten an.

Auch beim spezifischen Vermeidungspotential des jeweiligen Biokraftstoffs im Nenner des Quotienten muss der Faktor für die Kraftstoffäquivalenz berücksichtigt werden. Das spezifische Vermeidungspotential eines Biokraftstoffs ergibt sich aus der Differenz des Emissionsfaktors des mineralischen Kraftstoffs Diesel  $EF_{FK}$  und des Emissionsfaktors von Biodiesel  $EF_{BK}$ . Das spezifische Vermeidungspotential von Biokraftstoffen hat in der Vergangenheit vor allem durch höhere Felderträge und den Einsatz regenerativer Energien in der Produktion fast kontinuierlich zugenommen. Das gilt auch für Biodiesel. Gleichwohl soll für die folgende Analyse ein einheitlicher Wert für den Emissionsfaktor von Kraftstoffen angenommen werden. Tendenziell führt die Annahme eines aktuellen Wertes für den Emissionsfaktor eines Biokraftstoffs jedoch zu einer Unterschätzung der Vermeidungskosten früherer Zeitpunkte. Diese Unterschätzung wird in Kauf genommen, weil auf diese Weise der Einfluss der Rohstoffpreise ceteris paribus dargestellt werden kann. Tabelle 5.3 zeigt eine Auflistung der für die Berechnung der Vermeidungskosten zu Grunde gelegten Emissionsfaktoren. Es wurde dafür jeweils ein Mittelwert der Ergebnisse aus Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 gewählt.

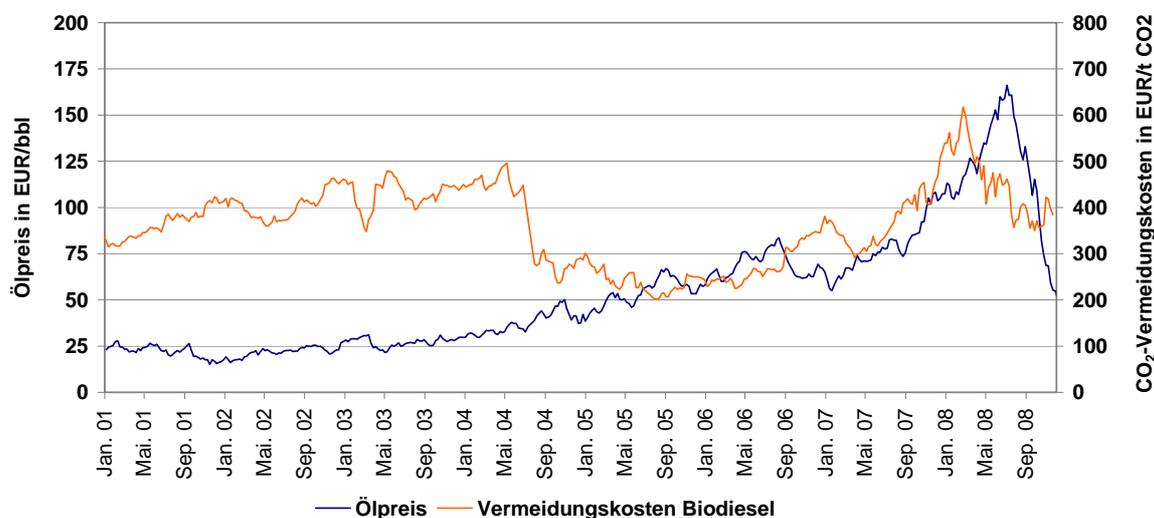
**Tabelle 5.3** Emissionen von Diesel und Biodiesel im Lebenszyklus

Kraftstoff	Emissionen in t CO <sub>2</sub> -Äquivalent je hl Kraftstoff			
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Summe
<b>Diesel</b>	0,28444	0	0,00444	0,28889
<b>Biodiesel (RME)</b>	0,04853	0,00607	0,06876	0,12336
<b>BtL</b>	<i>Restholz</i>	0	0,00404	0,01820
	<i>schnell wachsende Baumarten</i>	0,01213	0	0,02427

Quelle: Eigene Berechnungen in Anlehnung an LEIBLE et al. (2006: 58) und EDWARDS et al. (2005: 32)

Mit der Annahme konstanter Emissionsfaktoren bleibt auch der Nenner in Gleichung (5.1) konstant. Die Höhe der Vermeidungskosten wird damit einzig durch die Differenz in den Herstellkosten von Biodiesel und mineralischem Diesel bestimmt. In der Konsequenz wird diese Analyse der Vermeidungskosten insofern belastbarer, als die Unsicherheit bezüglich der absoluten Höhe der Emissionsfaktoren für Biodiesel und mineralischen Diesel an Relevanz verliert. Entscheidend ist vielmehr das relative Verhältnis der Emissionsfaktoren, welches sich bei unterschiedlichen Systemgrenzen in der Berechnung der Emissionsfaktoren jedoch wesentlich weniger stark verändert als die absolute Höhe.

**Abbildung 5.2** CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Biodiesel und Erdölpreis (Brent)



Quelle: Eigene Berechnung sowie EIA (2008), IMF (2009)

Die Ergebnisse der Analyse der Entwicklung der Vermeidungskosten im Zeitverlauf werden in Abbildung 5.2 wiedergegeben. Im Zeitraum zwischen 2001 und 2008 zeigt sich eine Bandbreite der kalkulierten Vermeidungskosten zwischen 200 EUR/t CO<sub>2</sub> und 600 EUR/t CO<sub>2</sub>. Mitte 2005 können die mit gut 200 EUR/t CO<sub>2</sub> geringsten Vermeidungskosten beobachtet werden. Die Differenz in den Produktionskosten von Biodiesel und mineralischem Diesel war hier am geringsten. Der Ölpreis zu dieser Zeit bewegte sich auf einem damals mittleren Ni-

veau von rund 50 USD/bbl mit einem entsprechenden Dieselpreis von etwa 35 EUR/hl, wogegen die Rapspreise im Großhandel mit ca. 190 EUR/t auf einem sehr niedrigen Niveau angesiedelt waren. Die ab Anfang 2007 massiv steigenden Erdölpreise hätten ebenfalls zu sinkenden Vermeidungskosten führen müssen. Der Effekt wurde jedoch überkompensiert durch eine ebenso massive Zunahme der Großhandelspreise für Raps. Der Rapspreis nahm im März 2008 seinen bislang höchsten Wert an und betrug zu diesem Zeitpunkt nur noch knapp unter 500 EUR/t. Der Einfluss des Ölpreises auf die Vermeidungskosten ist insgesamt auffallend, wie Abbildung 5.3 deutlich zeigt.

Entscheidend für diese Untersuchung ist dabei jedoch weniger die absolute Höhe der Vermeidungskosten von Biodiesel und Biokraftstoffen allgemein. Diese kann nur unter Unsicherheit ermittelt werden, was bereits ausführlich dargestellt wurde. Interessant sind vielmehr die Bewegungen der Vermeidungskosten im Zeitverlauf. Es konnte gezeigt werden, dass sich die hohe Volatilität des Weltmarktes für Erdöl ebenso auf die Vermeidungskosten niederschlägt wie die Volatilität auf dem Großhandelsmarkt für Raps. Die Vermeidungskosten schwanken entsprechend stark auch in kurzen Zeiträumen.

Aus der Ermittlung der Vermeidungskosten von Biodiesel im Zeitverlauf lassen sich für diese Untersuchung vornehmlich zwei Schlussfolgerungen ziehen. Zum einen ist die Ölpreisabhängigkeit der Vermeidungskosten von Biokraftstoffen auffällig. Ein hoher Weltmarktpreis für Erdöl bewirkt hohe Preise der mineralischen Kraftstoffe. Dadurch sinken umgekehrt die Vermeidungskosten von Biokraftstoffen. Der verstärkte Einsatz von Biokraftstoffen ist also immer dann eine besonders attraktive Möglichkeit zur Vermeidung von Treibhausgasen, wenn der Weltmarktpreis für Erdöl hoch ist. Je geringer aber der Erdölpreis ist, umso attraktiver werden andere Möglichkeiten der Reduktion von Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Einsatz von Biokraftstoffen. Üblicherweise geht man davon aus, dass ein hoher Ölpreis fast automatisch eine angespannte wirtschaftliche Situation für Deutschland und Europa bedeutet. Dass ausgerechnet ein solches Umfeld die Voraussetzung dafür bildet, dass die Emissionsreduktion durch Biokraftstoffe mit möglichst geringen volkswirtschaftlichen Kosten erfolgt, mutet ein wenig absurd an. Dieser Zusammenhang verleiht der Diskussion noch mehr Gewicht, inwiefern Biokraftstoffe tatsächlich die in sie gesetzten Erwartungen im Hinblick auf den Klimaschutz erfüllen können.

Zum zweiten ist auch fraglich, ob die Unsicherheit der Vermeidungskosten bei Biokraftstoffen tatsächlich in Kauf genommen werden sollte. Immerhin lässt sich deshalb kaum abschätzen, ob der Nutzen einer Maßnahme groß genug ist, um die dadurch entstandenen Kosten zu decken. Zwar bestehen dergleichen Unsicherheiten hinsichtlich aller Instrumente, bei Biokraftstoffen sind diese jedoch deutlich umfangreicher. Zumindest jedoch muss der Einsatz von Biokraftstoffen dem Vergleich mit den Kosten alternativer Minderungsmaßnahmen Stand halten. Nur auf diese Weise ist die Kosteneffizienz der Klimainstrumente zu gewährleisten.

## VERGLEICH MIT DEN KOSTEN ALTERNATIVER CO<sub>2</sub>-MINDERUNGSOPTIONEN

Die Vertragsstaaten des Kyoto-Protokolls haben sich verpflichtet, jährlich den Fortschritt ihrer jeweiligen Reduktionsanstrengungen in den sog. Treibhausgasinventaren zu dokumentieren (UNFCCC 2008). Die Struktur sowie die Berechnung der Treibhausgasemissionen folgen dabei einheitlichen Kriterien, die von der UNFCCC aufgestellt wurden. Gleichzeitig geben die Treibhausgasinventare damit auch einen Überblick über mögliche Ansatzpunkte für alternative Maßnahmen zur Reduktion von CO<sub>2</sub> Emissionen.

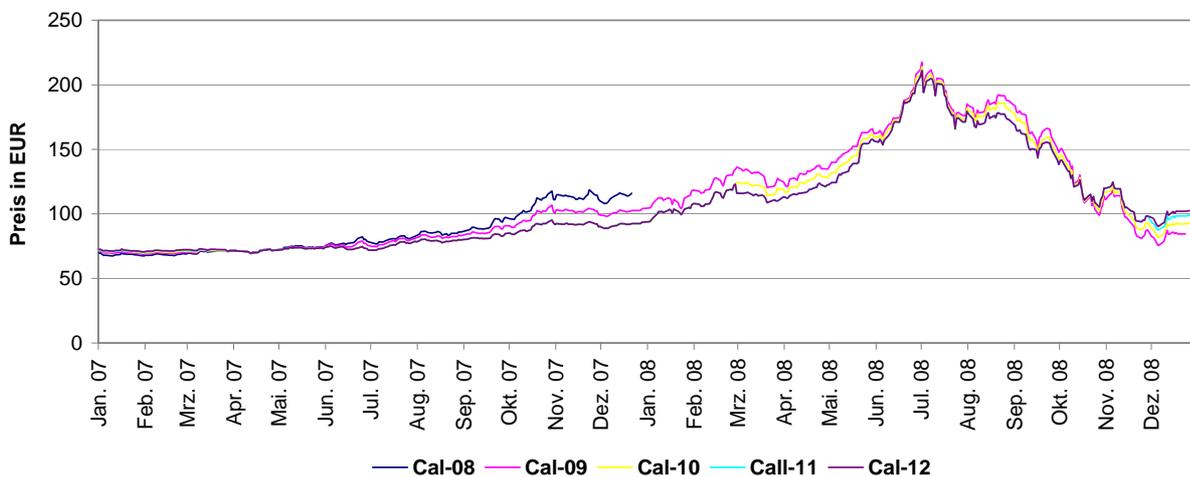
Besonders interessant sind dabei diejenigen Maßnahmen, welche negative Minderungskosten aufweisen. Die Isolierung von Gebäudehüllen von Wohn- und Geschäftsgebäuden ist oftmals auch ohne Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Reduktion wirtschaftlich (FAHL et al. 1995: 178). Entsprechend sieht die Europäische Kommission im Rahmen der Energieeffizienzinitiative „7 Measures for 2 Million New EU Jobs“ die Sanierung von 15 Millionen Gebäuden vor (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2009: 4). Analog sind auch bei einigen erneuerbaren Energien die Vermeidungskosten negativ (SIMS et al. 2003: 1316, WAGNER/BRÜCKL 2003: 6). Die Quantifizierung der Kosten anderer Minderungsmaßnahmen weist jedoch ebenso wie die Bestimmung der Vermeidungskosten von Biokraftstoffen erhebliche Schwierigkeiten auf. Eine Bandbreite der Minderungskosten findet sich beispielsweise bei BROCKS (2001: 94).

Rund die Hälfte der Treibhausgasemissionen fällt jedoch auf Anlagen, die dem Europäischen Emissionshandel unterliegen. Daher bietet sich für einen Vergleich mit den Vermeidungskosten von Biokraftstoffen der Marktpreis der Treibhausgasemissionsberechtigungen an. Üblicherweise werden diese als Emissionszertifikate oder EUAs (European Union Emission Allowance) bezeichnet. Der Europäische Emissionshandel ist ein mengenbeschränktes System. Zur Einhaltung des sog. Caps, also der erlaubten Gesamtemissionsmenge im System, werden zunächst diejenigen Maßnahmen durchgeführt, welche Emissionsminderungen mit den geringsten Kosten erzielen. Entsprechend spiegelt der Preis der Emissionszertifikate in der Theorie die Grenzkosten der Minderungsanstrengungen in den vom Emissionshandel betroffenen Anlagen wider. Die Vermeidungskosten von Biokraftstoffen werden in dem Vergleich mit dem Marktpreis der Emissionszertifikate also den Kosten der effizientesten Minderungsmaßnahmen der größten Emittenten von Treibhausgasen in Europa gegenüber gestellt. Dies gilt im Wesentlichen auch trotz der bestehenden Informationsdefizite. Der Marktpreis für Emissionszertifikate bietet sich darüber hinaus wegen seiner Reaktionsfähigkeit auf die veränderlichen Marktbedingungen als Vergleichsgrundlage für die Vermeidungskosten von Biodiesel an. Beide Arten der Vermeidungskosten werden darüber hinaus unter anderem vom Weltmarktpreis für Erdöl bestimmt, wenngleich der Einfluss des Ölpreises in den beiden Fällen gegenläufig ist. Für Emissionszertifikate wird dies im Folgenden noch erläutert werden.

Die Grenzvermeidungskosten im Europäischen Emissionshandel sind, wie bereits angedeutet, keineswegs konstant. Dies liegt zum einen daran, dass das größte kurzfristig realisierbare Po-

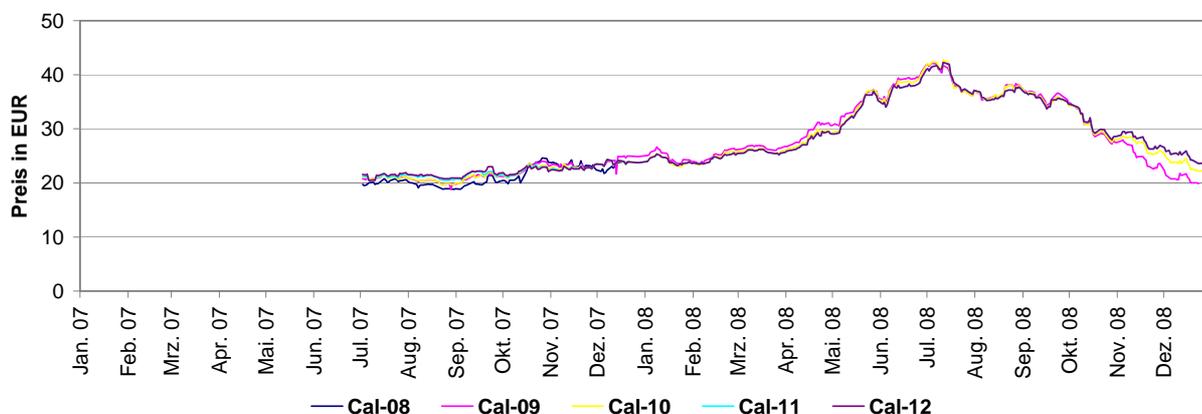
tential zur Minderung der CO<sub>2</sub> Emissionen im sog. Fuel Switch liegt. Darunter versteht man bei Stromproduzenten die Verlagerung der Stromproduktion von emissionsintensiven Brennstoffen wie Braunkohle und Steinkohle auf emissionsarme Brennstoffe wie Erdgas innerhalb des eigenen Kraftwerkportfolios auf Basis der Preise der verschiedenen Brennstoffe. Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 zeigen die Terminpreise von Steinkohle und Erdgas, die im Wesentlichen die Fuel Switch Kosten bestimmen. Innerhalb des gesamten europäischen Strommarktes ergeben sich Fuel Switch Optionen durch die kurzfristige Optimierung der Produktionsmengen aus den verschiedenen Kraftwerken durch den Handel von Strommengen am Spotmarkt (BURGER et al. 2007: 76ff). Analog zur CO<sub>2</sub> Vermeidung durch Biokraftstoffe basieren auch die Fuel Switch Kosten auf den Marktpreisen der jeweiligen Brennstoffe und ändern sich daher im Zeitverlauf.

Abbildung 5.3 EEX Year Futures Coal



Quelle: Eigene Darstellung nach EEX (2009a)

Abbildung 5.4 EEX Year Futures GUD Natural Gas<sup>20</sup>

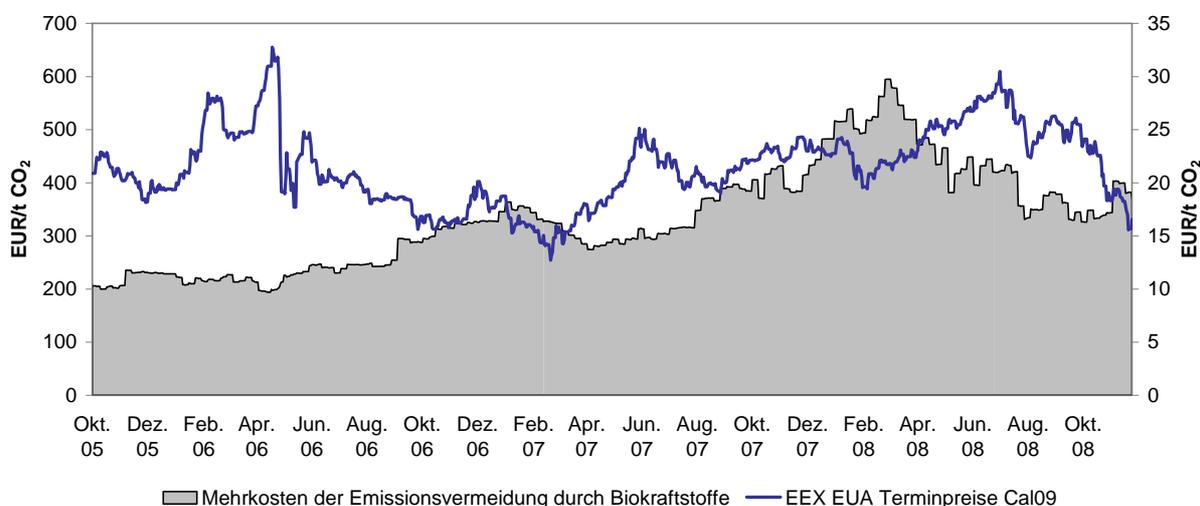


Quelle: Eigene Darstellung nach EEX (2009c)

<sup>20</sup> Der EEX Handel mit Year Futures GUD Natural Gas hat erst im Juli 2007 begonnen. EEX Daten sind daher erst ab diesem Zeitpunkt verfügbar.

Zum anderen resultieren die unterschiedlichen Grenzvermeidungskosten aus der veränderlichen Knappheit der Emissionszertifikate. Die Nachfrage nach Emissionszertifikate muss die Angebotsmenge überschreiten, damit sich am Markt ein Preis für Emissionszertifikate bilden kann. Bei fehlender Knappheit muss der Zertifikatepreis zwangsläufig auf Null fallen. Wie knapp der Markt für Emissionszertifikate tatsächlich ist, wird durch die Differenz der in den nationalen Allokationsplänen festgelegten Caps<sup>21</sup> einerseits und den business-as-usual Emissionen andererseits bestimmt. Dabei ist der Cap des Emissionshandelssystems nahezu konstant. Geringfügige Änderungen ergeben sich lediglich aus der Behandlung der Neuanlagenreserve und den für den Europäischen Emissionshandel verfügbaren Projektzertifikaten. Während das Angebot demnach einigermaßen starr ist, bestimmt im Wesentlichen das Wirtschaftswachstum die business-as-usual Emissionen und damit die Nachfrage im Markt. Nicht zu unterschätzen ist auch der Einfluss der jeweiligen Witterungsverhältnisse. Günstige Bedingungen für klimaneutrale Erneuerbare Energien verringern die business-as-usual Emissionen teils deutlich. Die aus der Differenz von business-as-usual Emissionen und dem Cap resultierende Reduktionsmenge bestimmt in der Folge die Höhe der Grenzvermeidungskosten. Diese spiegeln sich in den Terminpreisen für Emissionszertifikate wider.

**Abbildung 5.5** CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Biokraftstoffen und im EU Emissionshandel



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung nach EEX (2009b)

Abbildung 5.5 zeigt die Preisentwicklung der Terminpreise für EUAs an der Leipziger Börse EEX. Vergleicht man diese mit den Terminpreisen für Kohle und Erdgas in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4, dann zeigt sich deutlich die Bedeutung der Fuel Switch Kosten für den Zertifikatepreis. Gleichzeitig vergleicht die Abbildung den Zertifikatepreis mit den Kosten der

<sup>21</sup> Tatsächlich ist eine kleine Variation des Caps im europäischen Emissionshandel noch möglich. Einzelne Nationen wie beispielsweise Großbritannien werden nicht ausgeschüttete Emissionszertifikate aus der Neuanlagenreserve nicht in den Markt bringen.

Emissionsvermeidung durch den Ersatz mineralischer Kraftstoffe. Beides bezieht sich jeweils auf die Vermeidung einer Tonne CO<sub>2</sub>. Die Vermeidungskosten von Biokraftstoffen liegen deutlich höher als die Kosten der Emissionsvermeidung im Europäischen Emissionshandel, im Durchschnitt rund 330 EUR. Entsprechend ließen sich die Klimaziele der Europäischen Union und Deutschlands kostengünstiger erreichen, wenn die Minderungsanstrengungen verstärkt im Rahmen des Europäischen Emissionshandels stattfänden anstatt über die Ablösung mineralischer Kraftstoffe durch Biokraftstoffe.

Dabei hängt die Differenz der Vermeidungskosten durch den Einsatz von Biokraftstoffen und Fuel Switch im europäischen Emissionshandel insbesondere vom Weltmarktpreis für Erdöl ab. Im europäischen Emissionshandel bewirkt ein steigender Ölpreis steigende Erdgaspreise und daher auch steigende Fuel Switch Kosten. Entsprechend fällt der Preis für Emissionszertifikate dann höher aus. Umgekehrt ist die Wirkung des Ölpreises bei der Emissionsvermeidung durch Biokraftstoffe. Die Mehrkosten bei der Produktion von Biokraftstoffen fallen natürlich dann geringer aus, wenn die Kosten der Herstellung mineralischer Kraftstoffe aufgrund des steigenden Ölpreises zunehmen.

Ein steigender Ölpreis führt also dazu, dass nicht nur der Einsatz von Biokraftstoffen an Attraktivität gewinnt, sondern gleichzeitig auch andere, in großem Umfang vorhandene Optionen zur Emissionsminderung weniger kostengünstig durchzuführen sind. Gleichwohl soll dies kein Plädoyer für steigende Ölpreise sein. Vielmehr muss an dieser Stelle deutlich gemacht werden, dass der Ölpreis noch weit entfernt ist von einem Niveau, welches den Einsatz von Biokraftstoffen zur bevorzugten Alternative der Emissionsvermeidung in Deutschland und Europa werden ließe. Eine Förderung von Biokraftstoffen mit dem alleinigen Ziel der Einsparung von Treibhausgasemissionen muss daher nicht allein aufgrund des geringen Einsparpotentials, sondern vor allem wegen den weitaus kostengünstigeren Möglichkeiten zur Emissionsreduktion in anderen Bereichen abgelehnt werden.

### **5.1.2 Ressourcenschonung und Ressourcenverbrauch**

Wenn Biokraftstoffe mineralische Kraftstoffe im Straßenverkehr ersetzen, dann werden dadurch die globalen Erdölreserven geschont. Diese Tatsache alleine rechtfertigt jedoch noch nicht die Förderung von Biokraftstoffen. Die Schonung der globalen Erdölreserven kann nur dann ein stichhaltiges Argument für die Förderung von Biokraftstoffen sein, wenn die Schonung der Ressourcen volkswirtschaftlich auch sinnvoll ist in einer Weise, dass daraus ein ausreichend hoher volkswirtschaftlicher Gewinn resultiert. Insbesondere muss dabei der ressourcenschonenden Wirkung von Biokraftstoffen auch deren eigener Ressourcenverbrauch, etwa durch eine erweiterte Flächeninanspruchnahme gegenübergestellt werden.

## **SCHONUNG DER GLOBALEN ERDÖLRESERVEN**

Die mineralischen Kraftstoffe im Straßenverkehr Benzin und Diesel werden aus fossilem Erdöl hergestellt, von dem weltweit nur eine begrenzte Menge zur Verfügung steht. Die Ölkrise in den 1970er Jahren hat deutlich gemacht, wie abhängig die Wirtschaft weltweit von diesem Energieträger ist. Der jährlich aktualisierte *World Energy Outlook* der International Energy Agency und der OECD (IEA/OECD 2008) zeigt dies deutlich. Der Schwerpunkt des Berichts liegt in der Abschätzung einer möglichen Ölnappheit auf Basis der geschätzten Entwicklung von Angebot und Nachfrage. Kurzfristig lassen sich Engpässe in der Versorgung durch eine ausreichende Lagerhaltung überwinden, wie sie beispielsweise in Deutschland durch das Gesetz über die Bevorratung mit Erdöl und Erdölerzeugnissen vorgeschrieben ist (ERDÖLBEVG 1978). Wegen der Begrenztheit der weltweiten Erdölvorräte müssen in der langen Frist jedoch alternative Energiequellen die weltweite Energieversorgung gewährleisten. Daher könnte aus energiepolitischen Gründen die Förderung von Biokraftstoffen der Schonung der Erdölreserven dienen. Offensichtlich besteht bei dieser Argumentation eine inhaltliche Nähe zur Diskussion der Versorgungs- und Energiesicherheit in der Biokraftstoffdebatte, wie sie in Abschnitt 5.1.4 thematisiert wird. Während sich die Argumentation hinsichtlich der Ressourcenschonung aber auf eine tatsächlich vorhandene bzw. angenommene physische Knappheit bezieht, stellen im Unterschied dazu politische Entscheidungen über Erdöllieferungen eine künstliche Verknappung des Energieträgers dar.

Üblicherweise wird zur Angabe der physischen Knappheit von Erdöl die sog. statistische Reichweite herangezogen. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der sicheren Reserven zur laufenden Förderung (BROCKS 2001: 97). Bei der Berechnung der statistischen Reichweite gehen nachfrageseitig keine Änderungen aufgrund von Wirtschaftswachstum oder Steigerungen der Energieeffizienz ein, welche in den letzten Jahren stets zu beobachten waren. Auf der Angebotsseite finden einerseits die Entdeckung neuer Ölfelder, beispielsweise durch Explorationsaktivitäten, und andererseits die veränderte Wirtschaftlichkeit von Ölprojekten keine Berücksichtigung. Dennoch gilt die statistische Reichweite als wertvoller Indikator für die Verknappung der Erdölreserven. Die statistische Reichweite muss im Zeitverlauf dabei nicht zwangsweise abnehmen. Es wird geschätzt, dass die Zahl wirtschaftlicher Ölprojekte in den nächsten Jahren deutlich zunehmen dürfte. Entsprechend wird auch mit einer Zunahme der statistischen Reichweite gerechnet. Grund für die angenommene höhere Rentabilität von Ölprojekten ist in erster Linie der Weltmarktpreis für Erdöl, der nach Schätzungen in den nächsten Jahren wieder deutlich steigen soll. Aus diesem Grund ist auch kurzfristig noch mit einer steigenden statistischen Reichweite zu rechnen.

Entsprechend besteht aktuell noch keine akute Notwendigkeit eines vermehrten Einsatzes von Biokraftstoffen. Mit einer Abnahme der statistischen Reichweite muss jedoch schon in einer mittleren Frist gerechnet werden<sup>22</sup>. Daher soll an dieser Stelle ein grober Überblick über den

---

<sup>22</sup> Dabei gibt es in den unterschiedlichen Verwendungszwecken von Erdöl signifikante Unterschiede, wie dramatisch die Knappheit der Ressource empfunden wird. Im Wesentlichen beruhen diese Einschätzungen darauf, ob

Beitrag von Biokraftstoffen in Deutschland und Europa zur Schonung der Erdölvorräte gegeben werden. Nach Schätzung von ZEDDIES (2006b: 22) können im Jahr 2020 europaweit rund 26 Mio. bbl Erdöl eingespart werden. Dieser absolute Wert ist zunächst durchaus beeindruckend, entspricht aber nur einem kleinen Bruchteil der weltweiten Erdölförderung von rund 28 Mrd. bbl im Jahr 2007 IEA (IEA 1988-2009). Hinzu kommt, dass ein Rückgang der europäischen Nachfrage nach Erdöl sich nicht in vollem Umfang als Produktionskürzung der erdölfördernden Länder bemerkbar macht. Andere Nachfrager schließen diese Lücke. Bei Bioethanol liegt das Einsparpotential höher. Mit einer möglichen Bioethanolquote von ca. 40% würde die in Europa im Jahr 2020 verbrauchte Erdölmenge um ca. 300 Mio. bbl abnehmen.

Die möglichen Einsparungen werden oftmals aber eher als Argument für die Erhöhung der Versorgungssicherheit mittels Biokraftstoffen herangezogen. Unabhängig vom Potential zur Schonung der Erdölreserven muss die Frage beantwortet werden, ob Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energien in anderen Sektoren der Energieversorgung aus ökonomischen Gesichtspunkten nicht zielführender sind. Für diese Diskussion soll jedoch an HUNTINGTADONA/BROWN (2004) und AUSILIO (2006) verwiesen werden. Die Situation in der Europäischen Union untersuchen CORRELJE/VAN DER LIND (2006) und VALERIA et al. (2007).

## **RESSOURCENVERBRAUCH VON BOKRAFTSTOFFEN**

Im Hinblick auf die Ressourcenschonung muss auch die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen durch die Produktion von Biokraftstoffen analysiert werden. Im Gegensatz zu den Umweltkosten von mineralischen Kraftstoffen sind die Auswirkungen von Biokraftstoffen bislang recht gering (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 193). Mit einer Zunahme der Produktion von Biokraftstoffen und der verstärkten Nutzung in verschiedenen Ländern, können die Umweltwirkungen aber deutlich ansteigen.

Eines der größten Umweltrisiken in Verbindung mit Biokraftstoffen ist die Inanspruchnahme von Land zum Anbau von Biokraftstoffen, insbesondere die Neuerschließung von Feldern wirkt sich auf den Grad der Biodiversität sowie die Qualität von Boden, Luft und Wasser aus. Wie gravierend die Auswirkungen einer Neuerschließung von Feldern tatsächlich sind, hängt in erster Linie vom natürlichen Bewuchs vor der Neuerschließung, der jeweiligen Energiepflanze für die Biokraftstoffproduktion sowie der Art und Intensität des Anbaus ab. Im extremsten Fall werden Energiepflanzen zur Gewinnung von Biokraftstoffen in Monokulturen auf ehemaligen Regenwaldflächen angebaut.

---

im betreffenden Markt eine Backstopptechnologie für Erdöl bereits heute oder mit hoher Wahrscheinlichkeit künftig zur Verfügung steht. Beispielsweise kann Erdöl zwar zur Produktion von Strom genutzt werden, es stehen jedoch wirtschaftlichere Methoden der Energieerzeugung zur Verfügung. Im Unterschied dazu ist Erdöl als Rohstoff zur Herstellung von Medikamenten in absehbarer Zeit nicht zu ersetzen.

Der Großteil der Studien zur Umweltwirkung von Biokraftstoffen beschränkt sich auf deren Klimawirkung. Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, hängt diese von einer Vielzahl verschiedener Faktoren ab. Dabei ist u.a. auch die Veränderung der Bodenqualität ausschlaggebend für die Klimawirkung von Biokraftstoffen. Durch die Änderung der Landnutzung von einem natürlichen Bewuchs zu einer Erntebepflanzung sinkt im Zeitverlauf der für den Pflanzenwuchs notwendige Anteil organischer Stoffe im Boden, was durch Düngemittel kompensiert werden muss. Die benötigte Menge hängt dabei neben der Bodenbeschaffenheit insbesondere von der angebauten Pflanze ab. In der Regel kann man davon ausgehen, dass der Anbau von heimischen Energiepflanzen den Einsatz von Düngern minimiert und damit die Umweltwirkung der Produktion von Biokraftstoffen deutlich verringert. Entsprechendes gilt für Pestizide. Heimische Pflanzen weisen üblicherweise eine höhere Resistenz gegenüber Schädlingen und Krankheiten auf. Daher werden weniger Pestizide benötigt, die in der Folge die Biodiversität im Boden verringern.

Weltweit gehen auf den Agrarsektor rund 70% des Wasserverbrauchs zurück. In Entwicklungsländern beträgt dieser Anteil aufgrund der unterdurchschnittlichen Effizienz des Wassereinsatzes sogar 90% (KOJIMA/JOHNSON 2005: 81). Dabei beeinflusst der Anbau von Energiepflanzen zur Produktion von Biokraftstoffen einerseits die Verfügbarkeit von Wasser und andererseits die Qualität des Wassers. Hinsichtlich der Verfügbarkeit von Wasser schneidet Bioethanol aus Zuckerrohr am schlechtesten ab. Für den Anbau von Zuckerrohr sind große Mengen Wasser notwendig. In den letzten Jahren konnten hierbei jedoch Fortschritte erzielt werden. In der Gegend von São Paulo, wo die überwiegende Menge an Zuckerrohr angebaut wird, wurden vor einigen Jahren Wassergebühren eingeführt. In der Folge nahm der Wasserverbrauch in dieser Gegend deutlich ab. Im südlichen Zentralbrasilien hingegen steigt der Wasserverbrauch weiterhin an (COELHO 2005: 10). Mit Zunahme der Nachfrage nach Bioethanol steigt die Nachfrage nach Wasser und die Wasserknappheit wird verschärft. Belastet werden dadurch insbesondere während Dürren die Ökosysteme von Flüssen, die Qualität des Bodens sinkt (DURBIN et al. 2005: 47f, WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 208). Die Wasserqualität wird vor allem durch ausgeschwemmte Reststoffe von Düngern und Pestiziden beeinträchtigt. Mais benötigt dabei in der Regel mehr Pestizide und Düngemittel als andere Energiepflanzen. Typischerweise nehmen Pflanzen jedoch nur rund die Hälfte des Düngemittels auf. Der Rest der Chemikalien kann aus dem Boden geschwemmt werden und bis ins Grundwasser vordringen. Die Gefahr der Eutrophierung ist daher durchaus real und einigermaßen besorgniserregend. Im mittleren Westen der USA, dem sog. *Corn Belt*, werden die Chemikalien zu einem großen Teil in den Mississippi geschwemmt und fließen mit ihm in den Golf von Mexiko. Dort haben die Chemikalien nach POLLAN (2002) zu Beginn des 21. Jahrhunderts in einem Gebiet von 31.000 Quadratkilometern die marine Flora und Fauna vernichtet.

Die Beurteilung der Förderungswürdigkeit eines Biokraftstoffs lässt sich daher ähnlich wie bei der Klimawirkung nicht pauschal vollziehen. Insgesamt lässt sich zwar feststellen, dass

kurzfristig keine akute Ressourcenknappheit besteht. Mittelfristig jedoch wird dieses Thema an Bedeutung gewinnen. Dann muss insbesondere eine genaue Abwägung der Ressourcenschonung und Ressourceninanspruchnahme durch Biokraftstoffe durchgeführt werden. Dabei spielen insbesondere auch Besitzverhältnisse eine Rolle. Während die Inanspruchnahme von Ressourcen durch Biokraftstoffe in Europa oder Südamerika im eigenen Land stattfindet, werden erschöpfbare Ölvorräte im Ausland geschont. Dies führt dazu, dass fast ausschließlich der Aspekt der Ressourceninanspruchnahme durch die Produktion von Biokraftstoffen diskutiert wird. So etwa in der Europäischen Union, wo diesbezüglich die Förderung sog. Bio-Biokraftstoffe angestrebt wird. Der nachhaltige Anbau von Biokraftstoffen soll eben jene Problematik der Ressourceninanspruchnahme vermindern.

### **5.1.3 Förderung der Landwirtschaft und Arbeitsplatzeffekte**

Hinter der europäischen Agrarpolitik steht die Vision, durch die Förderung von Biokraftstoffen eine Wandlung der Landwirte zu Energiewirten zu vollziehen. Die Bundesregierung sieht Biokraftstoffe als erfolversprechenden Beitrag zur Wertschöpfung und Beschäftigung in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum (BMVEL 2005: 9). Die Arbeitsplatzeffekte der heimisch produzierten Biokraftstoffe werden zumeist in Kombination mit anderen erneuerbaren Energien betrachtet. Auf nationaler Ebene beispielsweise bei STAIB et al. (2006), KRATZAT et al. (2007), HENTRICH et al. (2004) oder PFAFFENBERGER et al. (2003). Auf europäischer Ebene empfiehlt sich insbesondere NEUWAHL et al. (2008), BERNDES/HANSSON (2007) und ECOTEC (1999). Durch die integrierte Betrachtung sämtlicher erneuerbaren Energien wird oftmals jedoch der Anteil von Biokraftstoffen an den Arbeitsplatzeffekten nicht separat angegeben. Anders bei SCHÖPE/BRITSCHKAT (2002), die gezielt die Arbeitsplatzeffekte der Biodieselproduktion in Deutschland analysieren. Dabei werden Multiplikator-Effekte, Faktorsubstitutionseffekte sowie strukturelle Effekte des Rapsanbaus berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Arbeitsplatzeffekte der Biodieselziele der deutschen Regierung nehmen SCHÖPE/BRITSCHKAT (2002) eine Input-Output-Analyse vor. Dabei werden sowohl diejenigen Faktoren berücksichtigt, welche in unmittelbarem als auch in einem mittelbaren Zusammenhang zur Biodieselproduktion stehen, darunter etwa die Art der Ölgewinnung und Umesterung zu Biodiesel. Hingegen werden Flächenbeihilfen und Stilllegungsprämien nicht berücksichtigt, da im Bezugsjahr 2003 konkurrierende Produktionsverfahren mit identischen Prämienätzen und Beihilfen gefördert wurden. Die Analyse unterstellt drei verschiedene Preisszenarien für den Großhandelspreis von Raps. Im Niedrigpreisszenario wird ein Rapspreis von 125,25 EUR/t unterstellt, bei einem mittleren Preisniveau 186,62 EUR/t und bei einem hohen Preisniveau 237,75 EUR/t.

Im Ergebnis unterscheidet sich der Beschäftigungszuwachs in den beiden Szenarien mit den höheren Preisen nur geringfügig. Bei mittleren Preisen kann mit einem Zuwachs an Arbeits-

plätzen von rund 18.200 gerechnet werden. Bei hohen Rapspreisen erhöht sich dieser Wert um etwa 1.500 Arbeitsplätze. Diesem zunächst positiven Resultat stehen jedoch Mindereinnahmen in Folge der Befreiung von Biokraftstoffen von der Energiesteuer gegenüber. Die Produktion von Biodiesel entsprechend den Zielvorgaben der deutschen Regierung führt zu Energiesteuerausfällen von rund 500 Mio. EUR. Diese können nur zum Teil durch die Steuer-rückflüsse aus dem Beschäftigungszuwachs sowie die Einsparung von Interventionskosten gedeckt werden, so dass im Jahr 2003 Mindereinnahmen in Höhe von rund 300 Mio. EUR im mittleren und 250 Mio. EUR im hohen Preisszenario verbleiben. Trotz Mindereinnahmen wird die Beschäftigungsbilanz von Biokraftstoffen in Deutschland überwiegend als positiv beurteilt. Dieses Ergebnis verstärkt sich noch durch den seit 2006 schrittweisen Wegfall der Energiesteuerbefreiung.

Ein ähnliches Ergebnis gilt für Brasilien, wenngleich hier der Beschäftigungszuwachs noch deutlicher war. Der Zuckerrohrindustrie als Ganzes konnten 2007 in Brasilien rund 1 Mio. direkte und weitere 2,5 bis 3 Mio. indirekte Arbeitsplätze zugerechnet werden (ÚNICA 2007). Der größte Teil davon entfällt auf die Herstellung, den Transport und den Vertrieb von Bioethanol. Allerdings dürfte die zunehmende Mechanisierung in der Landwirtschaft und Automatisierung in der Produktion zu einem Rückgang der Arbeitsplätze in den kommenden Jahren führen (WALTERA et al. 2008: 731). Gleichwohl bleibt eine positive Beschäftigungsbilanz auch in Zukunft erhalten. Zu ähnlichen Ergebnissen für weitere Entwicklungsländer kommt auch UNF (2006).

Damit bleibt festzuhalten, dass durch die Förderung von Biokraftstoffen tatsächlich Arbeitsplätze in der Landwirtschaft und der Weiterverarbeitung der Energiepflanzen geschaffen werden. Dabei ist es jedoch keineswegs so, dass hier von einer Win-win-Situation gesprochen werden kann. Zunächst ist die Generierung von neuen Arbeitsplätzen mit Steuerausfällen verbunden. Im Gegenteil könnte es mittel- und langfristig sogar zu einem Zielkonflikt zwischen der Förderung der Landwirtschaft und der Förderung von Biokraftstoffen kommen. HENKE/KLEPPER (2006: 12) weisen darauf hin, dass der entscheidende Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen gegenüber mineralischen Kraftstoffen die Rohstoffkosten sind. In der Konsequenz müssen Biokraftstoffe aus möglichst günstigen Rohstoffen erzeugt werden. Demgegenüber lässt sich eine Förderung der Landwirtschaft nur über höhere Preise erzielen, da als Anbaufläche lediglich Stilllegungsflächen zur Verfügung stehen (BROCKS 2001: 114).

#### **5.1.4 Versorgungssicherheit und Erdölabhängigkeit**

Die heutigen Wirtschaftssysteme stützen sich auf ein funktionierendes Transportsystem. Lokale und globale Mobilität ist entscheidend für das Angebot von Gütern, die Disponibilität von Lebensmitteln oder die Verfügbarkeit von Arbeitskräften. Mit vereinzelt Ausnahmen

sind die nationalen und das globale Transportsystem fast vollständig von mineralischen Kraftstoffen abhängig. Die Europäische Kommission schätzt sogar, dass die Importabhängigkeit der EU in den nächsten 20-30 Jahren von gegenwärtig rund 50% auf über 70% steigen wird (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2006f: 3).

Dabei konzentrieren sich die Ölreserven auf einige wenige Staaten, deren Stabilität zumeist durch ökonomische wie politische Probleme gefährdet ist. Mehr als 70% der bekannten globalen Erdölvorkommen und ein nur geringfügig geringerer Teil der weltweiten Erdgasreserven befinden sich in einer Region, die *strategische Ellipse* genannt wird. Dazu zählen weite Teile des Mittleren Ostens und Bereiche Zentralasiens. Konflikte politischer, umweltpolitischer und ökonomischer Art verschärfen die ohnehin bestehende Spannung zwischen den Ölexporturen und den hochgradig abhängigen Importnationen (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 101). In der Vergangenheit kam es zu Ölembargos durch verschiedene Ölexporture, wie etwa die USA oder einzelne OPEC Mitgliedsstaaten. Auch militärische Interventionen dienten in der Vergangenheit der Sicherstellung eines kontinuierlichen Erdölangebots.

Die Erdölabhängigkeit beschränkt sich jedoch nicht ausschließlich auf die physischen Erdöllieferungen. Darüber hinaus besteht in Europa eine starke Abhängigkeit der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit und des Wirtschaftswachstums von der Höhe des Erdölpreises. Im Folgenden wird nun die Preisbildung auf dem Weltmarkt für Erdöl näher betrachtet.

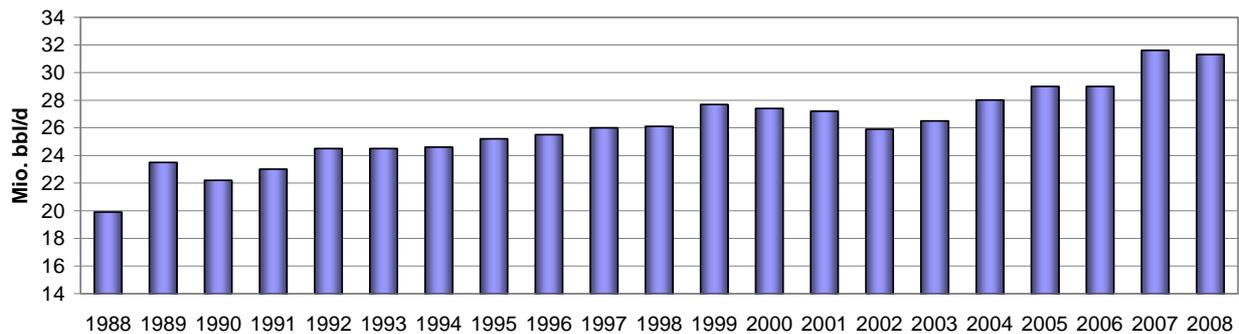
Ein wesentlicher Faktor der Preisbildung auf dem globalen Erdölmarkt ist die vorherrschende oligopolistische Marktstruktur. Detailliert wird diese zusammen mit dem Preisbildungsmechanismus im Erdölmarkt in Kapitel 3 erläutert. An dieser Stelle genügt der Hinweis, dass derzeit einzig die OPEC eine Anpassung der geförderten Erdölmengen vornimmt und auf diese Weise die Höhe der Weltmarktpreise für Erdöl steuern kann. Ein wichtiger Indikator für die Erdölabhängigkeit ist daher der sog. *Call-on-OPEC*. Dieser Wert gibt die Differenz zwischen der weltweiten Nachfrage nach Erdöl und dem Angebot der Nicht-OPEC Förderländer unter Berücksichtigung des OPEC Erdgasangebots NGLs an. Darüber hinaus dient ein Korrekturfaktor auf Basis der Historie zur Verbesserung der Genauigkeit des Call-on-OPEC.

$$\begin{aligned}
 \text{Call on OPEC (Mio. bbl / d)} &= \text{Total Demand (Mio. bbl / d)} \\
 &- \text{Total NonOPEC Supply (Mio. bbl / d)} \\
 &- \text{OPEC NGLs (Mio. bbl / d)} \\
 &- \text{"Miscellaneous to balance" for historical data}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Der Wert des Call-on-OPEC entspricht also derjenigen Erdölmenge, welche die OPEC zur Deckung der weltweiten Nachfrage fördern müsste. Entsprechend bildet der Call-on-OPEC ein Maß für die weltweite Abhängigkeit von der OPEC Erdölförderung. Abbildung 5.6 zeigt die Entwicklung des Call-on-OPEC seit 1988. Insbesondere seit 2002 nimmt die Abhängig-

keit von der OPEC Förderung weltweit wieder zu, nachdem sie 1999 aufgrund eines rasch wachsenden Fördervolumens in den Nicht-OPEC Ländern zunächst zurück ging. Erst im Jahr 2008 fiel der Call-on-OPEC wieder leicht in Folge sinkenden Nachfrage aufgrund der weltweiten Wirtschaftskrise.

**Abbildung 5.6** Entwicklung des Call-on-OPEC



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung nach IEA (1988-2008)

Der Erdölmarkt ist dabei durch eine hohe Volatilität des Erdölpreises gekennzeichnet. Aufgrund der hohen Erdölabhängigkeit der europäischen Wirtschaft, zieht ein volatiler Erdölpreis auch Schwankungen des Wirtschaftswachstums in Europa und Deutschland nach sich. Die Auswirkungen hoher Weltmarktpreise für Erdöl sind bei Entwicklungsländern noch gravierender. Wegen hoher Transportkosten, wie sie beispielsweise für Innerafrikanische Staaten anfallen, übersteigen die Erdölpreise die Spotpreise am Weltmarkt zum Teil um bis zu 50%.

In dieser Konstellation liegt der Gedanke nahe, die Versorgungssicherheit durch einen höheren Biokraftstoffanteil zu verbessern und dadurch gleichzeitig die wirtschaftliche Abhängigkeit vom Erdölpreis zu reduzieren. In den vergangenen 30 Jahren ist das Brasilien auf eindrucksvolle Weise gelungen. Die Ersparnis aus vermiedenen Erdölimporten betrug vom Start des Programms Proálcool bis 2004 etwa 50,2 Mrd. Euro. Um Versorgungssicherheit zu gewährleisten ist jedoch nicht unbedingt die heimische Produktion von Biokraftstoffen erforderlich. Die Angebotsstrukturen bei landwirtschaftlichen Produkten weisen eine deutlich geringere Konzentration auf, als dies bei Erdöl der Fall ist. Während die Produktion von Erdöl an die unveränderliche geografische Verteilung der Lagerstätten gekoppelt ist, bedarf es für die Produktion von Biokraftstoffen lediglich Ackerflächen in entsprechendem Umfang. Wenngleich die Wirtschaftlichkeit der Produktion von Biokraftstoffen ebenfalls von den unterschiedlichen Bedingungen in verschiedenen geografischen Regionen abhängt, so wird doch im Vergleich zur Erdölförderung eine Vielzahl von Produzenten erwartet. Wegen der deutlich geringeren Konzentration in diesem Markt ist nicht davon auszugehen, dass die Rohstoff- oder Endproduktpreise hohe Oligopolrenten enthalten. Gleichwohl erfüllen die derzeit erhält-

lichen Biokraftstoffe damit nur einen Teilbereich der Forderung nach Versorgungssicherheit. Erst Biokraftstoffe der zweiten Generation werden einen höheren Beitrag zur Deckung der globalen Energienachfrage leisten können.

Gleichzeitig könnten biogene Energiequellen nicht allein im Verkehrssektor, sondern auch im Bereich der Stromerzeugung zu einer erhöhten Versorgungssicherheit beitragen. Der europäische Emissionshandel schafft Anreize zum Einsatz CO<sub>2</sub>-freier Technologien und weniger CO<sub>2</sub>-intensiver Energieträger. Untersuchungen zeigen, dass in Deutschland hierdurch insbesondere Gaskraftwerke lukrativer werden, so beispielsweise bei BODE (2006) oder CLASING (2006). Vor allem bei der für die dritte Handelsperiode 2013-2020 geplanten Vollversteigerung der Emissionszertifikate für Stromerzeuger ist davon auszugehen, dass Gaskraftwerke verstärkt in der Mittellast eingesetzt werden und vermehrt als Preis setzendes Kraftwerk fungieren. Ein höherer Anteil von Strom aus Erdgas impliziert jedoch auch eine höhere Abhängigkeit vom Erdölpreis. Bis dato sind die langfristigen Lieferverträge für Erdgas ölinduziert. Die hohe Volatilität des Erdölpreises überträgt sich damit auch auf die Strompreise. Insofern ist zu überprüfen, ob hier durch eine verstärkte Förderung biogener Energiequellen nicht analog zum Verkehrssektor eine sinkende Abhängigkeit von Erdölpreis sowie eine steigende Versorgungssicherheit erreicht werden könnte.

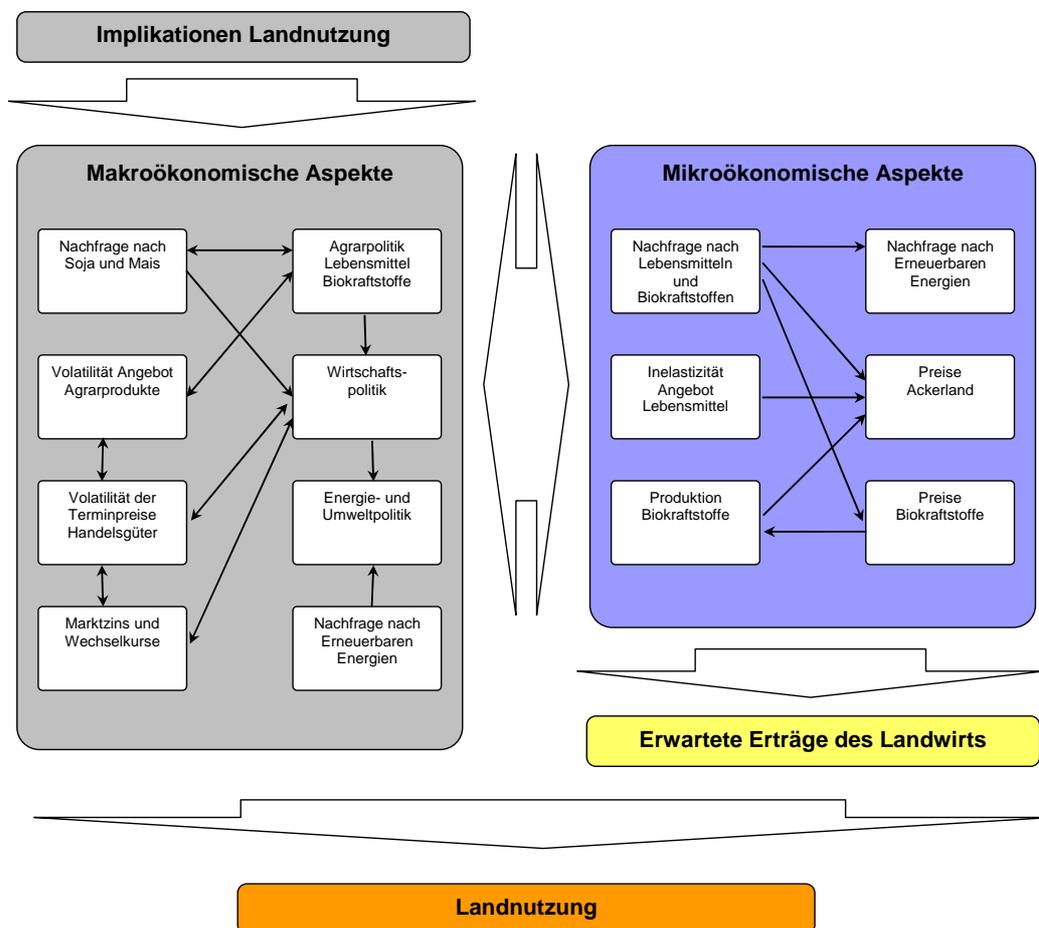
### **5.1.5 Food vs. Fuel - Die Rivalität um landwirtschaftliche Flächen**

Das Beispiel Brasilien zeigt, dass Biokraftstoffe die Versorgungssicherheit eines Landes deutlich erhöhen können. Immerhin decken Biokraftstoffe in Brasilien rund die Hälfte des Kraftstoffbedarfs im Straßenverkehr. Dies ist aber sicherlich nicht im gleichen Maßstab auf andere Länder übertragbar, sind die Bedingungen für Bioethanol in Brasilien doch nahezu optimal. In Deutschland und Europa etwa ist der heimische Anbau von Energiepflanzen nur in sehr beschränktem Maße möglich. Auch die USA importieren vermehrt Mais aus Südamerika, der dann zur Produktion von Bioethanol verwendet wird. Das Beispiel Mais zeigt, dass Biokraftstoffe der ersten Generation aus Energiepflanzen gewonnen werden, die aber ebenso zu den Grundnahrungsmitteln unserer Gesellschaft gehören. Hieraus erwachsen ein potentieller Konflikt in der Nutzung landwirtschaftlicher Erzeugnisse und eine Rivalität um landwirtschaftlich nutzbare Flächen. Dies wird in den folgenden Abschnitten diskutiert. Dazu werden zunächst die Wirkungszusammenhänge in der Landwirtschaft dargestellt, bevor auf den Einfluss von Biokraftstoffen auf die Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen, die Zusammensetzung der Erzeugung und die Preise für Nahrungsmittel detailliert untersucht wird. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf Biokraftstoffen der ersten Generation, also Bioethanol und Biodiesel. Die food vs. fuel Debatte schließt Biokraftstoffe der zweiten Generation nicht ein, denn zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen eignen sich jegliche Pflanzenbestandteile. Eine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion kann damit vermieden werden.

## WIRKUNGSZUSAMMENHÄNGE IN DER LANDNUTZUNG

Die aktuelle Diskussion über die Rivalität in der Landnutzung zwischen Biokraftstoffen und Lebensmitteln lässt sich bis in die 1970er Jahre zurückdatieren. Zu dieser Zeit kamen die ersten umfassenden Biokraftstoffprogramme auf, allen voran das brasilianische Proálcool Programm als Antwort auf den ersten Ölpreisschock. Wegen der attraktiven Einkommensmöglichkeiten, verlagerten sich viele Landwirte schon bald auf den Anbau von Energiepflanzen. Solche mikroökonomischen Entscheidungen hinsichtlich der Landnutzung ziehen makroökonomische Effekte nach sich. Für die Entscheidung eines Landwirts über die Landnutzung sind in erster Linie und nahezu ausschließlich die zu erwartenden Produktpreise entscheidend. Jedoch wird der Entscheidungsspielraum des Landwirts durch die jeweils vorhandenen Technologien in Form von Saatgut oder auch Maschinen, seine eigenen Fähigkeiten und den gegenwärtigen und künftigen Regulierungen in der Landwirtschaft eingeschränkt. Wie intensiv also letztlich die Konkurrenz um Ackerflächen ausfällt, hängt von einer Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren ab, die nun beleuchtet werden. Abbildung 5.7 zeigt die Wirkungszusammenhänge im Hinblick auf die Landnutzungsentscheidung eines Landwirts in vereinfachter Form.

Abbildung 5.7 Bestimmungsfaktoren und Wirkungszusammenhänge in der Landnutzung



Quelle: In Anlehnung an RATHMANN et al. (2009: 6)

Im Wesentlichen liegen die Kategorien der Einflussfaktoren, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, allen Untersuchungen zur Landnutzung zu Grunde. Trotzdem sind die Resultate der verschiedenen Untersuchungen kaum vergleichbar. Abhängig vom Fokus der jeweiligen Studien beziehen diese unterschiedliche Zeitabschnitte und unterschiedliche geographische Regionen ein, Preise werden in unterschiedlichen Währungen ausgedrückt und Preisanstiege real oder nominal angegeben. So ermitteln Allgemeine Gleichgewichtsmodelle tendenziell die langfristigen Effekte der Landnutzung und berücksichtigen daher auch Interdependenzen mit anderen Märkten. Die Wirkung kurzfristiger Preiseffekte wird demgegenüber fast ausschließlich in detaillierten Studien zu einzelnen Feldfrüchten untersucht, die wiederum die Auswirkungen auf andere Märkte ausklammern (MITCHELL 2008: 4).

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen makro- und mikroökonomischen Bestimmungsfaktoren der Nutzung landwirtschaftlicher Flächen. In der Kausalkette der Landnutzungsentscheidung sind die makroökonomischen Bestimmungsfaktoren der Anfangspunkt und der Endpunkt der Argumentation. Sie bilden die Rahmenbedingungen, innerhalb derer die Entscheidung zur Art der Landnutzung getroffen werden muss. Hierzu gehören etwa die Wirtschaftspolitik eines Landes oder die Preisvolatilität landwirtschaftlicher Produkte. Gleichzeitig beeinflusst jede Landnutzungsentscheidung wiederum die makroökonomischen Rahmenbedingungen. So werden beispielsweise Maßnahmen im Rahmen der Energiepolitik abhängig von der bestehenden Landnutzung getroffen. Jede Landnutzungsentscheidung wirkt sich also direkt und kurzfristig auf die Gewinnsituation eines Landwirts aus, jedoch gleichzeitig auch indirekt und mittel- bis längerfristig über die veränderten makroökonomischen Rahmenbedingungen. Üblicherweise ist der einzelne Einfluss auf die makroökonomischen Rahmenbedingungen jedoch so gering, dass dieser indirekte Effekt in der Entscheidung der Landnutzung letztlich nicht berücksichtigt wird. Zur Analyse der individuellen Landnutzungsentscheidung werden daher hauptsächlich die mikroökonomischen Bestimmungsfaktoren herangezogen.

Die mikroökonomischen Aspekte bestimmen über Angebot und Nachfrage den Produktpreis landwirtschaftlicher Erzeugnisse. Die Landnutzungsentscheidung eines Landwirts orientiert sich in erster Linie und nahezu ausschließlich an den zu erwartenden Preisen. Jedoch wird der Entscheidungsspielraum des Landwirts durch die jeweils vorhandenen Technologien in Form von Saatgut oder auch Maschinen, seine eigenen Fähigkeiten und den gegenwärtigen und künftigen Regulierungen in der Landwirtschaft eingeschränkt. Im Folgenden werden nun einzelne mikroökonomische Aspekte herausgegriffen und insbesondere im Hinblick auf die Vielzahl der Interdependenzen näher erläutert.

Der mikroökonomische Aspekt „Produktion Biokraftstoffe“ lässt sich auf die makroökonomischen Entwicklungen zurückführen. Insbesondere die Agrarpolitik, die Energie- und Umweltpolitik sowie die prognostizierte Zunahme in der Nachfrage nach Erneuerbaren Energien werden in Zukunft zu einer verstärkten Produktion verschiedener Biokraftstoffe führen. Für die

Europäische Union soll bis 2020 ein Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energieaufkommen von 20% erreicht werden. Zur Erreichung dieses Ziel soll auch der Anteil von Biokraftstoffen im Kraftstoffmarkt deutlich erhöht werden. In der Folge der höheren Biokraftstoffproduktion steigt der Wert von Ackerland. Verstärkt wird dieser Effekt noch, wenn Randflächen ebenfalls in Ackerland umgewandelt werden. WATANABE et al. (2007) und BENEDETTI et al. (2007) zeigen dies beispielsweise für die Regionen Paraná und São Paulo. In Erwartung größerer Profite steigen dann auch die Hektarpreise für Ackerland.

Die „Nachfrage nach Lebensmitteln und Biokraftstoffen“ wird ebenfalls durch politische Zielsetzungen und Regulierungen bestimmt. Die Wirtschafts-, Energie- und Umweltpolitik bestimmen zusammen mit der Agrarpolitik die Nachfrage nach Biokraftstoffen. Ausführlich werden die Möglichkeiten zur Steuerung der Nachfrage durch den Staat in Abschnitt 5.2.4 erläutert. Durch die Erhöhung der Nachfrage müssen ceteris paribus die Preise für Biokraftstoffe steigen. Dieser Effekt ist zunächst einmal kurzfristiger Natur, die Erhöhung der Nachfrage wirkt aber auch langfristig, wenn beispielsweise Wechselkosten für die neue Technologie aufgebracht werden. Die zunehmende Nachfrage nach Biokraftstoffen bewirkt ebenfalls eine steigende Inelastizität des Angebots von Lebensmitteln. Es ist davon auszugehen, dass hierdurch die Volatilität der Spot- und Terminpreise auf den Märkten für diese Produkte zunimmt und sich damit gleichzeitig die Planungssicherheit der Landwirte verschlechtert.

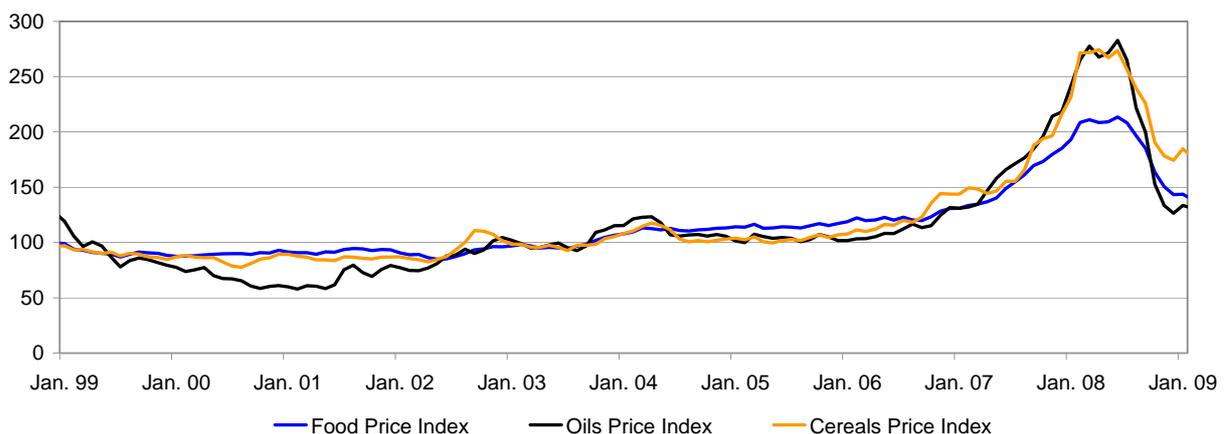
Im Ergebnis bestätigt dieser kurze Blick auf die Wirkungszusammenhänge der Landnutzung die prinzipielle Konkurrenz zwischen dem Anbau von Lebensmitteln und dem Anbau von Energiepflanzen. So ist es beispielsweise auch das erklärte Ziel der Europäischen Union, die Überproduktion von Lebensmitteln durch den verstärkten Anbau von Energiepflanzen einzudämmen. Dieser für die EU gesunde Rückgang in der Lebensmittelproduktion kann in anderen Staaten jedoch verheerende Folgen haben. Stets muss auch bedacht werden, dass die Verringerung der Abhängigkeit von ausländischen Energielieferungen gleichzeitig eine andere Abhängigkeit heraufbeschwört: bei vollständig heimischer Biokraftstoffproduktion möglicherweise die Abhängigkeit von Lebensmittellieferungen aus dem Ausland oder aber die Abhängigkeit von der Lieferung von Energiepflanzen und deren Erzeugnissen.

In der Realität wird die Landnutzungsentscheidung jedoch, anders als hier implizit unterstellt, nur in begrenztem Umfang ex-ante getroffen. Energiepflanzen gehören ebenso zu den Grundnahrungsmitteln unserer Gesellschaft. Mais, Raps, Soja und Getreide sind landwirtschaftliche Produkte, die auf dem Weltmarkt gehandelt werden. Ihr Verwendungszweck und damit die Landnutzungsentscheidung stehen daher letztlich erst ex-post bei physischer Lieferung fest. Eine Ausnahme stellt hier auf stillgelegten Ackerflächen produzierter Raps in Deutschland dar, der ausschließlich zur Energiegewinnung eingesetzt werden darf. Eine erhöhte Biokraftstoffnachfrage wirkt sich daher gleichzeitig auf die Weltmarktpreise für Nahrungsmittel aus. Dies wird nun am Beispiel der Biokraftstoffnachfrage der EU und der USA analysiert.

## DIE VERBREITUNG VON BIOKRAFTSTOFFEN ALS PREISTREIBER FÜR LEBENSMITTEL

Die rasante Zunahme der Preise für Nahrungsmittel der vergangenen Jahre ist eine schwerwiegende Last für die Menschen in Entwicklungsländern. Haushalte geben hier rund die Hälfte ihres Einkommens für Nahrungsmittel aus. Steigende Preise für die Grundnahrungsmittel haben deshalb verheerende Folgen: große Teile der Bevölkerung in Entwicklungsländern geraten dadurch in die Gefahr von Hunger. Der Preisanstieg bei den Grundnahrungsmitteln hat verschiedene Gründe. Dazu gehören beispielsweise der schwache Dollar und die steigenden Energiekosten, die die Produktionskosten der Nahrungsmittel verteuern. Studien zeigen jedoch, dass vor allem die Erhöhung der Biokraftstoffproduktion in der EU und den USA für diesen Preisanstieg verantwortlich ist (MITCHELL 2008: 1). Bevor dies jedoch detailliert analysiert wird, wird nun zunächst die Preisentwicklung bei Lebensmitteln in den vergangenen Jahren dargestellt.

Abbildung 5.8 Entwicklung der Lebensmittelpreise (2002 bis 2004 = 100)



Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2009)

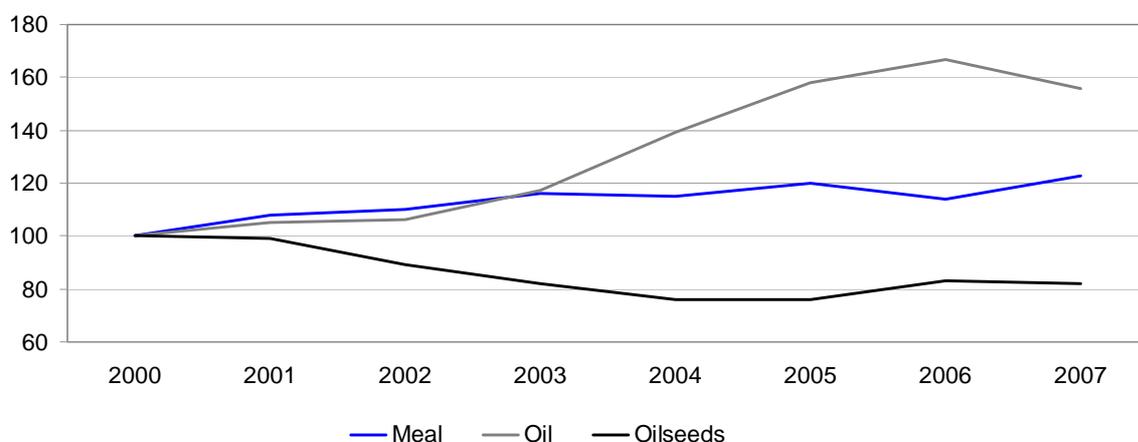
Der Preisindex für international gehandelte landwirtschaftliche Erzeugnisse hat sich zwischen 2004 und 2008 fast verdoppelt. Allein im Jahr 2007 stieg der Index dabei um knapp 50%. Davor waren die Preise recht stabil, sieht man von einem kurzen Einbruch zu Beginn dieses Jahrhunderts in Folge der Asienkrise ab. MITCHELL (2008: 3) führt dies in erster Linie auf den Anstieg der Getreidepreise zurück. Abbildung 5.8 zeigt, dass die Getreidepreise trotz der Rekorderten 2004/05 und 2005/06 ab 2005 drastisch anstiegen. So haben sich die Preise für Mais bis Mitte 2008 fast verdreifacht, die Preise für Weizen und Reis haben in diesem Zeitraum um 127% bzw. 170% zugenommen. Die Preisentwicklung bei Ölfrüchten verlief analog, wengleich leicht zeitverzögert.

Der Internationale Währungsfond schätzt, dass die gestiegene Biokraftstoffproduktion, vor allem in der EU und den USA, einen Anteil von rund 70% an der Preisentwicklung von Mais

und einen Anteil von etwa 40% an der Preisentwicklung von Sojabohnen hat (LIPSKY 2008). Die gestiegene Biokraftstoffproduktion hat zum einen die Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten drastisch erhöht. Zum anderen kam es gleichzeitig auch zu umfassenden Änderungen in der Landnutzung. Beide Effekte werden nun näher beleuchtet.

Zunächst wird die Entwicklung der Nachfrage nach Energiepflanzen und deren Erzeugnissen untersucht. In der Europäischen Union soll der Anteil erneuerbarer Energien bis 2020 auf 20% des Gesamtenergieverbrauchs erhöht werden. Entsprechend dieser Zielsetzung sieht die Biokraftstoffrichtlinie der EU eine Erhöhung des Biokraftstoffanteils auf 5,75% bis 2010 vor. Dabei sind die Mitgliedsstaaten frei in der Wahl der Instrumente, mit welchen sie dieses Ziel erreichen wollen. Mehrere Mitgliedsstaaten haben Verwendungsquoten eingeführt und die EU erlaubt die Befreiung oder Reduktion von Verbrauchssteuern auf Biokraftstoffe. Die Möglichkeiten des heimischen Anbaus von Energiepflanzen sind in der EU jedoch äußerst begrenzt und wegen der ungünstigen Anbaubedingungen auch recht teuer. Entsprechend haben die Importe von Ölsaaten in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Abbildung 5.9 veranschaulicht dies.

**Abbildung 5.9** Index der EU Ölsaaten Importe (2000 =100)



Quelle: Eigene Darstellung nach USDA (2009)

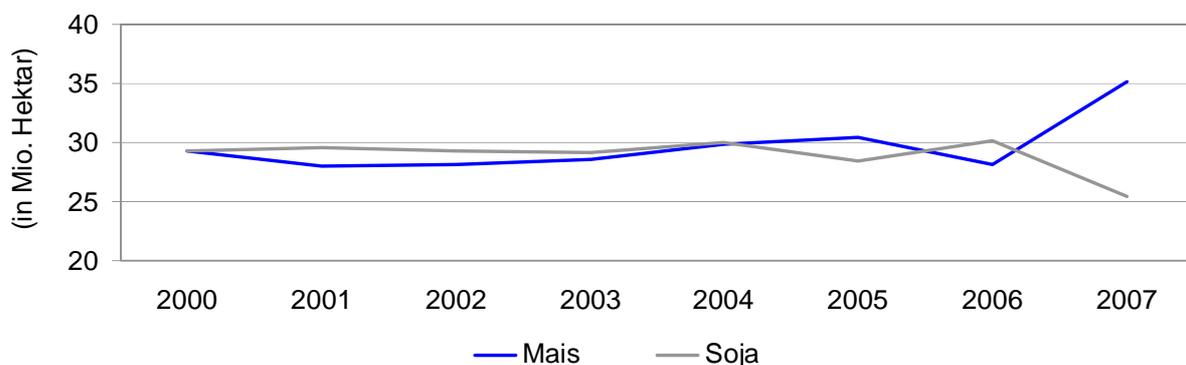
Zwischen 2000 und 2007 haben die Importe von Pflanzenöl in der EU um rund 2,5 Mio. t oder etwa 57% zugenommen. In den USA sind die Importe sogar noch deutlicher gestiegen. 2007 wurde rund 70% mehr Pflanzenöl importiert als noch im Jahr 2000. Das importierte Pflanzenöl wurde zur Produktion von Biodiesel verwendet, die in dem betrachteten Zeitraum ebenfalls deutlich gesteigert wurde. Insgesamt wurden 2007 weltweit rund 7% des Pflanzenöls zur Produktion von Biodiesel verwendet (MITCHELL 2008: 7). Die Nachfrage nach Pflanzenöl für die Produktion von Biodiesel ist damit hinreichend groß, um einen signifikanten Einfluss auf den Weltmarktpreis auszuüben. Die Entwicklung des Preisindex für Pflanzenöle und Ölsaaten der letzten Jahre bestätigt dies.

Ähnlich hat sich die Nachfrage nach Mais in den vergangenen Jahren entwickelt. Traditionell findet Mais hauptsächlich als Futtermittel Verwendung (WINDHORST 2007: 365). Im Jahr 2004 betrug der Futtermais Anteil rund 65% der gesamten Produktionsmenge. Bis 2007 nahm die Produktionsmenge von Futtermais nur geringfügig zu. Hingegen stieg die Verwendung von Mais zur Produktion von Bioethanol in diesem Zeitraum rapide an. Der überwiegende Teil des Produktionszuwachses ging in die Bioethanolproduktion und Bioethanolkorn kann für den Zeitraum 2004 bis 2007 jährliche Wachstumsraten von rund 36% verzeichnen. Weltweit sind die USA der größte Produzent von Bioethanol aus Mais: im vergangenen Jahr lag die Produktion bei gut 80 Mio. t Bioethanol. Zusammen mit der Europäischen Union, Kanada und China betrug die Produktionsmenge von Bioethanol auf Maisbasis etwa 86 Mio. t im Jahr 2007. Das entspricht etwa 11% der globalen Maisproduktion (MITCHELL 2008: 7). Die Nachfrage nach Biokraftstoffmais ist damit ebenfalls hinreichend groß, um den Weltmarktpreis für Mais nachhaltig zu beeinflussen. Analog galt dies für Pflanzenöl. Hinzu kommt, dass sich die Volatilität des Weltmarktes für Erdöl zum Teil auch auf die Märkte für landwirtschaftliche Erzeugnisse überträgt. Die Nachfrage nach Biokraftstoffen bildet hier das Bindeglied.

In Brasilien hat die Bioethanolproduktion in den vergangenen Jahren ebenfalls zugenommen. Gleichwohl ging hiervon keine signifikante Steigerung des Zuckerpreises aus, denn die Zuckerproduktion des Landes ist ebenfalls gestiegen. Brasiliens Anteil an den globalen Zuckerexporten hat sich im Zeitraum zwischen 2004 und 2007 sogar auf 40% erhöht, zuvor lag er bei rund 20% (ÚNICA 2008b).

Neben der Erhöhung der Nachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen, ist der Preisanstieg von Lebensmitteln in den vergangenen Jahren auch auf die umfassenden Änderungen der Landnutzung zurückzuführen. So haben beispielsweise die USA die Anbauflächen von Mais um rund 23% im Jahr 2007 erhöht. Dadurch sank gleichzeitig die Anbaufläche von Sojabohnen in den USA um etwa 16%. Grafisch wird dies in der folgenden Abbildung 5.10 dargestellt.

**Abbildung 5.10** Veränderung Landnutzung in den USA



Quelle: Eigene Darstellung nach MITCHELL (2008: 10).

In der Konsequenz dieser umfassenden Änderung in der Landnutzung sank die Sojaernte und verteuerte dadurch die Sojapreise. Insgesamt stiegen diese zwischen 2007 und 2008 um etwa 75% an, wobei der Anteil dieser Landnutzungsänderung nicht genau beziffert werden kann. Unzweifelhaft hat der Anbau von Mais zugunsten einer höheren Biodieselproduktion aber zu dem Preisanstieg bei Soja beigetragen.

Insgesamt lässt sich hier bestätigen, dass der Preisanstieg von Lebensmitteln zumindest teilweise auf die gestiegene Nachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen zur Produktion von Biokraftstoffen zurückzuführen ist und die umfassende Änderung der Landnutzung diesen Effekt noch verstärkt hat. Eine solche, hauptsächlich qualitative Analyse genügt für den Untersuchungszweck dieser Arbeit. Quantitative Untersuchungen wurden beispielsweise von JOHANSSON/AZAR (2006) durchgeführt. Als Konsequenz dieser Untersuchung müssen die Strategien zum Ausbau der Biokraftstoffproduktion sorgfältig überprüft werden. Lange Zeit wurde in der Europäischen Union fast ausschließlich die ökologische Nachhaltigkeit des Anbaus von Energiepflanzen diskutiert. Die Brisanz der steigenden Lebensmittelpreise hat den Umgang mit Biokraftstoffen zu einem Thema von internationaler Relevanz gemacht. So hat sich beispielsweise die G20 die Auswirkungen der Kommerzialisierung von Biokraftstoffen auf die Lebensmittelmärkte auf ihr Programm geschrieben (G20 2008: 2).

Vor dem Hintergrund zunehmender Lebensmittelpreise gewinnen insbesondere auch Biokraftstoffe der zweiten Generation an Bedeutung. Bei BtL-Kraftstoffen besteht zum einen eine wesentlich geringere Rivalität in der Landnutzung. Der Biokraftstoff kann aus Reststoffen und jeglichem pflanzlichen Material hergestellt werden. Zum anderen dürfte die Nachfrage nach Lebensmitteln zur Produktion von BtL-Kraftstoffen wegen dieser breiten Rohstoffbasis ebenfalls deutlich geringer ausfallen. Studien von GOLDEMBERG (2008) oder TURPIN et al. (2009) bestätigen dies.

### **5.1.6 Schlussfolgerungen**

Mit der Förderung von Biokraftstoffen werden verschiedene Ziele gleichzeitig verfolgt. Biokraftstoffe sollen dazu beitragen, die im Kyoto Protokoll festgeschriebenen Klimaziele zu erreichen und die begrenzten Erdölvorräte zu schonen. Zudem soll auf diese Weise die Versorgungssicherheit mit Energie erhöht und die Landwirtschaft gestärkt werden. Diesbezüglich haben die Ausführungen in den vorangehenden Abschnitten gezeigt, dass Biokraftstoffe tatsächlich einen Beitrag zu den genannten Zielen leisten. Dies ist aber nicht immer in dem gewünschten und oft propagierten Umfang der Fall. So sind Biokraftstoffe beispielsweise mitnichten klimaneutral, aber durch die Substitution mineralischer Kraftstoffen werden dennoch Emissionsminderungen erzielt.

Die Ausführungen der vorangehenden Abschnitte zeigen jedoch auch, dass sich die oben genannten Ziele teils deutlich kostengünstiger als durch den Einsatz von Biokraftstoffen erreichen lassen. Insbesondere betrifft dies die Klimaschutzkosten von Biokraftstoffen. Treibhausgasemissionen lassen sich durch Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebereich oder Maßnahmen innerhalb des Europäischen Emissionshandels mit weit geringeren Kosten vermeiden. Diese Aussage ändert sich auch nicht, wenn Biokraftstoffe der zweiten Generation betrachtet werden. Auf absehbare Zeit werden die Herstellkosten von BtL-Kraftstoffen nicht wesentlich unter jenen für Biokraftstoffe der ersten Generation liegen. Vergleichsweise hoch sind auch die Kosten für die Schaffung zusätzlicher Arbeitsplätze in der Landwirtschaft.

Das stärkste Argument für die Förderung von Biokraftstoffen ist die Erhöhung der Versorgungssicherheit. Brasilien ist dies auf eindrucksvolle Weise gelungen. Das südamerikanische Land deckt mittlerweile rund die Hälfte seines Kraftstoffbedarfs mit heimisch produziertem Biokraftstoff. Das Thema Versorgungssicherheit genießt auf EU Ebene derzeit eine sehr hohe Priorität. Das ist keineswegs verwunderlich, gehen Prognosen doch davon aus, dass die Importabhängigkeit der EU in den nächsten 20-30 Jahren drastisch steigen wird. Biokraftstoffziele können dazu beitragen, diesen Anstieg abzufedern. Dazu müssen die Biokraftstoffe nicht unbedingt aus heimischem Anbau von Energiepflanzen stammen. Die Ausführungen haben gezeigt, dass das Potential hierfür äußerst begrenzt ist. Der Markt für landwirtschaftliche Erzeugnisse weist jedoch eine weit geringere Konzentration auf, als dies bei Erdöl der Fall ist. Daher wird die Importabhängigkeit von landwirtschaftlichen Erzeugnissen als weniger gravierend eingestuft.

Ein weiteres Ergebnis der Ausführungen in diesem Kapitel betrifft die Ausgestaltung der Maßnahmen zur Förderung von Biokraftstoffen. Wie gezeigt wurde, stehen Biokraftstoffe mit Lebensmitteln in Konkurrenz um die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen. Die zunehmende Produktion von Biokraftstoffen hat zu einer Erhöhung der Nachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen und damit zu steigenden Preisen für die Grundnahrungsmittel geführt. Der Effekt ist dabei weniger in den Industrienationen, als vielmehr in den Entwicklungs- und Schwellenländern zu spüren. Die Lebensmittelpreise übersteigen das Einkommen von Teilen der Bevölkerung. Gleichzeitig nehmen der Anbau von Energiepflanzen und die Produktion von Biokraftstoffen auch natürliche Ressourcen in Anspruch.

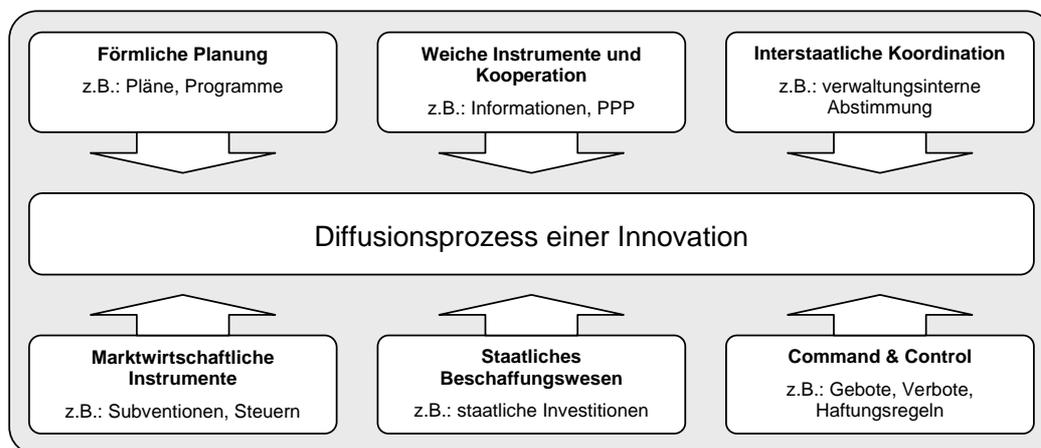
Insgesamt kann die Förderungswürdigkeit von Biokraftstoffen hier bestätigt werden. Gleichwohl müssen die Biokraftstoffstrategie und die Förderung von Produktion und Verwendung die oben ausgeführten sozialen und ökologischen Aspekte berücksichtigen. Dies gilt umso mehr, als der heimische Anbau von Energiepflanzen in Europa nur in sehr beschränktem Umfang möglich ist und daher auf den Import von Rohstoffen zurückgegriffen werden muss.

## 5.2 Die Förderung von Biodiesel in Deutschland

### 5.2.1 Instrumente zur Förderung der Diffusion von Innovationen

Der Begriff der staatlichen Förderung ist bislang in der Literatur ebenso wenig eindeutig definiert wie der oftmals synonym verwendete Begriff der Subvention (GRÖBNER 1983: 10f, BROCKS 2001: 23). Der Begriff Subvention bezeichnet in den folgenden Ausführungen in Anlehnung an ANDEL (1977: 491) ausschließlich die Geldzahlungen, die von der öffentlichen Hand ohne Gegenleistungen an Unternehmen gegeben werden. Die Definition von Subvention im weiteren Sinne wird in dieser Untersuchung als staatliche Förderung bezeichnet. Hierzu zählen alle anderen Fördertatbestände, mit denen der Staat in das Marktgeschehen eingreift.

**Abbildung 5.11** Instrumente zur Diffusionsförderung



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BRÖSSE (1996: 121) und HINTEMANN (2000: 61)

Das Spektrum der Instrumente zur Förderung der Verbreitung von Innovationen entspricht, wie in Abbildung 5.11 dargestellt, dem bekannten ordnungspolitischen Instrumentarium. Dieses ist bekannt und bedarf hier keiner weiteren Erläuterung. Die Instrumente zur Förderung der Diffusion von Innovationen definieren sich lediglich über ihre Ausgestaltung hinsichtlich dieser spezifischen Zielsetzung. Dabei fördern die Instrumente die Verbreitung von Innovationen, in dem sie Diffusionshemmnisse abbauen. In Abschnitt 2.3 wurden die Diffusionsfaktoren anhand eines objektorientierten Ansatzes kategorisiert und systematisiert. Diffusionshemmnisse werden hierbei den Objekten Hersteller, Produkt, Adopter und Rahmenbedingungen zugeordnet. In Abschnitt 4.3.2 wurde beispielsweise die mangelhafte Kompatibilität von Biokraftstoffen mit den vorhandenen Motorenkonzepten diskutiert. Dieses Diffusionshemmnis ist dem Objekt Produkt zugeordnet. Dagegen sind die in Kapitel 3 analysierten Diffusionshemmnisse, wie etwa die Marktstruktur, dem Objekt Hersteller zuzuordnen.

Die gängigsten Instrumente zur Förderung von Biokraftstoffen sind zum einen steuerliche Anreize und zum anderen Verwendungsquoten für Biokraftstoffe. Dabei bauen Verwendungsquoten an sich keine Diffusionshemmnisse ab. Sie legen vielmehr einfach eine bestimmte Verbreitung von Biokraftstoffen fest. Steuerliche Anreize konzentrieren sich auf den Abbau eines der entscheidenden Diffusionshindernisse: den wettbewerbsunfähigen Herstellkosten. So auch die Biokraftstoffstrategie in Deutschland. Wenngleich Biokraftstoffe hier durch eine Vielzahl verschiedener Instrumente gefördert werden, so liegt ein Schwerpunkt eindeutig auf den beiden oben genannten Förderinstrumenten.

Die nachfolgenden Ausführungen werden dies bestätigen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese Ausrichtung der Biokraftstoffstrategie richtig gewählt wurde. Nach der Darstellung der Förderung von Biokraftstoffen in Deutschland wird es Ziel des folgenden Kapitels 6 sein, den Erfolg der steuerlichen Förderung von Biokraftstoffen auf deren Verbreitung zu beurteilen. Hieraus sind im Rahmen der politisch-ökonomischen Zusammenfassung der Untersuchung in Kapitel 7 dann Rückschlüsse für eine Änderung der Biokraftstoffstrategie zu ziehen.

Die Strategie zur Förderung von Biokraftstoffen in Deutschland ist nicht in einem einzelnen Dokument niedergeschrieben. Vielmehr finden sich die Elemente der Biokraftstoffstrategie in agrarpolitischen, energiepolitischen und auch verbraucherpolitischen Maßnahmenpaketen wieder. Eine Vielzahl Veröffentlichungen analysiert detailliert einzelne Aspekte der Biokraftstoffstrategie, so z.B. MOTAAL (2008), BOMB et al. (2007) und BOZBAS (2008). Hier wird ein anderer Weg gewählt. Um die grundsätzliche ökonomische Wirkungsweise verschiedener Instrumente zur Förderung von Biokraftstoffen zu analysieren bedarf es keiner allzu detaillierten Beschreibung. Daher liegt der Fokus im Folgenden darauf, die deutsche Biodieselstrategie in einer zusammenhängenden Form darzustellen und hierdurch den Charakter der Förderung zu beschreiben. Die Darstellung der Biokraftstoffstrategie, wie sie auf den Lebenszyklus von Biokraftstoffen wirkt, scheint hierfür geeignet. Daher wird im Folgenden zunächst die Förderung von Biodiesel auf Produzentenseite und im Anschluss daran die Förderung von Biodiesel auf Konsumentenseite betrachtet.

## **5.2.2 Rahmenbedingungen der Förderung von Biokraftstoffen in Deutschland**

Bis 2020 soll der Anteil erneuerbarer Energien in der Europäischen Union auf 20% des Gesamtenergieverbrauchs erhöht werden. Damit dieses ambitionierte Ziel erreicht werden kann, hat sich die Europäische Union Ziele für den Biokraftstoffanteil im Kraftstoffmarkt gesetzt. Die Mitgliedsstaaten haben sich verpflichtet, diese Ziele einzuhalten. Damit dies aber möglich ist, wurden verschiedene Programme zur Förderung von Biokraftstoffen gestartet. Jedes Förderprogramm bewegt sich daher innerhalb der europäischen Biokraftstoffstrategie, wenngleich den Mitgliedsstaaten auch höhere Biokraftstoffziele gestattet sind. Dies gilt beispiels-

weise für Deutschland; die Ziele für Biokraftstoffe lagen insbesondere in der Vergangenheit über den europäischen Vorgaben.

Zur Einordnung des Förderprogramms in Deutschland, welches im nächsten Abschnitt dargestellt wird, empfiehlt es sich daher, sich zunächst den europäischen Zielen und Rahmenbedingungen für die Förderung von Biokraftstoffen zu widmen. Interessant ist hier insbesondere die Entwicklung der europäischen Biokraftstoffstrategie, die je nach Erfolg im Zeitverlauf immer wieder angepasst wurde. Als entscheidend für die Zielerreichung hat sich dabei die Vereinheitlichung der Fördermaßnahmen gezeigt.

Die Förderung von Biokraftstoffen in der europäischen Politik ist eng mit einer Vielzahl weiterer Politikgebiete verflochten. So haben die Rahmenbedingungen der Förderung von Biokraftstoffen beispielsweise Eingang in die energiepolitischen Entscheidungen der EU gefunden. Zudem sind sie untrennbar mit der Agrarpolitik verknüpft. Die gemeinsame Agrarpolitik der EU (*Common Agricultural Agreement*) von 1992 beinhaltet so auch das sog. *Blair House Agreement*, welches Produktionsquoten für Ölsaaten in den Mitgliedsstaaten festlegt. Explizit wird dort die Erlaubnis für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen auf Stilllegungsflächen erteilt. Etwa im selben Zeitraum wird auch erstmals die Beimischung von Biokraftstoffen diskutiert (EUROPÄISCHE KOMMISSION 1994) und im Folgenden der erste Regelungsrahmen zur Förderung von Biokraftstoffen geschaffen (WUPPERTAL INSTITUT 2005: 17).

Verbindliche Ziele werden in der Europäischen Union in Richtlinien formuliert. Diese müssen dann im Regelfall in nationales Recht überführt werden. Mit der Verabschiedung der *Richtlinie 2003/30/EG zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor* am 8. Mai 2003 wurden auch erstmals verbindliche europäische Ziele für den Anteil von Biokraftstoffen am Kraftstoffaufkommen beschlossen. Die Biokraftstoffrichtlinie sah vor, dass sich der Biokraftstoffanteil bis zum Jahr 2005 auf 2% und bis zum Jahr 2010 auf 5,75% erhöht (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2003c, 2005b). In der Folge wurden in den meisten Mitgliedsstaaten nationale Programme zur Förderung von Biokraftstoffen entwickelt. Der Hauptbestandteil dieser nationalen Förderprogramme waren Steuerbefreiungen für Biokraftstoffe. Dieses Instrument ergab sich direkt aus der in der Biokraftstoffrichtlinie ebenfalls enthaltenen *Transportation Fuels Fiscal Directive*. Während aber beispielsweise Schweden und Spanien eine vollständige Steuerbefreiung von Biokraftstoffen auf nationaler Ebene bewilligten, fiel die Steuerbefreiung in anderen Mitgliedsstaaten geringer aus. Dies machte eine größere Harmonisierung der Besteuerung von Energie in Europa nötig (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2003e). Es zeichnete sich jedoch bereits frühzeitig ab, dass das Biokraftstoffziel für 2005 nicht in allen Mitgliedsstaaten erreicht wird (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2005a). Er lag 2005 schließlich bei lediglich 1,4% anstelle des Zielwerts von 2%.

Zur Intensivierung der Anstrengungen legte die Europäische Kommission bereits 2005 den sog. *EU Biomass Action Plan* vor. Dieser legt einen Schwerpunkt auf dem integrierten Ansatz

zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor, zur Finanzierung erneuerbarer Energien und zur Erzielung von Fortschritt in der Fahrzeugtechnologie<sup>23</sup>. Hierin findet sich auch erstmalig der Vorschlag, die Euronorm für Biokraftstoffe EN 14214 verpflichtend als Qualitätsanforderung für Biokraftstoffe einzuführen. Damit soll die Verwendung von Biokraftstoffen auf solche beschränkt werden „whose cultivation complies with minimum sustainability standards“ (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2005b: 10).

Nach den Bemühungen um eine Vereinheitlichung der Biokraftstoffstrategien in den europäischen Mitgliedsstaaten und des integrativen Ansatzes zur Förderung von Biokraftstoffen, wird der globalen Dimension von Biokraftstoffen erstmals in der *EU Strategy for Biofuels* Rechnung getragen. Diese baut auf dem *EU Biomass Action Plan* auf und wurde von der Europäischen Kommission im Jahr 2006 vorgelegt (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2006c). Die Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern wird zum Ziel der ambitionierten Biokraftstoffstrategie erklärt (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2006d). Insgesamt lassen sich drei Ziele identifizieren (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2006b):

- Die Förderung von Biokraftstoffen sowohl in der EU als auch in Entwicklungsländern
- Die Unterstützung von Entwicklungsländern bei der Erhöhung der Biokraftstoffproduktion zur Stimulierung einer nachhaltigen Wirtschaftsentwicklung
- Die Ermöglichung der Nutzung von Biokraftstoffen in großem Maßstab durch die Verbesserung ihrer Konkurrenzfähigkeit; die Intensivierung der Forschung zu Biokraftstoffen der zweiten Generation

Die *EU Strategy for Biofuels* enthält hierzu ein Maßnahmenbündel, das insbesondere die Nachfrage nach Biokraftstoffen fördern soll. Dazu gehört auch die Nachfragesteuerung mittels Verwendungsquoten. Ihre genaue Ausgestaltung in Deutschland wird später erläutert werden. Großbritannien hingegen überprüft derzeit die mögliche Einführung eines Zertifikatesystems für den Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor.

### 5.2.3 Förderung auf der Produktionsseite

Die Förderung von Biokraftstoffen geschieht mit dem Ziel, die bestehenden Diffusionshemmnisse abzubauen. Bei der Förderung von Biodiesel auf Produktionsseite bestehen Diffusionshemmnisse bezüglich des Diffusionsobjekts Hersteller. Diffusionshemmnisse im Hinblick auf das Produkt sowie die Adopter werden durch die Förderung auf der Verwendungsseite abgebaut, wenngleich die Zuordnung zu einem Diffusionsobjekt nicht immer ganz einfach ist.

---

<sup>23</sup> Der *Biomass Action Plan* beschränkt sich aber nicht nur auf Biokraftstoffe im Verkehrssektor, sondern erstreckt sich auch auf andere Möglichkeiten der Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung. Insbesondere enthält er auch Bestimmungen für Biomasse zur Erzeugung von Elektrizität und Wärme.

## FLÄCHENSTILLEGUNGSPRÄMIEN UND BETRIEBSPRÄMIEN ALS SUBVENTIONEN

Nach der Argumentation der Befürworter von Biokraftstoffen als nachwachsende Energiepflanzen wird die Produktion von Biodiesel in Deutschland nicht subventioniert. Es existiert beispielsweise keine Mindestvergütung, wie sie das „Erneuerbare Energien Gesetz“ für Strom aus regenerativen Energiequellen vorsieht. Dieser Argumentation muss hier jedoch widersprochen werden, denn beim Anbau von Energiepflanzen wirkt die Flächenstilllegungsprämie wie eine Subvention.

Bis Ende 2008 wurde in der Europäischen Union eine Prämie für stillgelegte Ackerflächen gezahlt. Die obligatorische Flächenstilllegung, von der nur wenige Kleinbetriebe ausgeschlossen waren, wurde zur Begrenzung der Nahrungsmittelproduktion innerhalb der EU eingeführt (EUROPÄISCHE KOMMISSION 1997: 42). Daher konnten die Flächenstilllegungsprämien auch für genutzte Ackerflächen gewährt werden, solange auf den Anbau von Nahrungsmitteln verzichtet wurde<sup>24</sup>. Dies schließt die Nutzung der Stilllegungsflächen für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und Energiepflanzen ein. Die Flächenstilllegungsprämie ist daher als Pauschaltransfer zu sehen, der unabhängig davon gewährt wird, ob die Flächen stillgelegt oder ob auf den stillgelegten Flächen nachwachsende Rohstoffe angebaut werden. Jedoch erzielt der Landwirt durch diesen Einkommenseffekt einen höheren Deckungsbeitrag für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen auf seinen zur Stilllegung ausgewiesenen Ackerflächen. Insofern ist die Flächenstilllegungsprämie bei Anbau von Energiepflanzen als indirekte Subvention von Biokraftstoffen zu betrachten<sup>25</sup>.

Zwar werden von der Zulassung des Anbaus auf stillgelegten Flächen prinzipiell alle nachwachsenden Rohstoffe begünstigt, dennoch wird die relative Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen nachwachsenden Rohstoffe zu ihren jeweiligen Substituten durch diese Regelung unterschiedlich stark beeinflusst. Von dieser Regelung profitieren überproportional diejenigen nachwachsenden Rohstoffe, bei denen die Rohstoffkosten einen hohen Anteil an den Bereitstellungskosten des Endproduktes haben bzw. bei denen die Nutzungskosten des Bodens einen hohen Anteil an den Rohstoffkosten haben (BROCKS 2001: 33). Da bei Biodiesel, wie Abschnitt 4.2.2 gezeigt hat, die Rohstoffkosten einen vergleichsweise hohen Anteil an den Bereitstellungskosten haben und darüber hinaus der Rohstoff Raps eine vergleichsweise geringe

---

<sup>24</sup> Gleichwohl weist BROCKS (2001: 24) darauf hin, dass dieses Prinzip in den Verordnungen zur Flächenstilllegung nicht durchgehend konsistent angewandt wird. Auf stillgelegten Flächen ist mit Ausnahme des Anbaus von Energiepflanzen jegliche andere wirtschaftliche Nutzung untersagt. So dürfen stillgelegte Flächen nicht als Parkplatz genutzt werden (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG 2000: 16), auch wenn die Landwirte keine Gebühr für das Parken erheben (DIDZOLEIT/KOCH 1998: 208). Diese Regelungen in den Verordnungen zur Flächenstilllegung sind insofern nicht konsistent mit dem Ziel der Reduktion der Nahrungsmittelproduktion. An dieser Stelle ist jedoch der Einwand zu erbringen, dass die Flächenstilllegungsprämie dann Gefahr läuft, rein auf Basis der Deklaration der wirtschaftlich genutzten Fläche als Ackerfläche vergeben zu werden. Es sollte kein Anreiz für die Ausweitung der Ackerflächen auf dem Papier zur wirtschaftlichen Nutzung geschaffen werden.

<sup>25</sup> Auf diese Weise ist es möglich, Non-Food Raps zu einem Preis auf dem deutschen Markt anzubieten, welcher unter den Grenzkosten des Anbaus liegt (BROCKS 2001: 25f). Im Gegensatz zu Food-Raps, welcher zur Herstellung von Lebensmitteln verwendet wird. Dies ist eine bemerkenswerte Konstellation, da es sich bei Food-Raps und Non-Food-Raps um zwei völlig identische landwirtschaftliche Produkte handelt.

Flächenproduktivität und damit hohe Nutzungskosten des Bodens aufweist, verbessert sich die Wettbewerbsfähigkeit von Biodiesel relativ stärker als die anderer Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe (BECKER et al. 1988: 18). Die Flächenstilllegungsprämie fördert damit insbesondere den Anbau von Raps zur Produktion von Biodiesel, obwohl sie ihrem Prinzip nach auch den Anbau anderer nachwachsender Rohstoffe zuließe.

Die Flächenstilllegungsprämie ist jedoch nur eingeschränkt zur Förderung von Biodiesel geeignet. Durch die Koppelung des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen an die Flächenstilllegungen können keine stabilen Rahmenbedingungen für die Produktion von Biokraftstoffen geschaffen werden. Die Flächenstilllegungspolitik der Europäischen Union ist ein flexibles Instrument der Steuerung der Angebotsmengen auf dem Getreidemarkt. Entsprechend der Entwicklung auf den Getreidemärkten wird die Stilllegungsquote jährlich neu festgelegt. In der Folge kam es in der Vergangenheit zu entsprechenden Schwankungen des Anbauvolumens von Non-Food-Raps. Im Ergebnis ist die Flächenstilllegungsprämie kein geeignetes Instrument, um die von der Europäischen Union verfolgten Biokraftstoffziele zu erreichen. Hierfür sind stabile Rahmenbedingungen nötig. Soll der Biodieselanteil langfristig die Biokraftstoffziele in Deutschland und der Europäischen Union erreichen, dann müssen die Anbaukosten von Raps unabhängig von der Deklaration der genutzten Ackerflächen wettbewerbsfähig sein.

Daher wird begrüßt, dass die obligatorische Flächenstilllegung zum Ende des Jahres 2008 abgeschafft wurde (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2008: 1). An ihre Stelle tritt die neue und einheitliche Betriebsprämienregelung. Durch diese kann der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen nun auf stillgelegten oder nicht stillgelegten Flächen erfolgen und im Rahmen der Energiepflanzenregelung zusätzlich gefördert werden. Ein solcher Vorschlag wurde bereits 2005 vom Europäischen Parlament gemacht (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2005: 90). Daher werden künftig geringere Schwankungen im Anbauvolumen von Non-Food-Raps erwartet.

## **BEIHILFEN ZUR ERRICHTUNG VON ANLAGEN**

Nach dem Anbau des Rohstoffes Raps ist die industrielle Gewinnung von Pflanzenöl der nächste Produktionsschritt zur Herstellung von Biodiesel. Bei der Verarbeitung der Rapssaatens muss zwischen der Errichtung von Anlagen und der eigentlichen stofflichen Verarbeitung unterschieden werden (BROCKS 2001: 55). Eine Förderung der stofflichen Verarbeitung existiert derzeit nicht und Subventionen sind für die Zukunft weder auf deutscher noch auf europäischer Ebene geplant. Hingegen werden bis heute teilweise noch Beihilfen für die Errichtung der Verarbeitungsanlagen gewährt (CONNEMANN/FISHER 1999). Dabei handelt es sich um einmalige Hilfen, die bei der Berechnung des Fördervolumens für Biokraftstoffe gegebenenfalls zu berücksichtigen sind. Dies entspricht auch der Förderung von Eigenverbrauchsanlagen für Biodiesel (FNR 2009b).

## FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Ein weiteres wichtiges Instrument, insbesondere zur weiteren Kommerzialisierung von Biodiesel, stellt die Subventionierung von Forschung und Entwicklung dar. Die Förderung von Forschung und Entwicklung beschränkt sich meist jedoch nicht auf einen Biokraftstoff, sondern schließt verschiedene Biokraftstoffarten ein. Weltweit wird Biokraftstoffforschung vornehmlich mit dem Ziel betrieben, die Produktionskosten von Biokraftstoffen weiter zu senken und diese damit zu einem wettbewerbsfähigen Produkt zu machen. So konnte beispielsweise in den USA durch Forschungsförderung seitens des US Department of Energy eine Senkung der Produktionskosten für Enzyme um den Faktor 30 erreicht werden (WORLDWATCH INSTITUTE 2007: 279f). Enzyme werden bei der Herstellung von Bioethanol aus Zellulose benötigt, einem Herstellungsprozess, der bislang aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten nur in Versuchsanlagen eingesetzt wird.

Es liegt in der Natur der Sache, dass vor allem die Erforschung und Entwicklung jener Biokraftstoffe gefördert wird, die sich in eben jenem Stadium befinden und die Marktreife noch nicht erlangt haben. Dazu zählen insbesondere BtL-Kraftstoffe, aber auch die Wasserstofftechnologie. Dabei geht die Förderung sowohl von den deutschen Bundesländern, als auch von der Bundesregierung und der Europäischen Union aus.

Die Bundesländer in Deutschland haben zur Förderung von Forschung und Entwicklung erneuerbarer Energien, wozu auch Pilot- und Demonstrationsanlagen zählen, ein vielfältiges Programm entworfen. Neben der allgemeinen Technologieförderung wurden auch spezielle Energietechnologieprogramme aufgelegt, in denen explizit auch erneuerbare Energien gefördert werden. Üblicherweise sind diese Förderprogramme an eine Betriebsstätte im jeweiligen Bundesland gebunden (FFU 2007: 176). Auffällig ist dabei die Verschiebung der Förderungsschwerpunkts in den letzten Jahren. Zwar umfasst die Förderung der klassischen regenerativen Energien noch immer einen großen Teil des gesamten Fördervolumens, jedoch haben sich die Forschungsaktivitäten bei nachwachsenden Rohstoffen stark erhöht. Insbesondere Baden-Württemberg und Bayern stellen umfangreiche Förderungsvolumen für diesen Bereich bereit. In Baden-Württemberg werden nachwachsende Rohstoffe seit 2002 im Rahmen des Forschungsprogramms „*Nachwachsende Rohstoffe – Forschungsprojekte für den ländlichen Raum (Erneuerbare Energien)*“ mit einem Volumen von mehr als 5 Mio. EUR gefördert. Die seit dem Jahr 2006 bestehende Forschungsplattform für Bioenergie wird mit 2,4 Mio. EUR gefördert (HAUK 2006). Das Bundesland Bayern legt seinen Schwerpunkt noch deutlicher auf die Herstellung synthetischer Kraftstoffe, was die folgenden Beispiele zeigen. Der Schwerpunkt der Förderstrategie in Deutschland liegt jedoch auf Pilotprojekten zur kommerziellen Nutzung von Brennstoffzellen.

Beispiele für geförderte Forschungsprojekte zu Biokraftstoffen sind zahlreich. Auf Bundesebene lässt sich insbesondere die Förderung der Demonstrationsanlage zur Biomasseverga-

sung von Choren in Freiberg mit Beteiligung der Süd-Chemie AG nennen. Die Unterstützung der Regierung beläuft sich auf ca. 1,37 Mio. EUR. Die Demonstrationsanlage in Freiberg ist weltweit wohl die technologisch fortschrittlichste Anlage, der Startschuss für den Bau wurde im Jahr 2003 gegeben. Ziel ist es, mit Hilfe der Pilotanlage zu einer ökonomischen und ökologischen Bewertung dieser neuen Technologie zu kommen. Die Vorarbeiten dazu wurden unter Federführung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg durchgeführt.

Förderung von europäischer Seite betrifft in Deutschland insbesondere das Vorhaben des Clausthaler Umwelttechnik-Instituts GmbH (CUTEC 2009). Die Europäische Union beteiligt sich hier finanziell bei der Entwicklung einer Fischer-Tropsch Pilotanlage (IEA 2008: 59). Ebenso unterstützt die Landesregierung Niedersachsen das Pilotprojekt mit ca. 1 Mio. EUR. Kernstück des Projekts ist ein neuer Reaktortyp mit dessen Hilfe Biomasse in Synthesegas umgewandelt werden soll. Die Ergebnisse des Pilotprojekts sollen in der zweiten Stufe dann mittels einer Demonstrationsanlage in der Praxis erprobt werden. Weitere Forschungsprojekte werden im Rahmen des siebten *Rahmenprogramms für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration* gefördert (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2006e).

Auf indirekte Weise wird die Erforschung neuer Technologien durch die Unterstützung von Forschungsinstitutionen gefördert. MILLER (2005) hebt in diesem Zusammenhang besonders die Förderung des Technologie- und Förderzentrums im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe Straubing hervor. Das Fördervolumen wird hier mit insgesamt 1,7 Mio. EUR im Jahr 2005 angegeben. Zusammen mit dem Bund bezuschusst auch das Land Bayern diese Forschungsinstitution. Mit dem Neubau des Technikums als der korrespondierenden Baumaßnahme kommen der Forschungsinstitution umfassende Subventionen in Höhe knapp 6 Mio. EUR zu (TFZ 2005).

Die beschriebenen Pilot- und Demonstrationsprojekte sind hier beispielhaft zu verstehen. Es existiert eine Vielzahl weiterer ähnlicher Projekte, die aus Landesmitteln, durch die Bundesregierung oder durch die Europäische Union gefördert werden. Eine detaillierte Aufstellung der Förderung erneuerbarer Energien durch die Bundes- und Landesregierungen wird von der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe im Rahmen des Biokraftstoffportals bereitgestellt (FNR 2009c). Die Förderung von Biokraftstoffen der nächsten Generation ist zukunftsgerichtet und hat keine nennenswerten Auswirkungen auf die gegenwärtige Wettbewerbsfähigkeit von Biodiesel und Bioethanol.

## **DIE ROLLE VON QUALITÄTSNORMEN FÜR BIODIESEL**

Die industrielle Nutzung von Energiepflanzen zur Herstellung von Biokraftstoffen ist in Deutschland und Europa, sowohl bezogen auf ihren Wert als auch auf die hergestellte Menge, noch gering. Ihr Erfolg hängt nicht nur von der Konkurrenzfähigkeit hinsichtlich des End-

verbraucherpreises ab, sondern auch von dem Vertrauen in die technischen Eigenschaften des Biokraftstoffs. Die Unsicherheit bezüglich der Qualität von Biokraftstoffen, vor allem in Hinblick auf die Verträglichkeit in konventionellen Motoren, ist bislang noch sehr hoch. In der Presse finden sich oft widersprüchliche Aussagen zur Umweltwirkung und der Motorenverträglichkeit von Biokraftstoffen.

Eine niedrige Qualität von Biokraftstoffen wirkt sich nicht nur negativ auf das Unternehmen aus, welches das mangelhafte Produkt herstellt oder vertreibt. Die gesamte Branche gerät unter einen Pauschalverdacht und leidet unter dem Vertrauensverlust der Konsumenten. Langfristig können Biokraftstoffe daher nur dann erfolgreich sein, wenn sichergestellt ist, dass ihre Qualität bestimmten Mindestanforderungen genügt und Informationsdefizite bei den Konsumenten überwunden werden. Hierzu bietet sich die Einführung einer Qualitätsnorm für Biokraftstoffe an. Gleichzeitig benötigen Behörden eine solche Norm, um mögliche Risiken beurteilen zu können, die durch den Einsatz von Biokraftstoffen für die Gesundheit, die Sicherheit und die Umwelt entstehen können. Gewährleistungen von Originalgeräteherstellern sind ungültig, wenn der in ihren Fahrzeugen verwendete Kraftstoff nicht einer bestimmten Norm entspricht. Normen sind infolge dessen eine Voraussetzung für das Inverkehrbringen von Biodiesel (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2005: 72).

In Deutschland existieren im Wesentlichen zwei Normen für Biodiesel: die im Jahr 2003 auf europäischer Ebene eingeführte Norm für Biodiesel für Kraftfahrzeuge DIN EN 14214 ersetzte die bis dato bestehenden Normen in Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich, Schweden und der Tschechischen Republik. Daneben existiert die von der ASTM International 2001 genehmigte Norm ASTM D6751. Beide Normen sind für reinen Biodiesel entwickelt worden, was dessen Verwendung zusammen mit mineralischem Diesel in Gemischen ab 5% ermöglicht. Ein wichtiges Merkmal beider Normen besteht darin, dass sie die physikalischen und chemischen Merkmale spezifizieren, die für einen zufriedenstellenden Betrieb von Fahrzeugen mit Biodiesel notwendig sind. Damit erfüllen beide Normen den Anspruch der Qualitätssicherung und tragen zum Abbau von Informationsdefiziten auf Konsumentenseite bei. Gleichzeitig werden bei beiden Normen jedoch weder der Quelle der Rohstoffe noch dem Herstellungsprozess Beschränkungen auferlegt. Dieser Tauglichkeitsansatz lässt Innovationen bei gleichzeitiger Qualitätssicherung des Produkts zu (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2005: 72f).

Aus Sicht der Vertrauensbildung beim Konsumenten ist dabei die vergleichsweise strenge Euronorm für Biodiesel zu begrüßen. Gleichzeitig herrscht global gesehen jedoch ein Mangel an einer gemeinsamen Norm für Biodiesel. Zwar wurden Normen für Biodiesel in Argentinien, Brasilien, Japan, Kanada, Südkorea und Österreich erfolgreich eingeführt bzw. derzeit geprüft, die größtenteils auf der europäischen und ASTM Norm beruhen. Sie bleiben jedoch hinsichtlich der Qualitätsanforderungen hinter der europäischen Norm zurück. Teils ist dies durch die weniger strengen Anforderungen der Motoren des jeweiligen Landes durchaus be-

gründet. Folge davon sind aber separierte Märkte, die sich nicht mit dem Anspruch globalen Energiehandels und niedrigen Transaktionskosten vereinbaren lassen.

Die Einführung einer international gültigen Qualitätsnorm für Biodiesel und andere Biokraftstoffe ist dabei nicht einseitig positiv zu sehen. Sollte sich diese nicht an den hohen Qualitätsstandards in Europa orientieren, dann ist zu befürchten, dass die Biodieselqualität für europäische Verbraucher nicht hochwertig genug ist. In der Folge könnte es wiederum zu der bereits angesprochenen Separierung der Märkte kommen, fast sicher aber zu einem Rückgang der Nachfrage wegen des fehlenden Vertrauens in die Qualität des Biokraftstoffs.

#### **5.2.4 Förderung auf der Verwendungsseite**

Nach der Analyse der Förderung von Biokraftstoffen auf der Produktionsseite wird nun erörtert, wie die Verwendung von Biodiesel gefördert wird. Bei der Förderung von Biokraftstoffen auf Verwendungsseite geht es hauptsächlich um den Abbau von Diffusionshemmnissen bei den Diffusionsobjekten Produkt und Adopter. Die Entscheidung zur Übernahme der neuen Technologie wird von den potentiellen Adoptern in erster Linie auf Basis eines Vergleichs der Tankstellenpreise von Biodiesel und mineralischem Diesel getroffen. Soweit das Ergebnis der theoretischen Analyse, das später noch zu bestätigen sein wird. In der Vergangenheit lagen die Herstellkosten von Biodiesel auch unter Berücksichtigung der Flächenstilllegungsprämie deutlich über den Herstellkosten mineralischen Dieselmotorkraftstoffs. Daher geht es bei der Förderung auf der Verwendungsseite um die Gewährleistung der Wettbewerbsfähigkeit. Auf diese Weise werden die hohen Herstellkosten nicht zu einem Diffusionshemmnis.

#### **DIE STEUERLICHE FÖRDERUNG VON BOKRAFTSTOFFEN**

Die Welthandelsorganisation WTO beschäftigt sich auf globaler Ebene mit der Regulierung der tarifären Einordnung von Produkten. Entsprechend der Einordnung von Produkten unterliegen diese verschiedenen WTO Prinzipien. Die Einordnung von Biodiesel als landwirtschaftliches Produkt hat zur Folge, dass die WTO Prinzipien der Meistbegünstigung sowie der Inländerbehandlung auf Biodiesel angewandt werden (HENNIGES 2007: 39). Der Begriff Meistbegünstigung steht dabei für die Gleichbehandlung aller WTO Handelspartner. Ein Land, welches einem WTO Handelspartner besondere Handelsbedingungen einräumt, muss diese auch allen anderen WTO Staaten zugestehen. Das Prinzip der Inländerbehandlung steht hingegen für die Gleichbehandlung von Unternehmen. Inländische Unternehmen dürfen gegenüber ausländischen Unternehmen weder bevorzugt behandelt, noch umgekehrt diskriminiert werden.

Für Biodiesel bedeutet das, dass eine Förderung in Form einer Steuerbefreiung nicht ausschließlich auf im Inland produziertem Biodiesel angewendet werden kann. Sie muss auch für

importierten Biodiesel gelten. Die Steuerbefreiung an sich ist konform zu den WTO Richtlinien, weil diese als Umweltmaßnahme in die sog. Grüne Box<sup>26</sup> eingeordnet wird (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2005: 4). Eine Förderung der inländischen Produktion von Biodiesel ist damit nur bedingt möglich, denn oftmals ist die Produktion von Biodiesel im Ausland kostengünstiger. Zur Stützung der heimischen Produktion des Biokraftstoffs eignet sich vielmehr die Erhebung von Einfuhrzöllen<sup>27</sup>.

In Deutschland waren Biokraftstoffe bis Mitte 2006 von der Energiesteuer, ehemals Mineralölsteuer, befreit. In mehreren Mitgliedsstaaten der Europäischen Union ist dies auch heute noch der Fall. Seit Anfang 2004 galt diese Steuerbefreiung auch für Biokraftstoffe als Beimischung zu mineralischen Kraftstoffen. Im Gegensatz zum Tauglichkeitsansatz der Biodieselnorm gelten Kraftstoffe jedoch nur dann als Biokraftstoffe im Sinne des Energiesteuergesetzes, wenn sie aus bestimmten Rohstoffen hergestellt wurden (MINÖSTG 1992). Damit wurde die Produktion von Kraftstoffethanol aus fossilen Rohstoffen und deren Deklaration als Bioethanol ausgeschlossen (WUPPERTAL INSTITUT 2005: 19ff).

Die Befreiung von der Energiesteuer für Biodiesel wird üblicherweise als Subvention des Biokraftstoffs betrachtet. Dies lässt sich einfach zeigen. Es muss lediglich untersucht werden, ob nicht möglicherweise andere Gründe vorliegen, die für eine solche Steuerbefreiung sprechen. Dabei muss unterschieden werden zwischen der originären Energiesteuer und der darin enthaltenen Ökosteuer. BROCKS (2001) kommt zu dem Schluss, dass die Steuerbefreiung aus anderen Überlegungen als der Subvention von Biodiesel kaum zu begründen ist. Das originäre Energiesteueraufkommen wird teils zweckgebunden für den Straßenbau verwendet. Unabhängig vom Kraftstoff beansprucht der Verkehr die Straßeninfrastruktur in gleicher Höhe. Unter diesem Gesichtspunkt ist eine Befreiung des Biodiesels von der Energiesteuer also nicht zu rechtfertigen. Eine ähnliche Argumentation bezieht sich auf fiskalischen Zweck der Energiesteuer. Entsprechend ist die Energiesteuerbefreiung von Biokraftstoffen tatsächlich als Subvention zu betrachten und nicht aus anderen Gründen zu rechtfertigen.

Das Ziel einer solchen Subventionierung von Biodiesel ist der Ausgleich der höheren Kosten zur Herstellung des Biokraftstoffs gegenüber dem mineralischen Dieselmotorkraftstoff und damit

---

<sup>26</sup> Die Welthandelsorganisation klassifiziert handelsverzerrende Maßnahmen und Praktiken durch Unterteilung in sog. Boxen. Die Zuordnung zu einer Box entspricht der Beurteilung der Handelsverzerrung einer Maßnahme und entscheidet damit über ihre Zulässigkeit.

Die sog. *Rote Box* enthält verbotene Maßnahmen. Erfolgt die Zuordnung einer Maßnahme zur Roten Box, so ist diese Maßnahme unmittelbar zu beenden. Die sog. *Gelbe Box* enthält Maßnahmen, die einen Produktionsanreiz auslösen und handelsverzerrend sind. Entsprechend müssen diese Maßnahmen abgebaut werden. Der Zeithorizont ist dabei jedoch größer als bei Politiken, welche der Roten Box zugeordnet sind. Die sog. *Blaue Box* enthält Direktzahlungen zur Beschränkung der Produktion, die auf fixen Flächen und Erträgen beruhen. Diese Stützungsmaßnahmen sind zugelassen. Die sog. *Grüne Box* enthält hinsichtlich einer möglichen Handelsverzerrung unbedenkliche Maßnahmen. Die Welthandelsorganisation geht davon aus, dass beispielsweise Struktur- oder Umweltprogramme keine oder nur geringe Handelsverzerrungen aufweisen.

<sup>27</sup> Auch hier gilt das WTO Prinzip der Meistbegünstigung. Unterschiedliche Zollsätze für Biokraftstoffe aus unterschiedlichen Ländern sind damit zunächst einmal nicht zulässig. Ziel der WTO ist es, den handelsverzerrenden EU-Zoll auf Bioethanol langfristig zu senken und darüber hinaus nicht-tarifäre Handelshemmnisse abzuschaffen oder alternativ in Zölle umzuwandeln (BMWA 2005).

die Förderung der Konkurrenzfähigkeit. Bei der Herstellung von Biodiesel sind jedoch große Schwankungen möglich, ebenso wie bei der Herstellung von mineralischen Kraftstoffen. Dasselbe gilt auch für Bioethanol. Ausführlich wurde dies in Abschnitt 4.2 diskutiert. Hieraus ergeben sich große Schwankungen in der Differenz der Herstellkosten. Daher ist eine starre Subventionierung über die Befreiung von einer unveränderlichen Energiesteuer kaum zur Förderung von Biokraftstoffen geeignet. Diesen Schwankungen in den Herstellkosten trägt die Energiesteuerbefreiung insofern Rechnung, als durch jährliche Anpassungen eine Überkompensation der Mehrkosten von Biokraftstoffen gegenüber mineralischen Kraftstoffen verhindert wird. Das Bundesfinanzministerium muss dem Bundestag jährlich einen Bericht zur Preisentwicklung von Biokraftstoffen vorlegen. Aus dem ersten Bericht vom März 2005 ging hervor, dass bei gegebenen Herstellkosten der Energiesteuersatz zu einer Überkompensation führt. Entsprechend wurde, wie auch in Tabelle 5.4 aufgeführt, ab August 2006 eine Energiebesteuerung auf Biodiesel von 0,09 EUR/l Reinkraftstoff und 0,15 EUR/l Beimischung eingeführt (BUNDESREGIERUNG 2005).

Seit 2007 gelten in Deutschland Verwendungsquoten für Biokraftstoffe, die im weiteren Verlauf dieser Untersuchung noch detailliert erläutert werden. Die Einführung der Verwendungsquoten macht hinsichtlich der Steuerbefreiung eine Unterscheidung zwischen Bioreinkraftstoff und den beigemischten Biokraftstoffmengen notwendig. Während innerhalb der Verwendungsquoten der volle volumenbezogene Steuersatz für Biokraftstoffe erhoben wird, unterliegen Absatzmengen außerhalb dieser Quoten weiterhin einer reduzierten Besteuerung. Das entspricht der Logik hinter der Steuerbefreiung. Die Beimischungsmengen von Biodiesel zu mineralischen Kraftstoffen unterliegen keinem Wettbewerbsdruck, sie müssen gegenüber der mineralischen Alternative nicht konkurrenzfähig sein. Daher fällt hier der volle volumenbezogene Steuersatz an. Anders bei Biodiesel als Reinkraftstoff. Für diesen gelten weiterhin die reduzierten Steuersätze, wie in Tabelle 5.4 aufgeführt. Hingegen wird für Bioethanol der Steuersatz abhängig von der festgestellten Überkompensation jährlich neu festgelegt.

Die Steuerbegünstigung von Biokraftstoffen wird durch die Mehrwertsteuer nochmals verstärkt. FOLKERS/BROCKS (1999: 97f) betonen die Bedeutung der Mehrwertsteuer. Gemäß §10 des Umsatzsteuergesetzes (USTG 2005) sind spezielle Verbrauchssteuern in die Bemessungsgrundlage der Mehrwertsteuer einzubeziehen. Dies trifft auch auf die Energiesteuer zu. Durch die Energiesteuerbefreiung von Biokraftstoffen fällt auch die Bemessungsgrundlage für die Mehrwertsteuer geringer aus. Entsprechend muss ein geringerer absoluter Betrag der Mehrwertsteuer abgeführt werden. Dies wirkt sich in gleicher Weise auf die Wettbewerbsposition von Biokraftstoffen aus wie die Energiesteuerbefreiung. Das Ausmaß der Subventionierung pro Liter wird erhöht, ohne die Art der Begünstigung zu ändern (BROCKS 2001: 66).

**Tabelle 5.4** Steuersätze für Biokraftstoffe in Deutschland

	bis 7/2006	ab 8/2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<b>Energiesteuer (EUR/l)</b>								
Diesel	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704
<b>Biodiesel</b>								
B 100	befreit	0,09	0,09	0,15	0,183*	0,245*	0,303*	0,422*
B 5	befreit	0,15	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704	0,4704
Pflanzenöl	befreit	befreit	befreit	0,10	0,185	0,26	0,33	0,45
Benzin	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545
<b>Bioethanol</b>								
E 85	befreit	befreit	0,012	abhängig von festgestellter Überkompensation				
E 5	befreit	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545
<b>Umsatzsteuer (%)</b>								
Alle Kraftstoffe	16,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00

\* Gesetzentwurf 2009

Quelle: ENERGIESTG (2006), MINÖSTG (1992), FNR (2009a)

Letztlich bewirkt die Energiesteuerbefreiung also nicht nur direkt, sondern auch indirekt über den geringeren Mehrwertsteuerbetrag eine Subventionierung von Biokraftstoffen. Die Subvention von Biokraftstoffen, wie hier dargestellt, kann jedoch nur dann ihren Zweck vollständig erfüllen, wenn eine Anpassung an die jeweils bestehenden Differenzen in den Herstellkosten vorgenommen wird. Dies ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Von der Entwicklung der Vergangenheit kann nicht auf die Entwicklung in der Zukunft geschlossen werden. Daher ist eine ex-post Anpassung kritisch zu sehen. Eine ex-ante Anpassung scheint ebenfalls kaum möglich, hierbei muss auch die Gefahr der Verhinderung von Produktivitätssteigerungen beachtet werden.

## **DIE EINFÜHRUNG VON VERWENDUNGSQUOTEN**

Unter den reduzierten volumenbezogenen Energiesteuersatz fallen in Deutschland seit Anfang 2007 nur noch jene Biokraftstoffmengen, welche über die seit diesem Zeitpunkt gültigen Verwendungsquoten hinaus am Markt abgesetzt werden. Die Verwendungsquoten sind im Biokraftstoffquotengesetz (BIOKRAFTQUG 2006) festgeschrieben und erhöhen sich jährlich. Tabelle 5.5 zeigt die Verwendungsquoten nach Biokraftstoffen in der Übersicht.

**Tabelle 5.5** Verwendungsquoten für Biokraftstoffe in Deutschland

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Biodiesel</b>									
energetisch	4,4%	4,4%	4,4%	4,4%	4,4%	4,4%	4,4%	4,4%	4,4%
volumetrisch	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%	4,8%
<b>Bioethanol</b>									
energetisch	1,2%	2,0%	2,8%	3,6%	3,6%	3,6%	3,6%	3,6%	3,6%
volumetrisch	1,8%	3,0%	4,2%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%
<b>Globalquote</b>									
energetisch			5,25%*	6,25%*	6,25%*	6,25%*	6,25%*	6,25%*	3,00%*/**

\* Gesetzentwurf 2009    \*\*bezogen auf die Einsparung von Treibhausgasen

Quelle: BIOKRAFTQUG (2006), FNR (2009a)

Die energetische Verwendungsquote für Biodiesel bleibt bis zum Jahr 2015 bei der heutigen Quote von 4,4%. Das entspricht einem Volumenanteil von rund 4,8%. Im Falle von Bioethanol steigt der energetische Pflichtanteil von 1,2% im Jahr 2007 auf 3,5% ab dem Jahr 2010. Dabei sieht der Gesetzgeber jedoch eine gewisse Flexibilität für die Kraftstoffanbieter am Markt insofern vor, als die Verwendungsquote jeweils für die gesamte Absatzmenge eines Anbieters gelten und insofern nicht in jedem Liter Kraftstoff und nicht für jede Kraftstoffart erfüllt sein muss. Auf diese Weise ist es möglich, dass im konkreten Fall Ethanol theoretisch nur dem 98-Oktan-Kraftstoff in einer höheren als der Pflichtbeimischung zugeführt werden und dadurch der 95-Oktan-Kraftstoff ohne Ethanolbeimischung bleiben könnte (HENNIGES 2007: 106). Damit können technische Probleme, wie beispielsweise der zu hohe Dampfdruck bei geringen Bioethanolbeimischungen, verringert werden.

Über diese Unterquoten hinaus muss ab dem Jahr 2009 gleichzeitig auch eine globale Biokraftstoffquote erfüllt werden, die sich aus den Vorgaben der europäischen Biokraftstoffrichtlinie ergibt (RICHTLINIE 2003/30/EG 2003). Biokraftstoffe innerhalb dieser Quote werden mit dem vollen Energiesteuersatz belegt. Ab 2015 wird in der Globalquote auch die Klimawirkung einzelner Biokraftstoffe berücksichtigt. Wie allerdings die Berechnung der Klimawirkung vollzogen wird, ist noch nicht festgelegt, wird jedoch umso heftiger diskutiert.

### 5.2.5 Schlussfolgerungen

Die Ausführungen der vorangehenden Abschnitte haben einen zusammenhängenden Überblick über die Förderung von Biokraftstoffen in Deutschland gegeben. Die hier dargestellten Maßnahmen zur Förderung von Biodiesel in Deutschland bewirken ausnahmslos eine beschleunigte Diffusion des Biokraftstoffs. Jedoch kann an dieser Stelle noch keine Aussage darüber getroffen werden, wie stark der Einfluss der einzelnen Instrumente tatsächlich ist.

Zudem müssen die eingesetzten Instrumente zur Förderung der Verbreitung von Biokraftstoffen unter politischen Aspekten mit weiteren Zielen kompatibel sein, was sich nachteilig im Hinblick auf die Diffusionswirkung erweisen kann.

Dabei kommen in Deutschland abhängig von der Biokraftstoffgeneration jeweils unterschiedliche Fördermaßnahmen zur Anwendung. Bei Biokraftstoffen der zweiten Generation liegt ein Schwerpunkt auf der Subventionierung von Forschung und Entwicklung. Auf diese Weise gelingt es, das Potential von Biokraftstoffen auch für die Zukunft zu sichern. Sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht werden die Anforderungen an Biokraftstoffe künftig steigen. Bei Biokraftstoffen der ersten Generation hingegen wird die kurzfristige Wettbewerbsfähigkeit gefördert. Der Schwerpunkt liegt dabei eindeutig auf der steuerlichen Behandlung von Biokraftstoffen und der Einführung von Verwendungsquoten.

Die Bewertung einer verpflichtenden Verwendungsquote im Hinblick auf die Verbreitung von Biokraftstoffen ist nicht trivial. Einerseits ist mit der Festlegung von Verwendungsquoten eine sofortige Wirkung auf die Verbreitung von Biokraftstoffen verbunden, zumindest dann, wenn der ursprüngliche Biodieselanteil wie in Deutschland unter der eingeführten Verwendungsquote liegt. Durch die Pflichtmenge, die in der Folge auf den Markt kommt, steigt der Marktanteil von Biokraftstoffen sofort an. Andererseits setzt dieses Instrument der Verbreitung von Biokraftstoffen gleichzeitig auch Grenzen. Eine Diffusion über die Verwendungsquoten hinaus findet nur dann statt, wenn Biokraftstoffe gegenüber mineralischen Kraftstoffen wettbewerbsfähig sind. Verwendungsquoten haben jedoch nur einen indirekten Einfluss auf den technologischen Fortschritt der Herstellungsverfahren von Biokraftstoffen. Durch Verwendungsquoten wird ein stabiler Absatzmarkt geschaffen, der private Investoren anzieht und die Investition in Forschung und Entwicklung attraktiv macht. In erster Linie sind diese Forschungsinvestitionen zu erwarten, weil die Bereitstellungskosten für den Kraftstoff steigen und Innovationen daher die Wettbewerbsfähigkeit der Mineralölkonzerne und anderer privater Investoren im Kraftstoffmarkt sichert. Dieser Effekt kann jedoch nur sehr schwer quantifiziert werden.

Auch durch die Befreiung oder teilweise Befreiung der Biokraftstoffe von der Energiesteuer kann deren Wettbewerbsfähigkeit gegenüber mineralischen Kraftstoffen erhöht werden. Wie in vielen anderen Ländern, so gehört die steuerliche Behandlung von Biokraftstoffen auch in Deutschland zu den wichtigsten Instrumenten der Förderung von Biokraftstoffen der ersten Generation. Die Beurteilung der Wirksamkeit der steuerlichen Bevorzugung von Biokraftstoffen wird, wie angekündigt, in Kapitel 6 untersucht. Es wird dann Aufgabe des Kapitels 7 sein, Schlussfolgerungen aus den vorliegenden Ergebnissen zu ziehen.

## 5.3 Die Förderung von Bioethanol in Brasilien

### 5.3.1 Die Einführung des Programms Proálcool

Die Implementierung des Proálcool Programms in Brasilien war die Antwort auf die erste Ölkrise Mitte der 1970er Jahre und sollte gleichzeitig als Lösung für die fallenden Zuckerpreise auf dem internationalen Markt dienen. Bioethanol war jedoch keineswegs neu in Brasilien. Bei Einführung des Proálcool Programms hatte Brasilien bereits eine lange Tradition beim Einsatz von Kraftstoffbioethanol. Schon 1931 wurde von der brasilianischen Regierung eine Verwendungsquote von 5% für Kraftstoffbioethanol eingeführt. Das 1933 gegründete Institute of Sugar and Alcohol (IAA) hatte die Aufgabe, das Marktgleichgewicht z.B. durch Quoten für die Zuckerproduktion aufrechtzuerhalten (KALTNER et al. 2005: 14). Kurzzeitig nahm die Bedeutung von Bioethanol während des Zweiten Weltkriegs zu. Auch Brasilien litt unter Lieferschwierigkeiten bei Erdöl und so stieg die Produktion von Bioethanol. Aber erst durch die Einführung von Proálcool konnte Bioethanol seinen Marktanteil beträchtlich ausdehnen (WALTER et al. 2008: 272).

Die vielleicht wichtigste Voraussetzung für den Erfolg des Proálcool Programms war die lange Tradition Brasiliens als Zuckerlieferant. Zuckerrohr wurde bereits im 17. Jahrhundert in den nordöstlichen Regionen Brasiliens eingeführt, um das bis dahin bestehende globale Zuckermonopol Frankreichs zu brechen. Der größte Teil der französischen Zuckerproduktion fand auf den karibischen Inseln statt, von denen das Zuckerrohr dann nach Brasilien gebracht wurde. Seit dieser Zeit ist die Zuckerproduktion ein wichtiger Pfeiler der brasilianischen Landwirtschaft. 1970 wurden in Brasilien rund 50 Mio. t Zuckerrohr und hieraus ca. 5 Mio. t Zucker produziert, von denen der größte Teil exportiert wurde (REFOCUS 2001: 27f).

Gleichzeitig war die brasilianische Wirtschaft hierdurch aber in hohem Maße den Schwankungen des Weltmarktpreises für Zucker unterworfen. So drohten Brasilien durch den Preisverfall am Weltmarkt ernsthafte ökonomische Konsequenzen. Gleichzeitig stellten die steigenden Erdölpreise eine noch deutlichere Gefahr für das brasilianische Wirtschaftswachstum dar. In den 1970er Jahren war Brasilien stark von Erdölimporten abhängig (WHEALS et al. 1999: 25). Die brasilianische Strategie zur Sicherung des Wirtschaftswachstums bestand in der zügigen Substitution von Erdöl durch lokal verfügbare Energiequellen. Vor diesem Hintergrund wurde nicht allein das Programm Proálcool zur Substitution von Benzin durch Bioethanol implementiert. Zur Implementierung des Programms wurde durch die brasilianische Regierung ein institutioneller Rahmen geschaffen. Es wurden verschiedene Ministerien einbezogen und eine inter-ministeriale Kommission gebildet. Gleichzeitig wurde durch das Programm ProOleo die Produktion von Pflanzenöl zur Substitution von Diesel gefördert. Ein Atomkraftprogramm sollte Brasilien auch bei der Stromerzeugung unabhängiger vom Ausland machen.

Das Programm Proálcool gilt gemeinhin als das erfolgreichste Programm zur Förderung der Verbreitung von Biokraftstoffen. Die Produktion von Bioethanol ist heute gegenüber mineralischen Kraftstoffen wettbewerbsfähig und bedarf keiner Subvention mehr. Darin unterscheidet sich die brasilianische Bioethanolindustrie von allen anderen Ländern. Wenngleich auch in Deutschland oder den USA die Produktion von Biokraftstoffen in Ausnahmefällen konkurrenzfähig ist, so ist das in großem Umfang nur in Brasilien der Fall. Bioethanol wird in Brasilien fast ausschließlich aus Zuckerrohr hergestellt, obwohl das Programm Proálcool keine Beschränkung der Rohstoffbasis vorgesehen hatte und auch die Produktion aus Cassava oder Hirse gefördert wurde (ROSILLO-CALLE/CORTEZ 1998: 115).

Die Kosten der Ethanolproduktion lagen zu Beginn des Programms noch bei fast 100 USD/bbl und damit in einem ähnlichen Segment wie der Weltmarktpreis für Erdöl. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass durch die Reduzierung der Ölimportmenge Einsparungen in harter Währung möglich waren. Gleichzeitig reduzierte die Substitution von Benzin durch Bioethanol die Schulden von Brasilien im Ausland. Auf diese Weise war das Proálcool Programm ein effizienter Weg, um die Schulden in Dollar durch nationale Währungssubventionen zu ersetzen, welche letztlich von den Nutzern mineralischer Kraftstoffe gezahlt wurden (MOREIRA/GOLDEMBERG 1997: 229).

### **5.3.2 Die Förderung von Bioethanol in den vier Programmstufen**

Die Förderung von Bioethanol in Brasilien durchlief vier Programmstufen. Zu den ergriffenen Maßnahmen gehört beispielsweise auch eine Preisgarantie für Bioethanol in Höhe von 65% des Benzinpreises, eine Steuersenkung von 5% für Ethanolfahrzeuge, Subventionen für Darlehen, die von den Ethanolproduzenten zur Erweiterung der Produktionskapazitäten benötigt werden, Verwendungsquoten und schließlich die staatliche Kontrolle über die Rohstoffe zur Garantie eines ausreichenden Angebots (KALTNER et al. 2005: 15). Auf jeder Stufe des Programms kommen dabei abhängig von der jeweiligen Zielsetzung der Stufe und den Marktgegebenheiten verschiedene Instrumente zum Einsatz.

#### **ERSTE PROGRAMMSTUFE (1975-1979)**

Während der ersten Jahre des Programms bestand das primäre Ziel des Programms im Aufbau von Bioethanolanlagen. Dafür sollte die bereits existierende Infrastruktur der Zuckerproduktion genutzt werden. Entsprechend wurden die Bioethanolanlagen an bereits vorhandene Zuckerfabriken angeschlossen. Die Alkoholproduktion wuchs in dieser Zeit von rund 600 Mio. l/a auf über 3,4 Mrd. l/a.

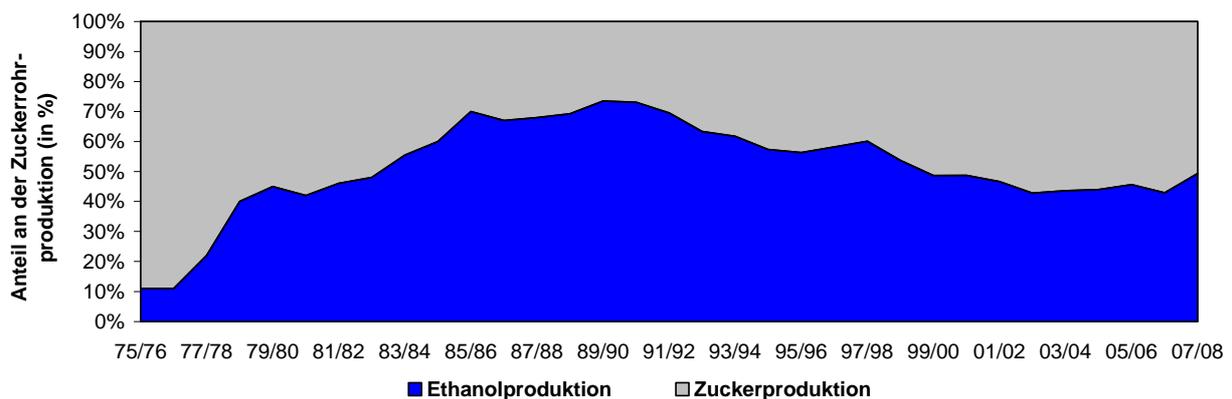
Während dieser ersten Jahre war das Programm durch ein gespanntes Verhältnis von Regierung und den multinationalen Automobilkonzernen Brasiliens geprägt. Letztlich hat die Ent-

schlossenheit der damaligen Regierung zum Erfolg der Bioethanolfahrzeuge geführt (ROSILLO-CALLE/CORTEZ 1998: 116). Jedoch zeigte sich dieser erst in der zweiten Phase des Programms. Zwar kamen bereits 1978 die ersten reinen Bioethanolfahrzeuge auf den Markt, ihre Verbreitung setzte jedoch erst zu Beginn der 1980er Jahre ein.

### ZWEITE PROGRAMMSTUFE (1980-1986)

Während der zweiten Programmstufe, der sog. Affirmation Phase, wurden vermehrt autonome, nicht an Zuckerfabriken angeschlossene Bioethanolanlagen gebaut. Der zweite Ölpreisschock verdreifachte die Erdölpreise. Damit machte Erdöl knapp die Hälfte der Importausgaben Brasiliens aus. Die brasilianische Regierung nahm dies zum Anlass, weitere Maßnahmen im Zuge von Proálcool zu beschließen. Um die Umsetzung zu beschleunigen, wurden neue Behörden gegründet, darunter auch das National Council of Alcohol und die National Executive Commission for Alcohol.

Abbildung 5.12 Bioethanol- und Zuckerproduktion in Brasilien



Quelle: Eigene Darstellung nach ÚNICA (2009a, b, c), MdA (2009) und IBGE (2009)

In der Folge erreichte die Bioethanolproduktion im Jahr 1986 mit ca. 12,3 Mrd. l ihren ersten Höchststand und lag damit deutlich über den Wachstumserwartungen der Regierung (WALTER et al. 2008: 272). Diese war von einem Wachstum in Höhe von 15% ausgegangen, so dass die für das Jahr 1986 erwartete Produktion 10,7 Mrd. l betragen hatte. Abbildung 5.12 zeigt die dynamische Zunahme des Bioethanolanteils bis 1986. Der Anteil von Bioethanol an der gesamten Zuckerrohrproduktion hat sich im Vergleich zu 1976 um den Faktor 7 erhöht.

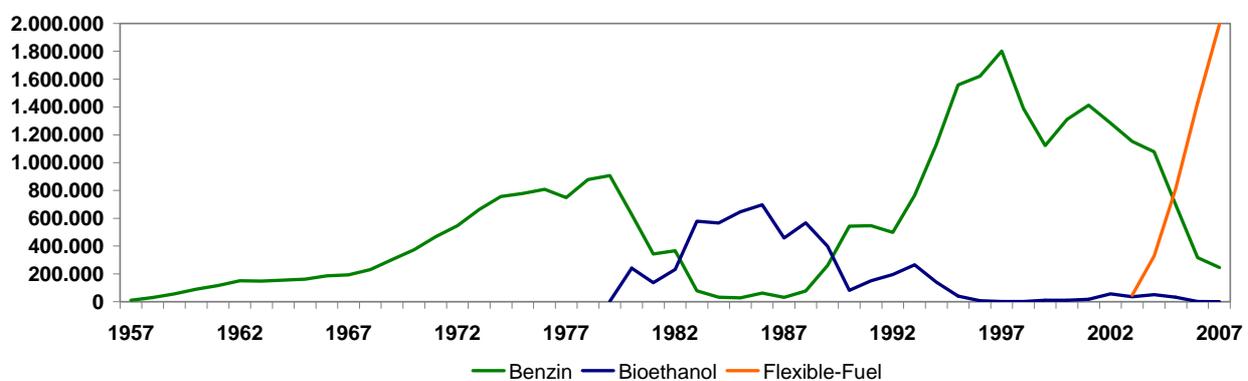
### DRITTE PROGRAMMSTUFE (1987-1997)

Während die ersten beiden Phasen des Proálcool Programms durch steigende und äußerst volatile Weltmarktpreise für Erdöl gekennzeichnet waren, fielen die Ölpreise in dieser dritten

Phase von 30-40 USD/bbl auf ein Niveau von 12-20 USD/bbl und verharrte dort für etwa 10 Jahre. Der Effekt des fallenden Ölpreises kam bereits 1988 zum Tragen als auf politischer Ebene eine Überarbeitung des Alkohol Programms gefordert wurde. Diese Entwicklung traf zusammen mit einer Periode knapper Haushaltsmittel zur Finanzierung der Förderprogramme Erneuerbarer Energien (KALTNER et al. 2005: 16). Entsprechend schrumpfte das Investitionsvolumen in Erneuerbare Energien.

Die brasilianischen Fahrzeughersteller zeigten daraufhin eine starke Tendenz zur Produktion von Fahrzeugen, deren Standard globalen Anforderungen genügte und die daher benzinbetrieben waren. Gleichzeitig lockerte die Regierung die Import- und Exportbedingungen für die benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeuge zu Beginn der 1990er Jahre.

**Abbildung 5.13** Verkaufsmenge Bioethanolfahrzeuge im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung nach ÚNICA (2008)

Während 1986 mit knapp 700.000 Bioethanolfahrzeugen noch der überwiegende Teil der Neuwagen als Bioethanolfahrzeuge verkauft wurden, waren es 1990 lediglich noch etwa 100.000 und 1997 dann nur noch knapp über 1.100 Bioethanolfahrzeuge. Abbildung 5.13 zeigt deutlich den drastischen Rückgang der Verkaufszahlen reiner Ethanolfahrzeuge.

Die günstigeren Bedingungen für Benzinfahrzeuge waren jedoch nicht allein entscheidend für diese Entwicklung. Der Markt für Bioethanolfahrzeuge war geprägt von einem hohen Misstrauen gegenüber den Perspektiven von Kraftstoffbioethanol. Ausbleibende Investitionen führten dazu, dass das Angebot die Nachfrage nach Bioethanol nicht mehr decken konnte und die Verkaufszahlen für Bioethanolfahrzeuge brachen ein.

#### **VIERTE PROGRAMMSTUFE (AB 1998)**

In der dritten und auch noch zu Beginn der vierten Programmstufe wurde die staatliche Förderung von Bioethanol konsequent zurückgefahren. Die radikalen Änderungen resultierten 1999 in der vollständigen Deregulierung des Sektors. Hierfür war 1991 bereits die Privatisierung

der Exporte von Fahrzeugen und Zucker durch die Aufhebung staatlicher Beschränkungen vorgenommen worden (KALTNER et al. 2005: 16). Die Aufhebung von Verwendungsquoten und die freie Preisbildung für Zucker und Bioethanol waren die nächsten Schritte. Damit konnte der brasilianische Bioethanolmarkt in der Folge wie beabsichtigt dynamisch auf die Veränderungen in den Weltmärkten für Zucker und Erdöl reagieren.

2001 nahmen die Verkäufe von reinen Bioethanolfahrzeugen aufgrund einer größeren Preisdifferenz zwischen Bioethanol und Benzin infolge steigender Ölpreise wieder zu. Deutlich erhöht hat sich der Marktanteil von Bioethanol jedoch vor allem mit der Einführung von Flexible-Fuel Fahrzeugen seit April 2003. Flexible-Fuel Fahrzeuge dominierten die Verkäufe von Neuwagen innerhalb weniger Jahre, wie Abbildung 5.13 zeigt. Im Jahr 2005 waren bereits über die Hälfte der verkauften Neuwagen mit Flexible-Fuel Motoren ausgestattet, seit 2007 nehmen Flexible-Fuel Fahrzeuge gegenüber anderen Motorentypen mit einem Anteil von knapp 90% sogar eine Markt beherrschende Stellung ein (ÚNICA 2008c).

### **5.3.3 Erfolgsfaktoren des Programms Proálcool**

Der Erfolg der brasilianischen Förderung von Bioethanol durch das Programm Proálcool lässt sich leicht an der Verbreitung und Wirtschaftlichkeit von Bioethanol in Brasilien zeigen. Die Bioethanolindustrie hat sich in einer solch atemberaubenden Geschwindigkeit entwickelt, dass kaum 15 Jahre nach Einführung des Programms Proálcool rund 96% aller in Brasilien verkauften Neuwagen reine Bioethanolfahrzeuge waren. Während zu Beginn umfangreiche Subventionen für die Herstellung von Bioethanol sowie den Anbau von Zuckerrohr gewährt wurden, ist Bioethanol heute ohne staatliche Hilfe wettbewerbsfähig.

Der Erfolg ist dabei hauptsächlich auf die eigenständige Entwicklung neuer Technologien und deren Transfer und Anpassung an lokale Gegebenheiten zurückzuführen. Treiber für den technologischen Fortschritt war im Fall von Brasilien besonders die erhöhte Produktions- und Einsatzmenge von Bioethanol. Die aus der Lebensmittelindustrie bekannten Produktionsprozesse mussten den Anforderungen des wesentlich größeren Marktes für Kraftstoffe ebenso genügen wie die landwirtschaftliche Produktion der Rohstoffe. Die drastisch gestiegene Nachfrage nach Bioethanol machte höhere Flächenerträge und eine Ausweitung der Ackerflächen nötig. Im Wesentlichen wurden die höheren Flächenerträge durch die Erfolge der Biotechnologie ermöglicht. Während in den 1970er Jahren lediglich zehn verschiedene Zuckerrohrsorten bekannt waren, beläuft sich diese Zahl heute auf über 550 Sorten. Abhängig von den regionalen Bedingungen werden unterschiedliche und durch biotechnologische Optimierung ertragreichere Zuckerrohrsorten eingesetzt. Auf diese Weise konnten die Herstellkosten so weit gesenkt werden, dass die Bioethanolproduktion nun ohne Weiteres mit der Produktion von mineralischem Benzin konkurrieren kann.

Die Entwicklung des Bioethanolmarktes in Brasilien zeigt aber auch deutlich die Bedeutung der Planungssicherheit für den Erfolg des Biokraftstoffs. Eine größere Verbreitung und Marktdurchsetzung ist nur dann möglich, wenn die Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe auch für die Zukunft möglichst belastbar sind. Dies ist im Zusammenhang mit den Antriebstechnologien bei Fahrzeugen zu sehen. Während heute die Entscheidung des potentiellen Adopters zur Übernahme der neuen Technologie bei jedem Tanken aufs Neue erfolgen kann, haben sich die Adopter in den Zeiten vor Marktreife der Flexible-Fuel Motoren mit dem Kauf eines Fahrzeugs an den jeweiligen Kraftstoff gebunden.

Der Erfolg der Flexible-Fuel Fahrzeuge hängt mit den geringen Bioethanolpreisen zusammen und umgekehrt senken Flexible-Fuel Fahrzeuge die Hürden zu Übernahme der neuen Technologie und sichern damit den Erfolg von Bioethanol. Gleichzeitig ist Brasilien das einzige Land, welches einen Großteil des Kraftstoffbedarfs mit Biokraftstoffen der ersten Generation decken kann. Die Möglichkeiten zur Ausweitung von Ackerflächen, die vorhandene Technologie und die vergleichsweise billige Arbeitskraft machen eine Verdopplung der Produktion bis 2015 möglich. Derzeit befinden sich rund 80 Bioethanolanlagen in unterschiedlichen Stadien des Baus, die bereits kurzfristig eine erhebliche Kapazitätserweiterung der bislang in Betrieb befindlichen 335 Bioethanolanlagen bedeuten.

Gleichwohl ist dieses Erweiterungspotential in Brasilien und auch die weltweite Ausweitung der Produktionskapazitäten nicht unkritisch zu sehen. Besorgniserregend sind hier beispielsweise die Anbauart von Zuckerrohr in Monokulturen, aber auch der Wasserverbrauch, die möglichen Auswirkungen auf die Biodiversität oder die Arbeitsbedingungen in der Landwirtschaft. Entsprechendes gilt für die Produktion von Biodiesel, welche in den kommenden Jahren mit einem ähnlichen Programm gefördert werden soll. Zur Vertiefung dieser Diskussion empfiehlt sich SMEETS et al. (2008), die die nachhaltige Produktion von Bioethanol in Brasilien thematisieren. Auch in Europa wird über die Einführung von Nachhaltigkeitskriterien für heimische und importierte Biokraftstoffe diskutiert.

## 5.4 Zusammenfassung

Die Biokraftstoffindustrie ist ein junger Agrar- und Industriezweig, dessen Entwicklung sich größtenteils auf staatliche Programme zur Förderung von Biokraftstoffen stützt. Weltweit gibt es kein Beispiel, dass sich ein nationaler Markt für Biokraftstoffe ohne die Gewährung von Subventionen oder die Einführung von Verwendungsquoten entwickeln konnte. Die Wirkung langfristiger Förderprogramme kann dabei noch am ehesten in Brasilien oder den USA beobachtet werden, mit einigen Einschränkungen auch in Malawi. Diese Länder weisen die längste Biokraftstofftradition auf und konnten mehr Erfahrungen hinsichtlich einer effizienten Förderung von Biokraftstoffen sammeln, als das beispielsweise bislang in Europa möglich

war. Naheliegend sind daher die globale Zusammenarbeit und der zwischenstaatliche Austausch, wenn es um die zügige und zielgerichtete Herstellung der Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen geht.

Für die nachhaltige Verbreitung von Biokraftstoffen ist ihre langfristige Wettbewerbsfähigkeit gegenüber mineralischen Kraftstoffen entscheidend. Die Förderung von Biokraftstoffen der ersten Generation mittels Betriebsprämien, Verwendungsquoten oder Steuerbefreiungen kann den Anteil von Biokraftstoffen am Markt kurzfristig erhöhen. Auf diese Weise tragen Biokraftstoffe auch kurzfristig zur Einhaltung der gesetzten klimapolitischen Ziele oder der Ziele für erneuerbare Energien bei. Soll der Biokraftstoffanteil jedoch langfristig und nachhaltig erhöht werden, dann gelingt dies nur über die Senkung der Herstellkosten von Biokraftstoffen. Daher kommt der Förderung von Forschung und Entwicklung bei Biokraftstoffen der zweiten Generation eine besondere Rolle zu.

In Brasilien hat die Förderung von Bioethanol maßgeblich dazu beigetragen, dass die Produktion heute konkurrenzfähig gegenüber der Erzeugung mineralischer Kraftstoffe ist. Ob Brasilien jedoch als Beispiel für Europa fungieren kann, muss bezweifelt werden. Die Anbaubedingungen für Energiepflanzen in Brasilien gelten als nahezu optimal. Insbesondere gestattet es die Verfügbarkeit von Ackerflächen, dass in Brasilien rund die Hälfte des Kraftstoffverbrauchs durch Bioethanol gedeckt wird. In Deutschland und Europa ist ein solcher Anteil mit Biokraftstoffen der ersten Generation schlicht unmöglich. Die verfügbaren Ackerflächen sind ausreichend, um die vergleichsweise geringen Biokraftstoffziele in der Europäischen Union durch heimische Produktion zu erreichen. Ein größerer Teil des Kraftstoffbedarfs wird auf diese Weise aber nicht gedeckt werden können, ohne gleichzeitig die Lebensmittelproduktion einzuschränken. Hierin zeigt sich deutlich der Zielkonflikt hinsichtlich der Versorgungssicherheit: eine Erhöhung der Versorgungssicherheit mit Energie durch heimische Produktion bedeutet fast automatisch eine zunehmende Abhängigkeit von Lebensmittelimporten. Dieser Zielkonflikt wird erst durch Biokraftstoffe der zweiten Generation aufgelöst. Erfolge bei Forschung und Entwicklung tragen dazu bei, dass die heimische Produktion von Biokraftstoffen in Deutschland und Europa auch langfristig eine Zukunft hat.

Bei genauer Betrachtung ergeben sich weitere Zielkonflikte. Biokraftstoffe sollen einen Beitrag zur Erreichung von Zielen wie Klimaschutz, Versorgungssicherheit oder auch der Schaffung von Arbeitsplätzen in der Landwirtschaft leisten. An dieser Stelle ist besonders der Zielkonflikt zwischen der Erreichung der Klimaziele und der Schaffung von Arbeitsplätzen hervorzuheben. Die Steuerbefreiung für Biokraftstoffe muss nach WTO Richtlinien auch für importierte Biokraftstoffe gelten. Arbeitsplätze in Deutschland werden hierdurch wohl kaum geschaffen, obschon sich die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen verringern werden. Es wurde gezeigt, dass in Brasilien produziertes Bioethanol deutlich klimafreundlicher ist als das europäische Produkt, wengleich natürlich der Transportweg nach Europa berücksichtigt

werden muss. Das Ziel des Klimaschutzes konkurriert hier also mit dem Ziel der Schaffung von Arbeitsplätzen.

Ähnlich stellt sich die Situation bei näherer Betrachtung der Verwendungsquoten dar. Der Schritt hin zu einer Berücksichtigung der Klimawirkung in den Verwendungsquoten für Biokraftstoffe ist wichtig und richtig. Es steht jedoch zu befürchten, dass die Konkurrenzfähigkeit in der Europäischen Union produzierter Biokraftstoffe hierdurch weiter abnimmt und der europäische Markt mit importierten Biokraftstoffen überschwemmt wird.

All diese Zielkonflikte lassen sich nicht leicht entscheiden. Bei der Ausgestaltung der jeweiligen Instrumente müssen sie jedoch berücksichtigt werden. Insbesondere Biokraftstoffe der zweiten Generation haben das Potential, diese Konflikte aufzulösen und zu einer gleichzeitigen Erfüllung aller genannten Ziele beizutragen.

## 6 DER MARKT FÜR BIODIESEL IN DEUTSCHLAND

Der Markt für Biokraftstoffe in Deutschland ist der größte innerhalb der Europäischen Union. Allein über 60% des Biodiesels werden in Deutschland abgesetzt. Insgesamt betrug der Biokraftstoffabsatz in der EU im Jahr 2007 rund 67 Mio. hl. Im Vergleich zum brasilianischen Biokraftstoffmarkt ist der europäische Biokraftstoffabsatz damit eher gering. Gleichwohl entwickelt sich der Markt dynamisch weiter. Tabelle 6.1 zeigt die Biodieselproduktion in der Europäischen Union. Das Wachstum des europäischen Biodieselmärktes ist beachtlich. Mit durchschnittlich ca. 46% Wachstum zwischen 2006 und 2007 präsentiert sich der europäische Biodieselmärkte als erfolversprechender Wachstumsmärkte. Auch kleinere Biodieselproduzenten können ein eindrucksvolles Wachstum der Biodieselproduktion aufweisen. Innerhalb der Europäischen Union ist insbesondere die Entwicklung in der Tschechischen Republik herausragend. Im Jahr 2006 war die Tschechische Republik der Mitgliedsstaat mit dem geringsten Biodieselabsatz in der Europäischen Union, sieht man von einmal von Ungarn und Finnland ab, die beide keine Absatzmengen verzeichnen konnten. Im Jahr 2007 nahm die Tschechische Republik dann bereits den 14. Rang beim Biodieselabsatz ein. Gleichwohl ging der Biodieselabsatz in einigen Mitgliedsstaaten auch zurück und in Dänemark und Malta kam es sogar zur Einstellung des Biodieselangebots.

**Tabelle 6.1** Biodieselabsatz in der EU

	2006 (in hl)	2007 (in hl)	Wachstum (in %)
Deutschland	28.611.634	35.398.380	24%
Frankreich	6.660.220	13.122.430	97%
Österreich	3.767.748	4.148.682	10%
Großbritannien	1.489.566	3.058.458	105%
Spanien	508.285	2.944.554	479%
Rest EU	4.930.167	8.555.072	74%
Gesamt EU	46.035.115	67.227.576	46%

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung nach UFOP (2008a: 28)

Ziel dieses Kapitels ist es nun zum ersten, die Entwicklung des deutschen Biodieselmärktes zu illustrieren. Im Fokus stehen dabei neben den Verbraucherpreisen auch die Entwicklung der Absatzkapazitäten in Form des Ausbaus des Tankstellennetzes sowie dem Zubau von Produktionskapazitäten. Zum zweiten wird analysiert, welchen Einfluss die im vorherigen Abschnitt dargestellte steuerliche Behandlung von Biodiesel auf dessen Verbreitung hatte. Hieraus ergeben sich direkt Schlussfolgerungen für die künftige Förderung von Biokraftstoffen. Es ist nahe liegend, dass der Fokus der Ausführungen dabei auf dem Reinkraftstoff Biodiesel liegt.

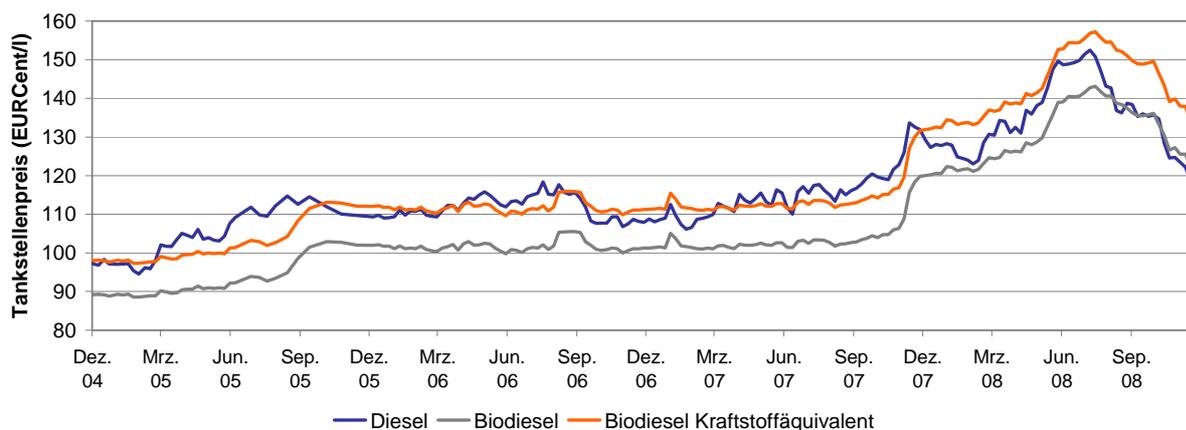
## 6.1 Marktvolumen und Marktentwicklung

Um den Markterfolg eines neuen Produktes und die Geschwindigkeit seiner Diffusion abschätzen zu können, werden oftmals sog. SWOT Analysen durchgeführt. Dabei steht der Begriff für eine Analyse der Stärken (Strengths), Schwächen (Weaknesses), Möglichkeiten (Opportunities) und Risiken (Threats). Die SWOT Analyse von Biokraftstoffen zeigt dabei ein auffallendes Resultat. Während die Gesellschaft einigermmaßen gleichmäßig von den Stärken und Möglichkeiten von Biokraftstoffen profitieren, lastet insbesondere das Risiko ausschließlich auf den Produzenten. Eine solche Verteilung der Profileigenschaften ist typisch für das Vorliegen von Externalitäten. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Diffusion von Biokraftstoffen, zumindest in den frühen Marktphasen, an die staatliche Förderung gekoppelt ist. Im Folgenden wird nun die Marktentwicklung von Biokraftstoffen dargestellt.

### DIE ENTWICKLUNG DER TANKSTELLENPREISE

Die Herstellkosten von Biodiesel bilden eine Preisuntergrenze, unter jener die Produzenten den Biokraftstoff nicht am Markt anbieten werden. Über die steuerliche Behandlung von Biokraftstoffen einerseits und mineralischen Kraftstoffen andererseits kann somit die Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen gesteuert werden. Die Preisentwicklung der vergangenen Jahre legt jedoch nahe, dass das Marktangebot von Biodiesel nicht zu eben jenem Preis erfolgt, der einen Markteintritt ermöglicht. Vielmehr hat sich der Biodieselpreis in der Vergangenheit stark am Preis für mineralischen Dieselpreis orientiert. Abbildung 6.1 zeigt die Entwicklung der Tankstellenpreise im Überblick.

Abbildung 6.1 Tankstellenpreise für Diesel und Biodiesel

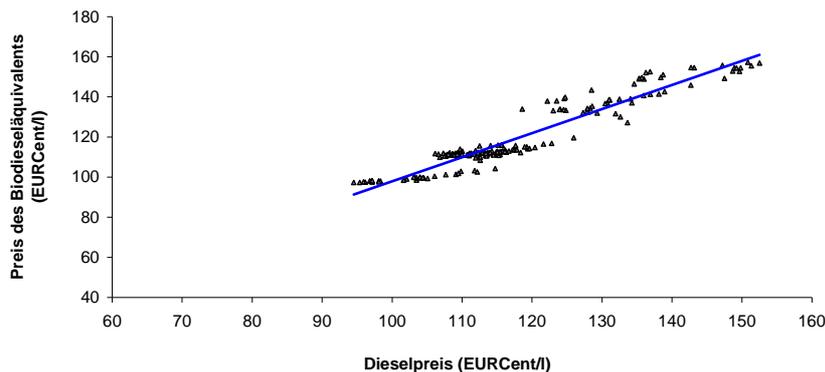


Quelle: Eigene Darstellung nach ZMP (2009)

Die Bewegungen der Tankstellenpreise für Diesel und Biodiesel weisen eine hohe Übereinstimmung auf. Bis Mitte 2008 entspricht darüber hinaus auch die Höhe des Kraftstoffäquiva-

lents ungefähr dem Biodieselpreis. Dies legt eine hohe Korrelation zwischen den Tankstellenpreisen für Diesel und Biodiesel bzw. das Kraftstoffäquivalent nahe. Tatsächlich ergibt eine Regressionsanalyse einen Korrelationskoeffizienten von ca. 0,96 und ein Gütemaß von 0,91. Abbildung 6.2 veranschaulicht die Regressionsanalyse zwischen dem Tankstellenpreis für Diesel und dem Preis des Biodieseläquivalents.

**Abbildung 6.2** Dieselpreis und Preis des Biodieseläquivalents



Quelle: Eigene Analyse

Die Schlussfolgerung hieraus ist naheliegend. Wie bereits angedeutet, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Biodieselpreise in der Vergangenheit weniger an den Grenzkosten der Herstellung, sondern vielmehr am Preis des Konkurrenzproduktes orientiert haben. Die Erhöhung des Steuersatzes für Biodiesel zeigt im Betrachtungszeitraum keine signifikanten Veränderungen des Tankstellenpreises für Biodiesel. Dies müsste jedoch bei Veranschlagung der Grenzkosten der Produktion der Fall sein, da die Energiesteuer als wesentlicher Bestandteil der Grenzkosten betrachtet werden muss. Dieses Preissetzungsverhalten wäre jedoch insofern erklärbar und unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten zu rechtfertigen, als der erlöste Marktpreis nicht nur die variablen Kosten, sondern auf lange Frist auch die Vollkosten einer Biodieselanlage decken müssen. Im Betrachtungszeitraum wurden massiv Kapazitäten der Biodieselproduktion aufgebaut. Ein solcher Zubau ist nur dann möglich, wenn die jeweiligen Marktpreise entsprechende Investitionen ermöglichen, entscheidend für die Preissetzung im Markt ist dabei mineralischer Diesel. Detailliert wird nun auf die Kapazitätserweiterungen der vergangenen Jahre eingegangen.

## AUSSCHÖPFUNG UND AUFBAU VON PRODUKTIONSKAPAZITÄTEN

Der Aufbau von Kapazitäten zur Produktion von Biodiesel schließt einerseits den Bau von Produktionsanlagen, andererseits aber auch die Ausweitung der Anbauflächen für den Rohstoff Raps ein. Der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen wird in der Europäischen Union implizit über die Quote für die Stilllegungsflächen gesteuert. Die Flächenstilllegung in der EU

wurde bereits in Kapitel 5 thematisiert und wird daher in ihrer Wirkungsweise auf den Anbau nachwachsender Rohstoffe an dieser Stelle nicht weiter untersucht. Vielmehr soll unabhängig vom Auslöser die Entwicklung des Rapsanbaus dargestellt werden.

Der Anbau von Raps auf Stilllegungsflächen ist seit dem Jahr 2000 etwa gleich geblieben. Einzig im Jahr 2004 ging der Rapsanbau infolge der europäischen Stilllegungspolitik deutlich zurück. Gleichzeitig jedoch hat die Gesamtproduktion bis 2007 stark zugenommen. Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Rapsernten. Innerhalb der Europäischen Union entfällt auf Deutschland demnach rund ein Viertel der gesamten Produktionsfläche. Durch die vergleichsweise hohe Produktivität umfasst die aktuelle Ernte von 5,3 Mio. t Raps ca. 30% der gesamten Rapsernte in der Europäischen Union.

**Tabelle 6.2** Anbauflächen und Rapsernten in EU-27 und Deutschland

<b>Anbaufläche (in 1.000) ha</b>	<b>2000*</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
EU-27	4.100	4.165	4.246	4.177	4.524	4.868	5.412	6.456
Deutschland	1.078	1.138	1.297	1.266	1.283	1.344	1.426	1.548
Anteil Deutschland	26,29%	27,32%	30,54%	30,30%	28,37%	27,61%	26,34%	23,98%
<b>Ernten (in 1.000 t)</b>								
EU-27	11.269	11.596	11.743	11.080	15.358	15.456	15.933	18.103
Deutschland	3.586	4.160	3.849	3.634	5.277	5.052	5.337	5.321
Anteil Deutschland	31,82%	35,88%	32,77%	32,80%	34,36%	32,68%	33,49%	29,39%

\*ohne Bulgarien und Rumänien

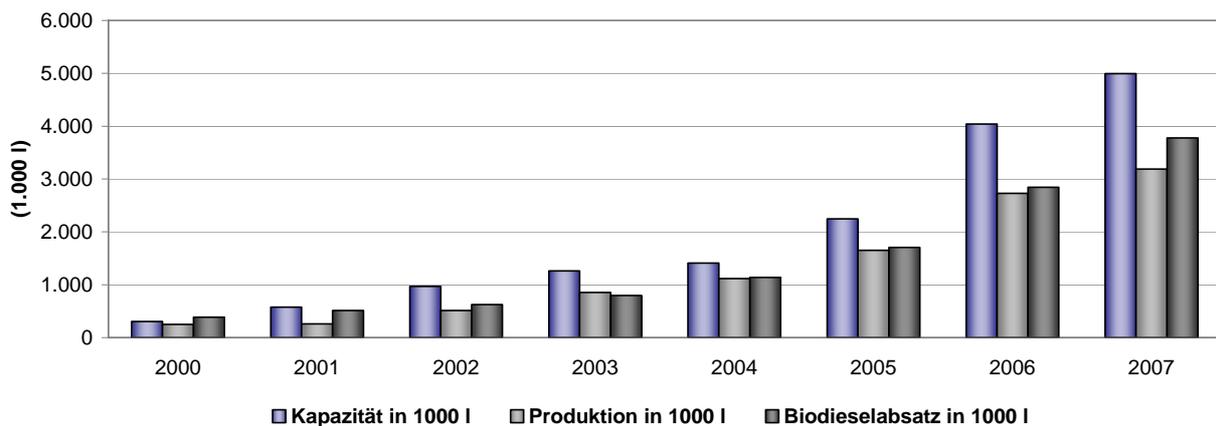
Quelle: UFOP (2006, 2007a, 2008a)

Vor der Zunahme der Anbauflächen muss jedoch der Zubau von Biodieselanlagen erfolgen. Die Frage der Anreizstruktur kann hier recht einfach beantwortet werden. Eine Ausweitung der Anbauflächen kann nur dann eine betriebswirtschaftlich sinnvolle Strategie sein, wenn auf Seiten der Biodieselproduzenten in ausreichender Höhe Produktionskapazitäten bestehen. Umgekehrt ist der Zusammenhang weit weniger stark. Während der Import von Rapsöl zur Produktion von Biodiesel in der Branche durchaus gängig ist, sind die Absatzmärkte im Ausland für deutsche Produzenten kaum eine Alternative. Der ohnehin bestehende Wettbewerbsnachteil aufgrund der hohen Anbaukosten wird durch den längeren Transport noch verschärft. In diesem Wachstumsmarkt müssen die Produktionskapazitäten daher im Vergleich zur Entwicklung der Rohstoffherzeugung schneller anwachsen. Die hieraus resultierenden Produktionskapazitäten werden in Abbildung 6.3 dargestellt. Seit 2000 entwickelten sie sich fast exponentiell.

Abbildung 6.3 zeigt jedoch auch, dass der Biodieselabsatz mit zunehmender Tendenz durch Importe des Biokraftstoffs gedeckt wird. Eine Ausnahme bildet dabei lediglich das Jahr 2003,

in dem die Nettoexporte von Biodiesel sich auf ca. 57.000 l beliefen. Die steigenden Importmengen sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass die Produktion von Rapsöl noch unter den Bedarfsmengen liegt. In erster Linie wird diese Entwicklung jedoch von den im internationalen Vergleich hohen Herstellkosten für Biodiesel bestimmt. Am stärksten zeigt sich dies zwischen 2006 und 2007. Die Rohstoffpreise befanden sich im Jahr 2006 bereits auf einem vergleichsweise hohen Niveau und stiegen bis 2007 weiter an.

**Abbildung 6.3** Entwicklung der Produktionskapazitäten für Biodiesel in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung nach FNR (2009d)

Um die Wettbewerbsfähigkeit von heimischem Biodiesel sicherzustellen, werden derzeit auf politischer Ebene verschiedene Ansätze diskutiert. Unter anderem wurden von Umweltverbänden ökologische und soziale Qualitätsanforderungen für Biodiesel in die Diskussion eingebracht. In der Konsequenz dürften diese zu einem verringerten ausländischen Angebot sowie zu einem Ausgleich der Wettbewerbsfähigkeit heimisch produzierter Biokraftstoffe führen. Im Gesetzentwurf zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen sind diese Aspekte teilweise berücksichtigt worden. Unter anderem sieht der Entwurf Korrekturen im Bundes-Immissionsschutzgesetz, im Biokraftstoffquotengesetz und im Energiesteuergesetz vor. Insbesondere stellt er Anforderungen an die Klimawirksamkeit von Biokraftstoffen. Ab 2015 soll sich die Biokraftstoffquote nicht mehr auf einen Volumenanteil sondern vielmehr auf das Potential zur Vermeidung von Treibhausgasen beziehen. Biokraftstoffe müssen demzufolge in einem Umfang eingesetzt werden, so dass die Treibhausgaseinsparung im Vergleich zum Einsatz von mineralischem Kraftstoff 3% beträgt. Inwiefern diese Anforderung jedoch tatsächlich zu einer Stärkung der heimischen Biokraftstoffindustrie führt, ist noch unklar. Dies wird von der genauen Berechnung der Klimawirkung von Biokraftstoffen abhängen. Während heimische Biokraftstoffe von den kurzen Transportwegen profitieren, ist beispielsweise das Vermeidungspotential brasilianischen Bioethanols weitaus höher. Eine Kernfrage der Berechnung

wird die Behandlung der Art der Ackerflächen sein: Der Anbau auf ehemaligen Regenwaldflächen ist sicherlich anders zu behandeln als die Nutzung von Stilllegungsflächen.

#### **WEITERVERTEILUNG AN TANKSTELLEN**

Durch den in der jüngeren Vergangenheit erfolgten Zubau von Produktionskapazitäten kann derzeit sowohl die Quotenverpflichtung für Biodiesel als auch die Nachfrage nach Biodiesel als Reinkraftstoff durch heimische Produktion gedeckt werden. Die Produktionskapazitäten stellen insofern einen kritischen Faktor für beide Nutzungsarten von Biodiesel dar. Anders die Weiterverteilung des Biokraftstoffs an den Tankstellen. Während Biodiesel als Beimischung zu mineralischem Diesel über das bestehende Tankstellennetz verteilt wird, ist Biodiesel als Reinkraftstoff längst nicht überall erhältlich.

Diese logistische Möglichkeit der Verteilung des Biokraftstoffs muss ebenso wie die Entwicklung der Produktionskapazitäten als fundamentale Rahmenbedingung der Diffusion von Biokraftstoffen angesehen werden. Dabei bestimmt umgekehrt wiederum der Biodieselabsatz über die Attraktivität der Erweiterung des Tankstellenangebots um den Biokraftstoff.

So stieg zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2006 nicht nur der Biodieselabsatz an den Tankstellen, darüber hinaus hat sich die Zahl der Biodiesel-Tankstellen in diesem Zeitraum auch mehr als verdoppelt. Von ca. 950 Biodiesel-Tankstellen Ende 2000 stieg die Zahl der Tankstellen bis Ende 2008 nach Schätzungen auf etwa 1.900 (AGQM 2009a). Damit konnte an etwa jeder achten Tankstelle der insgesamt knapp 15.000 Tankstellen in Deutschland Biodiesel getankt werden (ADAC 2009). Der Großteil dieser Tankstellen gehört dabei der Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V. (AGQM) an, die es sich zur Aufgabe gemacht hat, durch die strengen Anforderungen eines einheitlichen kontrollierten Qualitätsmanagementsystems eine hohe und dauerhaft gleich bleibende Qualität von Biokraftstoffen zu sichern. Das Qualitätsmanagement umfasst dabei sowohl die Rohstoffauswahl und die Produktionsprozesse, als auch den Transport und die Lagerung an Tankstellen (AGQM 2009b).

Inwiefern sich diese Entwicklung fortsetzen kann ist derzeit mehr als fraglich. Für die Diffusion von Biodiesel ist eine Ausweitung des Tankstellennetzes unerlässlich, wengleich diese durch die jüngsten Absatzzahlen zumindest kurzfristig unwahrscheinlich erscheint. Seit November 2008 ist der Biodieselabsatz deutlich eingebrochen. Im Vergleich zum Oktober 2008 hat sich die Verkaufsmenge an deutschen Tankstellen etwa halbiert. Grund hierfür dürften vor allem die deutlich gesunkenen Tankstellenpreise für mineralischen Dieselkraftstoff sein. Sollte sich diese Situation länger anhalten, dann ist in der Konsequenz auch mit einem deutlichen Rückgang der Biodiesel-Tankstellen zu rechnen.

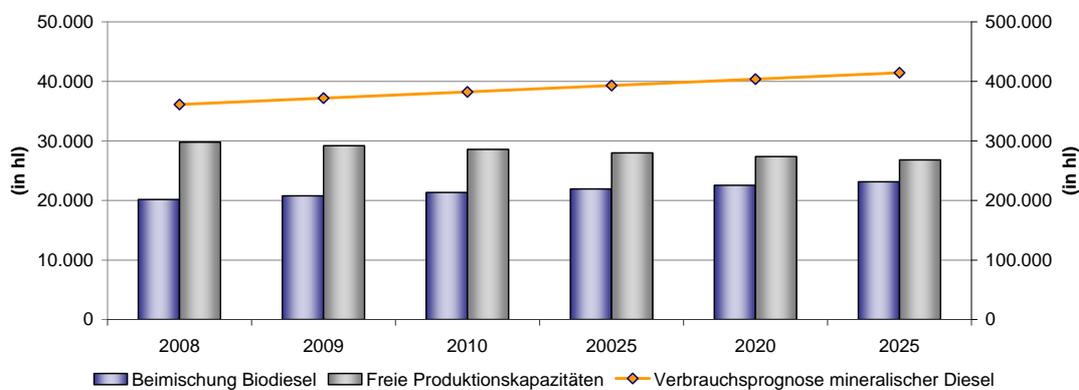
Diese mögliche Entwicklung sollte den Blick wiederum für den Absatz von Biodiesel als Reinkraftstoff schärfen. Eine sinnvolle Förderung von Biokraftstoffen muss zwangsläufig den

Multiplikatoreffekt des Tankstellennetzes beachten und gegebenenfalls nicht nur Eigenverbrauchstankstellen in das Maßnahmenbündel der Biokraftstoffförderung aufnehmen.

## AUSBLICK

Die Produktionskapazitäten in Deutschland sind ausreichend, um den wachsenden Biodieselbedarf zu decken, der bei steigendem Dieselaabsatz aus der energetischen Verwendungsquote von 4,4% bis 2025 resultiert. Bei konstanten Produktionskapazitäten stehen damit gleichzeitig jedoch auch weniger Kapazitäten für die Herstellung von Biodiesel als Reinkraftstoff zur Verfügung. Abbildung 6.4 zeigt die Entwicklung der freien Produktionskapazitäten abhängig von der erforderlichen Biodieselbeimischung bis 2025.

**Abbildung 6.4** Biodiesel Produktionskapazitäten in Abhängigkeit vom Mineralölabsatz



Quelle: MWV (2009a), FNR (2009d), PIRA (2009)

Im Jahr 2007 betrug der Absatz von Biodiesel als Reinkraftstoff ca. 22.000 hl, im Jahr 2008 sank dieser auf ca. 19.000. Mit den im Jahr 2025 freien Produktionskapazitäten könnte die Bereitstellung dieser Menge des Reinkraftstoffs auch ohne Importe von Biodiesel gewährleistet werden. Eine deutliche Zunahme des Biodieselverbrauchs würde in diesem Fall jedoch nicht mehr durch heimische Produktion gedeckt werden. Während durch die Einführung von Verbrauchsquoten bei dem als leicht steigend angenommenen Kraftstoffbedarf auch die Diffusion von Biokraftstoffen zunimmt, beschränkt sie doch gleichzeitig die Diffusion des Reinkraftstoffs. Aus politischer Sicht müssen daher heute schon die Weichen gestellt werden, soll auch die Absatzmenge von Biodiesel als Reinkraftstoff künftig noch wachsen. Gleichwohl soll an dieser Stelle nicht der Eindruck vermittelt werden, dass diese Untersuchung eine solche Biokraftstoffstrategie nahe legt. Vielmehr soll damit die Bedeutung der Angebotsseite des Marktes herausgestellt werden, die bei einer Förderung von Biokraftstoffen ebenso beachtet werden muss wie die Nachfrageseite. Die Diskussion der optimalen Biokraftstoffförderung beschränkt sich oftmals auf vornehmlich nachfrageseitig wirkenden Faktoren wie z.B. Verwendungsquoten und vernachlässigt die Anreize zur Produktion von Biodiesel.

## 6.2 Der Preis als Bestimmungsfaktor der Biodieselnachfrage

Der Fahrzeugbestand in Brasilien im Benzinsegment des Marktes besteht in erster Linie aus den sog. Flexible-Fuel Fahrzeugen. Fast vernachlässigbar ist hier der Bestand an reinen Benzin- und reinen Ethanolfahrzeugen. Durch das ihnen zu Grunde liegende Motorenkonzept ermöglichen Flexible-Fuel Fahrzeuge eine fast unmittelbare Reaktion auf die Veränderung der Tankstellenpreise<sup>28</sup>. Studien zeigen, dass die Tankentscheidung in Brasilien abhängig von der Preisdifferenz zwischen Bioethanol und dem mineralischen Benzin getroffen wird. Entsprechend ist der Verbraucherpreis der entscheidende Bestimmungsfaktor für die Verbreitung von Biokraftstoffen in Brasilien.

Ob dies für den deutschen Biokraftstoffmarkt ebenfalls und im gleichen Umfang zutrifft, muss nach den Überlegungen der vorangehenden Kapitel bezweifelt werden. Die Entscheidung zur Übernahme dieser neuen und erneuerbaren Technologie kann ein potentieller Adopter in Deutschland nicht ad hoc treffen. Die hier gängigen Dieselmotoren müssen für den Gebrauch von Biodiesel zunächst umgerüstet werden. Die mangelnde Kompatibilität mit den vorhandenen Motorenkonzepten setzt in Deutschland und Europa den Preis als Bestimmungsfaktor der Diffusion also für weite Teile potentieller Adopter außer Kraft. Die Untersuchung, wie sich der Preis auf die Verbreitung von Biokraftstoffen auswirkt, kann also nur im Hinblick auf einen beschränkten Adopterkreis durchgeführt werden. Das sind jene Fahrzeughalter, welche die notwendige Umrüstung bereits vorgenommen haben. Die im Folgenden ermittelten Ergebnisse werden jedoch dadurch eingeschränkt, dass die Motoren auch nach der Umrüstung nur mit bestimmten Mischungsverhältnissen von Diesel und Biodiesel betrieben werden können.

Gleichwohl wird die hier vorgenommene Untersuchung einen ersten Eindruck davon vermitteln, ob der Preis des Biokraftstoffs tatsächlich der entscheidende Diffusionsfaktor ist, ist die Hürde der Umrüstung erst einmal genommen. Die Ergebnisse der Untersuchung dürfen daher als Hinweis darauf aufgefasst werden, wie gravierend sich andere Diffusionsfaktoren, wie beispielsweise Informationsmängel, auf die Verbreitung von Biokraftstoffen auswirken.

Sinnvollerweise beschränkt sich die Untersuchung auf Biodiesel als Reinkraftstoff. Die Entwicklung des Tankstellenpreises für Biodiesel ist von untergeordneter Bedeutung<sup>29</sup> für die Absatzmengen des Biodieselanteils, welcher dem mineralischen Diesel beigemischt wird.

---

<sup>28</sup> Noch schränken einzig die jeweiligen Kraftstoffrestmengen im Fahrzeugtank diese Reaktionsmöglichkeit ein. Bei der nächsten Generation der Flexible-Fuel Fahrzeuge werden auch dies keine Einschränkung mehr sein.

<sup>29</sup> Diese Aussage verleugnet nicht den grundsätzlich vorhandenen Zusammenhang zwischen dem Tankstellenpreis für Biodiesel und den Biodieselmengen, die mineralischem Diesel beigemischt werden. Der Zusammenhang entsteht wegen der Substitutseigenschaft von Biodiesel gegenüber mineralischem Diesel. Annahmegemäß muss die Absatzmenge von mineralischem Diesel sinken, wenn die Absatzmenge von Biodiesel beispielsweise aufgrund des günstigeren Tankstellenpreises steigt. In der Folge sinkt auch die beigemischte Biodieselmenge. Allerdings ist dieser Effekt hier eher vernachlässigbar.

### 6.2.1 Die Datenbasis der Untersuchung

Die Aussagekraft der folgenden Untersuchung ist stark an die Verfügbarkeit von Daten und den Umfang des Datenmaterials geknüpft. Daher muss bei empirischen Untersuchungen oftmals mit einer begrenzten Validität der Ergebnisse gerechnet werden. Zunächst gilt es daher abzuschätzen, ob die vorhandene Datenlage ausreichend ist, um hieraus begründete Schlussfolgerungen abzuleiten. Für diese Untersuchung sind Daten zu den Verbraucherpreisen von Biodiesel und mineralischem Diesel, also den Tankstellenpreisen der beiden Kraftstoffarten, erforderlich. Weiterhin werden Informationen zu den jeweiligen Absatzmengen benötigt. Beides liegt prinzipiell vor, wenngleich es einige Einschränkungen gibt, auf die nun eingegangen wird.

Grundsätzlich erfolgt die Angabe von Kraftstoffpreisen als deutschlandweiter Durchschnitt, obwohl die regionalen Unterschiede bekanntlich teils deutlich sind. Ohnehin werden aber auch die Kraftstoffabsatzmengen kontinuierlich lediglich deutschlandweit erhoben, wenngleich für kürzere Zeiträume Daten zur regionalen Verteilung existieren. Die Erhebung von Preisen und Mengen stimmt daher in ihrer regionalen Aggregation überein. In gewisser Weise wird dadurch natürlich der Zusammenhang zwischen Tankstellenpreis und Biodieselabsatzmenge verschleiert. Gleichzeitig lassen sich hierdurch aber auch strukturelle Probleme bei der Analyse umgehen. Kraftstoffe, gleich welche Art, dienen dazu, die Fortbewegung mittels Fahrzeugen zu ermöglichen. Dem Verbrauchsgut Kraftstoff ist daher eine natürliche regionale Mobilität inhärent. Werden die Grenzen der gewählten regionalen Gebiete bei Tankvorgängen überschritten, kommt es hierdurch ebenfalls zu verzerrten Ergebnissen. Durch die Aggregation auf eine deutschlandweite Betrachtung kann eine solche Verzerrung zumindest zum Teil verhindert werden. Nicht beachtet werden können nach wie vor Tankvorgänge im Ausland bei Reisen oder grenznahen Wohnorten. Ein solches Tankverhalten unterstreicht aber sicherlich die grundsätzliche Wahl der günstigsten Kraftstoffalternative. In jedem Fall jedoch wiegt die Vermeidung der überwiegenden Zahl der grenzüberschreitenden Verzerrungen größer als die durch die regionale Aggregation schrumpfende Bandbreite beobachteter Tankstellenpreise.

Die Tankstellenpreise für mineralischen Diesel werden vom Mineralölwirtschaftsverband (MWV) auf dessen Internetseiten veröffentlicht (MWV 2009b) und für die folgende Untersuchung zu Grunde gelegt. Es handelt sich dabei um die durchschnittlichen monatlichen Tankstellenpreise in Deutschland. Die Tankstellenpreise für Biodiesel werden von der Zentralen Markt- und Preisberichtsstelle (ZMP) bei den Tankstellen erfragt und erfasst (ZMP 2009). Andere Quellen für die Biodiesel Tankstellenpreise sind die Union zu Förderung von Öl- und Proteinpflanzen (UFOP 2007b, 2008b, 2009) sowie die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR 2009e). Beide greifen jedoch ebenfalls auf die Daten der ZMP zurück.

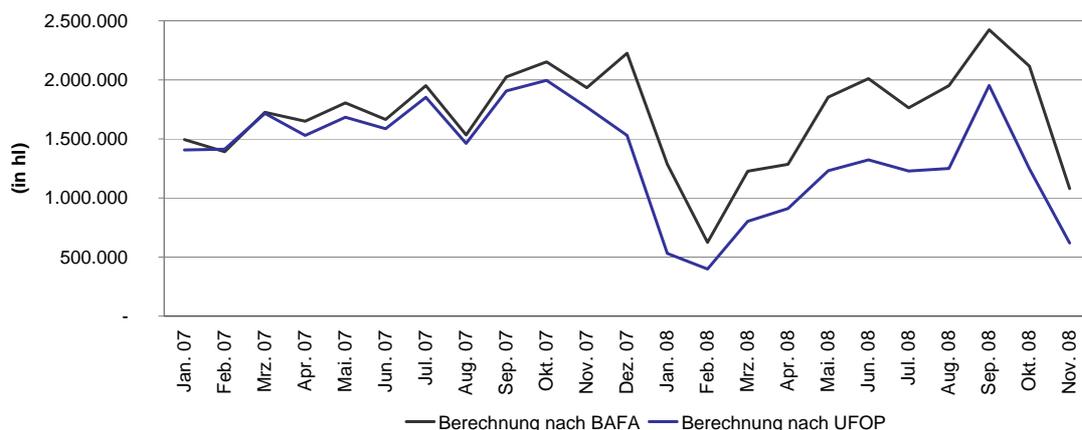
Die Ermittlung der Absatzmengen von Biodiesel als Reinkraftstoff im Rahmen dieser Untersuchung hat sich gegenüber der Ermittlung der Absatzpreise als deutlich schwieriger heraus-

gestellt. Zum ersten liegen verlässliche Angaben zu den abgesetzten Biodieselmengen erst seit Januar 2007 vor. Mit der Aufhebung der Steuerbefreiung für Biodiesel und Bioethanol im August 2006 wurden die verkauften Mengen meldepflichtig. Systematisch werden die Absatzmengen aber erst seit Januar 2007 in der Energiesteuerstatistik des Statistischen Bundesamtes erfasst (STATISTISCHES BUNDESAMT 2007, 2008).

Zum zweiten liegen die in der Energiesteuerstatistik ausgewiesenen Absatzzahlen nur als monatliche Werte vor. Wegen des recht kurzen Zeitraums, für welchen die Biodiesel Absatzzahlen bislang existieren, liegen für diese Untersuchung lediglich 24 Datenpunkte für die Jahre 2007 und 2008 vor. In der Konsequenz können die Ergebnisse dieser Untersuchung nur mit großer Vorsicht interpretiert werden. Bei den vorliegenden Tankstellenpreisen wird jeweils ein Monatsdurchschnitt ermittelt, so dass die Datenbasis hier übereinstimmt.

Zum dritten wird die Untersuchung dadurch erschwert, dass die in der Energiesteuerstatistik ausgewiesenen Versteuerungs- und Rückerstattungsmengen von Biodiesel nicht zwangsläufig mit den Absatzmengen an den Tankstellen korrespondieren müssen. Während das BAfA die Versteuerungsmengen in Tabelle 9 der monatlichen amtlichen Mineralölstatistik als monatlichen Absatz deklariert, weist die UFOP den Tankstellenabsatz in Höhe der monatlichen Rückerstattungsmengen aus. Tatsächlich lässt sich auf beide Weisen der Tankstellenabsatz aber nur näherungsweise angeben. Grundsätzlich fällt die Meldepflicht für Biodiesel und mineralischen Diesel an, sobald diese das Steuerlager verlassen und in den freien Verkehr überführt werden. Naturgemäß liegt dieser Zeitpunkt vor dem eigentlichen Absatz an der Tankstelle. Abhängig vom Großhandelspreis für Biodiesel muss von unterschiedlichen Lagerungszeiten an Tankstellen und an Zwischenlagern ausgegangen werden. Daher kann es sowohl zu einer Über- als auch zu einer Unterschätzung der monatlichen Absatzmengen an Tankstellen kommen. Dieselbe Problematik gilt auch für den Absatz mineralischen Dieselmotorkraftstoffs. Zum Versteuerungszeitpunkt ist zunächst der volle Energiesteuersatz von 47,04 EURCent/l fällig. Ein Teil davon ist jedoch rückerstattungsfähig: in 2007 betrug dieser Rückerstattungswert noch 39,94 EURCent/l, zum Januar 2008 sank er auf 36,64 EURCent/l und zum Januar 2009 dann auf derzeit 27,34 EURCent/l (ENERGIESTG 2006: §50, Abs. 3). Die Rückerstattung kann nach § 50 Abs. 2 S. 3 Nr. 1a EnergieStG nach dem Verkauf an der Tankstelle beantragt werden. Nach dem Dafürhalten der UFOP liegen diese Mengen näher an den tatsächlichen Absatzmengen an deutschen Tankstellen, als die zunächst mit dem vollen Energiesteuersatz versteuerten Biodieselmengen. Die UFOP geht davon aus, dass die zeitliche Differenz zwischen dem Biodieselabsatz an den Tankstellen und der Beantragung der Rückerstattung geringer ist als die zeitliche Differenz zur Versteuerung. Im Ergebnis unterscheiden sich die monatlichen Angaben von BAFA und UFOP teils deutlich. Abbildung 6.5 stellt die monatlichen Absatzmengen abhängig von der jeweiligen Erhebungsmethode im Zeitverlauf dar. Die Unterschiede in den Erhebungsmethoden sollten sich am Ende des Jahres annähernd ausgleichen, wenn die dann verfügbaren monatlichen Korrekturmengen berechnet und eingebaut wurden.

**Abbildung 6.5** Biodiesellabsatzmengen nach Erhebungsmethode



Quelle: Eigene Berechnung nach STATISTISCHES BUNDESAMT (2007, 2008), UFOP (2007b, 2008b)

Für diese Untersuchung soll zunächst davon ausgegangen werden, dass die Überschneidungsmenge der vom BAfA und UFOP ausgewiesenen Absatzzahlen mit dem Absatz an den Tankstellen hinreichend groß ist. Der Untersuchung werden im Folgenden sowohl die BAfA, als auch die UFOP Angaben zu Grunde gelegt.

## 6.2.2 Die Bedeutung einer unelastischen Kraftstoffnachfrage für die Untersuchung

Unter den verschiedenen Mineralölprodukten sind es insbesondere die Kraftstoffe, die wegen ihrer sehr geringen Elastizität der Nachfrage vor allem seit der Ölkrise in den 1970er Jahren Gegenstand einer Vielzahl Untersuchungen sind. Bis heute gibt es im Kraftstoffsektor weniger wettbewerbsfähige Substitute als bei den meisten anderen Mineralölprodukten oder den jeweiligen Vorstufen. Das besondere Interesse der verschiedenen Kraftstoffstudien liegt daher in der Untersuchung und Bestimmung der Elastizität der Nachfrage. Die Auswirkung des Preisniveaus auf den Absatz von Kraftstoffen wurde insbesondere in den letzten Jahren erforscht, als umweltpolitische Fragestellungen wieder verstärkt ins Blickfeld der Politik und Gesellschaft rückten.

Zentral ist dabei die Frage, in wiefern die Erhebung oder Erhöhung von Steuern bei den ermittelten Nachfrageelastizitäten tatsächlich eine Lenkungswirkung entfalten kann. Eine solche Wirkung wird aufgrund der geringen Nachfrageelastizität als äußerst schwach eingeschätzt. Beispielsweise zeigen dies auch BRONS et al. (2008: 2108) für den US-amerikanischen Kraftstoffmarkt zwischen 1949 und 2003. Die Ergebnisse der Studien für die USA sind auf Europa und Deutschland ebenso übertragbar. Daher kommen beispielsweise GRAHAM/GLAISTER (2002) oder HANLEY et al. (2002) zu ähnlichen Ergebnissen. Die Bandbreite der Ergebnisse bezüglich der Preiselastizität schwankt zwischen -0,22 und -0,31. Entsprechend dieser Analyse fällt die Korrelation zwischen dem Dieselpreis an Tankstellen und den Absatzmengen sehr

schwach aus. Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführte Regressionsanalyse mit Werten der Jahre 2007 und 2008 kommt lediglich zu einem Korrelationskoeffizienten von 0,28 und einem Bestimmtheitsmaß von 0,08.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studien zur Preiselastizität im Kraftstoffmarkt sind jedoch nicht auf die Nachfrage nach Biokraftstoffen übertragbar. Während die Nachfrage bei Kraftstoffen aufgrund der herausragenden Bedeutung für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit naturgemäß eher unelastisch sein muss, kann die Nachfrage innerhalb der verschiedenen Kraftstoffarten durchaus schwanken. Aus der geringen Nachfrageelastizität lassen sich keine Rückschlüsse auf die Substitutionselastizität im Kraftstoffmarkt ziehen.

In Europa wird im Straßenverkehr heute eine Vielzahl fiskalischer Instrumente eingesetzt. Neben den Kraftstoffsteuern wie der Energiesteuer in Deutschland zählen hierzu auch Steuern und Abgaben zur Verbesserung der Infrastruktur, Versicherungsabgaben oder Zulassungsgebühren. Die politischen Aktivitäten der vergangenen Jahre und die derzeitigen Arbeiten der Europäischen Kommission weisen auf eine Änderung in der Struktur der fiskalischen Kosten des Straßenverkehrs hin (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2003a, d). Die Tendenz zeigt eine künftig stärkere Orientieren an nutzungsabhängiger Versteuerung etwa durch Kraftstoffsteuern, im Gegensatz beispielsweise zur Kraftfahrzeugsteuer (BRONS et al. 2008 2106). Während diese fiskalischen Instrumente keine Lenkungswirkung hinsichtlich der Steuerung der gesamten Kraftstoffmenge wegen der unelastischen Kraftstoffnachfrage entfalten können, ist eine Lenkungswirkung hinsichtlich der Steuerung der Zusammensetzung der Kraftstoffmengen möglich. Fiskalische Instrumente dienen dazu, die Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen zu stärken und deren Diffusion zu fördern. Die Instrumente müssen dabei nicht unbedingt direkt auf den Biodieselpreis wirken, auch die Anknüpfung an den Preis des mineralischen Diesels fördert die Diffusion von Biokraftstoffen.

### **6.2.3 Analyse des Preis-Mengen Zusammenhangs bei Biodiesel**

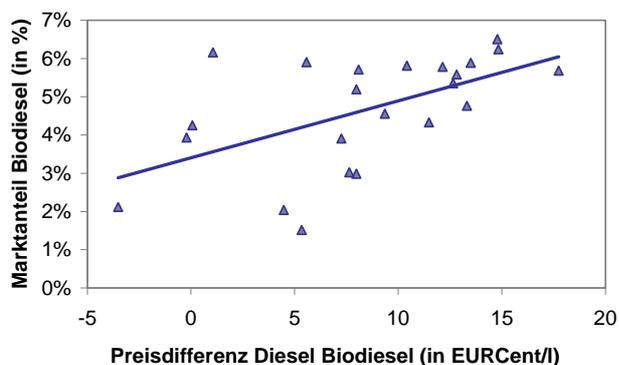
Im Folgenden soll nun untersucht werden, wie sich die Tankstellenpreise auf die Diffusion von Biodiesel in Form des Marktanteils auswirken. Die der Analyse zu Grunde liegenden Daten wurden bereits detailliert beschrieben, weshalb an dieser Stelle auf eine Wiederholung der Erläuterungen verzichtet werden kann. Nach den Überlegungen Abschnitt 6.2.2 kann hier auf die Darstellung der Wirkung der absoluten Höhe des Biodieselpreises auf die Absatzmengen verzichtet werden. Durch die recht unelastische Nachfrage nach Kraftstoffen ist die Preishöhe als Erklärungsvariable für die Absatzmengen ungeeignet. Erwartungsgemäß ergab eine diesbezügliche Analyse keinen Zusammenhang. Das gilt unabhängig von der Erhebungsmethodik der Absatzmengen. Als Erklärungsvariable der Diffusion eignet sich vielmehr die Differenz der Tankstellenpreise von mineralischem Diesel und Biodiesel. Beide Kraftstoffarten sind gegeneinander substituierbar, zumindest in begrenztem Umfang. Daher kann angenommen wer-

den, dass die Höhe der Preisdifferenz eine Aussage über die Absatzmengen von Biodiesel bzw. dessen Marktanteil zulässt. Im Folgenden wird diese Annahme mittels einer einfachen Regressionsanalyse überprüft.

Zunächst wurde die Wirkung der Preisdifferenz auf die absoluten Absatzmengen von Biodiesel untersucht. Tatsächlich ergab sich bei beiden Erhebungsmethoden des Biodieselsabsatzes eine mittlere Korrelation mit dem Biodieselpreis. Dies kann jedoch nicht als Bestätigung, sondern lediglich als erster Hinweis darauf verstanden werden, dass ein solcher Preis-Mengen-Zusammenhang bei dem erneuerbaren Substitut Biodiesel tatsächlich existiert. Die geringe Zahl der Datenpunkte erlaubt keine solche Bestätigung. Diese Untersuchung berücksichtigt zudem keine Saisonalitäten. Zu bestimmten Zeiten ist mit einem erhöhten bzw. einem verminderten Verkehrsaufkommen zu rechnen. Dieses schlägt sich im Absatzvolumen aller Kraftstoffe nieder. Wenngleich dieser Effekt eher gering ausfällt, so beinhaltet eine solche Untersuchung doch stets Verzerrungen.

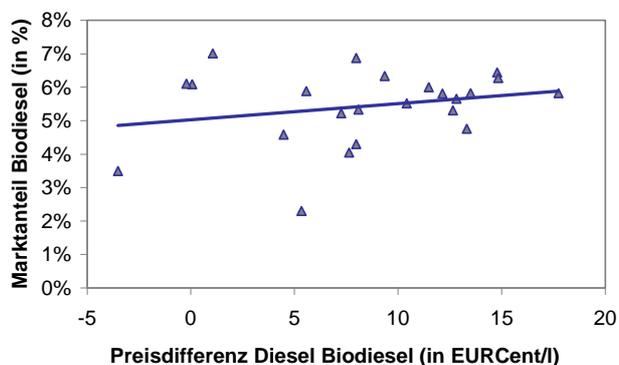
Zur Ermittlung der Diffusionswirkung des Preises wird daher nun untersucht, ob die Differenz der Tankstellenpreise von mineralischem Diesel und Biodiesel einen signifikanten Einfluss auf die Marktanteile der beiden Kraftstoffarten hat. Weil die Kraftstoffnachfrage, wie Abschnitt 6.2.2 gezeigt hat, einigermäßen unelastisch ist, führt eine Zunahme der Biodieselsabsatzmengen fast gleichzeitig auch zu einem Rückgang der abgesetzten Menge mineralischen Diesels. Der Marktanteil beinhaltet sowohl die Veränderung der Biodieselmenge als auch die in der Folge veränderte Absatzmenge mineralischen Diesels. Wiederum wurde zur Ermittlung dieses Zusammenhangs eine einfache Regressionsanalyse durchgeführt. Der Marktanteil von Biokraftstoffen wurde dabei als abhängige Variable modelliert, die Differenz der Tankstellenpreise als unabhängige Variable. Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7 zeigen grafisch das Ergebnis der Regressionsanalyse, jeweils bei Unterstellung der Erhebungsmethodik des Biodieselsabsatzes nach BAfA und UFOP.

**Abbildung 6.6** Preisdifferenz und Marktanteil Biodiesel (UFOP Erhebungsmethodik)



Quelle: Eigene Analyse nach STATISTISCHES BUNDESAMT (2007, 2008)

**Abbildung 6.7** Preisdifferenz und Marktanteil Biodiesel (BAfA Erhebungsmethodik)



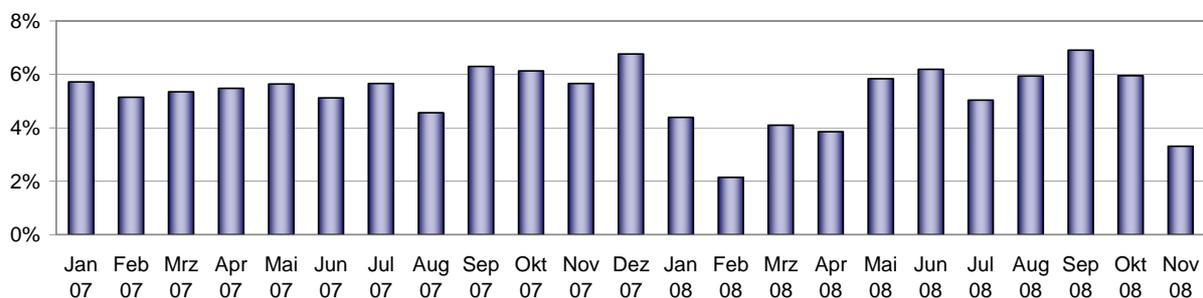
Quelle: Eigene Analyse nach STATISTISCHES BUNDESAMT (2007, 2008)

Die Regressionsanalyse zeigt einen mittleren Zusammenhang zwischen der Preisdifferenz an Tankstellen und dem Marktanteil des Biokraftstoffs. Der Korrelationskoeffizient beträgt dabei ca. 0,51. Dabei ist es unerheblich, ob sich die Analyse auf den Biodieselpreis oder den Preis des Kraftstoffäquivalents bezieht. Weil der Energiegehalt gegebenenfalls auch bei der Absatzmenge von Biodiesel berücksichtigt werden muss, bleibt das Ergebnis gleich. Eine multiple Regressionsanalyse mit dem Biodieselpreis und dem Dieselpreis als die unabhängigen Variablen führt zum selben Ergebnis wie die hier zu Grunde gelegte Preisdifferenz. Dies ist sofort einleuchtend und muss nicht näher erläutert werden.

Die Analyse illustriert anschaulich das Ergebnis der neoklassischen Modelluntersuchung aus Kapitel 3. Der Marktpreis ist ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Übernahme einer neuen Technologie durch die potentiellen Adopter. Liegt der Preis für das Kraftstoffäquivalent Biodiesel über dem Preis für mineralischen Dieselpreis, dann können drastische Absatzeinbrüche beobachtet werden. So beispielsweise im November 2008. Liegt der Preis des Kraftstoffäquivalents Biodiesel umgekehrt unter dem Dieselpreis, dann gewinnt der Biokraftstoff Marktanteile hinzu.

Dies zeigt auch sehr deutlich eine charakteristische Eigenschaft der Diffusion von Verbrauchsgütern. Die Verbreitung einer Innovation kann insbesondere bei Verbrauchsgütern abhängig vom Preis auch wieder abnehmen. Die Nachfrage nach Biodiesel bricht in dem Moment ein, wenn Biodiesel teurer wird als mineralischer Dieselpreis. In ähnlicher Weise ist dies auch bei anderen Produktarten der Fall. Der Effekt ist jedoch umso größer, je kürzer die Lebensdauer eines Produktes ist. Entsprechend lässt sich der Einfluss des Preises auf die Abnahme der Verbreitung einer Innovation am besten bei Verbrauchsgütern wie Biokraftstoffen untersuchen. Abbildung 6.8 zeigt die Entwicklung der Marktanteile von Biodiesel.

**Abbildung 6.8** Entwicklung der Marktanteile von Biodiesel



Quelle: Eigene Darstellung nach BAfA (2007, 2008)

Die Analyse gibt jedoch ebenfalls Hinweise darauf, dass der Preis nicht das einzige Diffusionshindernis darstellt. Der Preis-Mengen-Zusammenhang ist hierfür zu gering ausgeprägt. Vielmehr hängt die Verbreitung von Biokraftstoffen auch von anderen Faktoren ab. Dazu zäh-

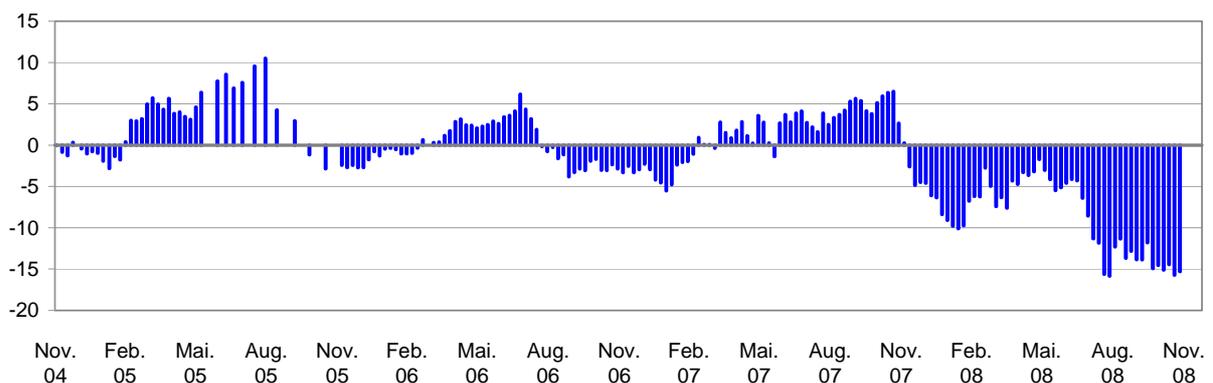
len etwa die persönliche Neigung der potentiellen Adopter zu umweltfreundlichem Verhalten, die Verfügbarkeit von Biokraftstoff Tankstellen sowie die vollzogene Anpassung der Dieselmotoren an die besonderen Erfordernisse des Reinkraftstoffs Biodiesel. Insbesondere auch hängt die Übernahmeentscheidung eines potentiellen Adopters von seinem Informationsstand hinsichtlich der Kraftstoffqualität bzw. seiner diesbezüglich möglicherweise bestehenden Vorbehalte ab.

### 6.3 Die Wirkung der staatlichen Förderung auf die Biodieselsabatzmengen

Solche Hürden, wie sie am Ende des vorherigen Abschnitts genannt werden, können durch eine entsprechende staatliche Förderung abgebaut werden. So existieren beispielsweise Initiativen zur Sicherung der Biokraftstoffqualität, die sich ebenfalls um eine Aufklärung hinsichtlich der technischen Eigenschaften von Biokraftstoffen bemühen. Die Herstellerfreigaben für Biokraftstoffe sind hierbei eine wertvolle Unterstützung. Gleichwohl lässt sich die Wirkung dieser Maßnahmen auf die Verbreitung des Biokraftstoffs kaum bestimmen. Die hierfür notwendigen Daten sind schlichtweg nicht vorhanden.

Daher wird im Folgenden die Wirkung der Energiesteuerbefreiung und der teilweisen Energiesteuerbefreiung von Biodiesel auf dessen Absatz untersucht. Die Untersuchung geht dabei wie folgt vor. Im vorangehenden Abschnitt wurde bereits gezeigt, dass die Differenz der Tankstellenpreise von mineralischem Diesel und Biodiesel die Aufteilung des Marktanteils beeinflusst. Um die Wirkung der Steuerbefreiung bzw. eines reduzierten Steuersatzes auf die Verbreitung von Biodiesel zu untersuchen, genügt es daher, die Wirkung dieser staatlichen Förderung auf den Biodieselpreis zu ermitteln. Mit der steuerlichen Behandlung von Biokraftstoffen ändern sich deren Grenzkosten und entsprechend auch die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber mineralischem Dieselkraftstoff. Die Untersuchung wird dabei in erster Linie qualitativ durchgeführt.

**Abbildung 6.9** Preisdifferenz der Tankstellenpreise Diesel und Biodieseläquivalent



Quelle: Eigene Darstellung nach ZMP (2009)

Zur Durchführung der Analyse werden verschiedene Informationen benötigt: die Energiesteuersätze der verschiedenen Stufen in Tabelle 5.4, die in Abschnitt 4.2.2 kalkulierten Herstellkosten von Biodiesel sowie Differenz der Tankstellenpreise von mineralischem Dieseldieselkraftstoff und Biodiesel, wie in Abbildung 6.9 dargestellt.

Bis Juli 2006 war Biodiesel vollständig von der Energiesteuer befreit. Trotz der vergleichsweise hohen Herstellkosten in diesem Zeitraum zeigt Abbildung 6.9, dass die Tankstellenpreise des Biodieseldieselkraftstoffäquivalents deutlich unter den Tankstellenpreisen für mineralischen Dieseldieselkraftstoff lagen. Zwischen Dezember 2004 und Juni 2006 durchschnittlich ca. 11 EURCent/l. Dieser Wert schrumpft jedoch deutlich, wenn der geringere Heizwert von Biodiesel berücksichtigt wird. Die Preisdifferenz des Kraftstoffäquivalents beträgt im selben Zeitraum dann nur noch ca. 1,60 EURCent/l.

Durch die Aufhebung der Energiesteuerbefreiung und die Einführung eines verminderten Energiesteuersatzes von 9 EURCent/l im Juni 2006 muss der Tankstellenpreis erwartungsgemäß steigen, zumal hier zusätzlich auch die Rolle der Mehrwertsteuer zu beachten ist. Tatsächlich kann jedoch kein signifikanter Preissprung bei Biodiesel festgestellt werden und der Preisunterschied der Tankstellenpreise von Diesel und Biodiesel bis Ende 2006 ist nur leicht gesunken. Durchschnittlich betrug er in diesem Zeitraum ca. 9,19 EURCent/l. Gleichwohl häufen sich ab diesem Zeitpunkt die negativen Werte für den Preisunterschied des Kraftstoffäquivalents, so dass dieser durchschnittlich den Wert von -0,90 EURCent/l annahm.

Ähnlich dem Übergang von der Steuerbefreiung auf den reduzierten Steuersatz von 9 EURCent/l lässt sich auch kein sprunghafter Anstieg der Tankstellenpreise von Biodiesel bei den weiteren Stufen der Steuererhöhung Anfang 2007, 2008 und 2009 feststellen. Im Gegenteil lag die Preisdifferenz des Kraftstoffäquivalents zwischen Anfang März und Ende November 2007 fast durchweg wieder im positiven Bereich. Dieses Ergebnis gilt trotz steigender Rohstoffkosten. Während der Rapspreis in der ersten Stufe mit der vollständigen Befreiung von der Energiesteuer bei durchschnittlich 73 EURCent/l lag, stieg er in der zweiten Stufe bereits um etwa 10 EURCent/l auf 83 EURCent/l an. In der dritten Stufe der Steuererhöhung im Jahr 2007 lag er wiederum ca. 10 EURCent/l höher bei 93 EURCent/l.

Dies gilt in ähnlicher Weise auch für die vierte Stufe der Steuererhöhung mit dem reduzierten Steuersatz von 15 EURCent/l in 2008. Eine deutliche Preissteigerung kann hier lediglich zwei Monate vor Erhöhung der Energiesteuer festgestellt werden. Dies lässt sich jedoch vor allem auf die steigenden Rohstoffkosten zurückführen. Diese stiegen zwischen Anfang November und Ende Dezember 2007 von ca. 95 EURCent/l auf ca. 103 EURCent/l Biodiesel.

Im Ergebnis kann der Zusammenhang zwischen der steuerlichen Behandlung von Biodiesel und dessen Absatzmengen nur begrenzt bestätigt werden. Die Analyse zeigt, dass die verschiedenen Stufen der Erhöhung des Energiesteuersatzes für Biodiesel kaum Einfluss auf die

Höhe des Biodieselpreises haben. Zwar ermöglicht der reduzierte Energiesteuersatz den Markteintritt des Biokraftstoffes, weil dessen Grenzkosten hierdurch wettbewerbsfähig werden. Solange jedoch der Preis für mineralischen Dieselkraftstoff über den Grenzkosten des Biodiesels liegt, wird sich der Tankstellenpreis für Biodiesel an dem Dieselpreis und eben nicht an den eigenen Grenzkosten orientieren. In der Konsequenz hat die steuerliche Behandlung von Biokraftstoffen nur begrenzt Einfluss auf die Höhe der Tankstellenpreise. Entsprechend ist ihr Potential zur Förderung der Verbreitung von Biokraftstoffen eher gering.

Damit zusammen hängt die Thematik der Ermittlung einer Über- oder Unterkompensation von Biokraftstoffen. Als Überkompensation wird die übermäßige steuerliche Förderung von Biodiesel bezeichnet. Dabei ist als übermäßig zu verstehen, dass die steuerliche Förderung zu einer Besserstellung des Biokraftstoffs im Vergleich zu seinem mineralischen Substitut führt. Die Förderung von Biodiesel, Pflanzenöl und Bioethanol soll die Wettbewerbsfähigkeit der Biokraftstoffe gewährleisten, jedoch keinen Wettbewerbsvorteil generieren. Während die Biodieselpreise in den letzten Jahren keinen Hinweis auf eine mögliche Unterkompensation liefern konnten, flammt derzeit die Diskussion vor dem Hintergrund der massiv gesunkenen Dieselpreise Ende 2008 wieder auf.

Anders als die Steuerbefreiung von Biokraftstoffen bestimmen Verwendungsquoten für Biokraftstoffe unmittelbar deren Marktanteil. Durch die Einführung der Verwendungsquoten nahm der Biodieselabsatz in den Jahren 2007 und 2008 deutlich zu. Sowohl bei Verwendungsquoten als auch bei der steuerlichen Behandlung von Biokraftstoffen darf bezweifelt werden, inwiefern die hierdurch induzierte Verbreitung nachhaltig ist. Beide Förderinstrumente leisten nur einen indirekten Beitrag zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit. Durch Skaleneffekte aufgrund der höheren Nachfrage lassen sich natürlich die Herstellkosten von Biokraftstoffen senken. Dieser Effekt ist jedoch eher gering. Eine solche Förderung bietet sich dann an, wenn die gegenwärtigen Biokraftstoffziele erfüllt werden sollen, gleichzeitig jedoch ein geringes Zukunftspotential von Biokraftstoffen der ersten Generation angenommen wird. Entsprechend umfasst die Förderung von Forschung und Entwicklung im Wesentlichen Aktivitäten bei Biokraftstoffen der zweiten Generation.

## 6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung der Biokraftstoffmärkte detailliert beschrieben und erläutert. Dazu gehört nicht allein die Entwicklung der Tankstellenpreise und Absatzmengen sondern auch die Kapazitäten auf der Angebotsseite. Produktionskapazitäten und die für den Anbau von Energiepflanzen verfügbaren landwirtschaftlichen Flächen stellen den begrenzenden Faktor für die heimische Produktion von Biokraftstoffen dar. Die Entwicklung des Biodieselmärktes in den vergangenen Jahren verlief dabei sehr dynamisch. Das Wachstum in der

Europäischen Union betrug im Länderdurchschnitt ca. 46% und die Produktionskapazitäten in Deutschland stiegen fast exponentiell an. Gleichwohl ist der europäische Biokraftstoffmarkt im internationalen Vergleich noch eher klein.

Dabei ist das Wachstum des Biokraftstoffmarktes eng an die staatliche Förderung von Biokraftstoffen gekoppelt. In bislang keinem Land konnten Biokraftstoffe ohne staatliche Förderung signifikante Marktanteile erreichen. In der EU werden Biokraftstoffe der ersten Generation hauptsächlich durch die Einführung von Verwendungsquoten und eine bevorzugte steuerliche Behandlung gefördert. Während Verwendungsquoten unmittelbar zur Verbreitung von Biokraftstoffen beitragen, ist ein solcher Effekt bei der steuerlichen Förderung nicht so deutlich erkennbar. Unbestritten gewährleistet die steuerliche Förderung von Biokraftstoffen deren Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Diesel. Abgesehen davon orientiert sich die Preisbildung von Biodiesel jedoch weniger an den eigenen Grenzkosten, als vielmehr am Tankstellenpreis für Diesel. Weil die Preisbildung bei Biodiesel nicht zu Grenzkosten erfolgt, kann jedes fiskalisches Instrument, das am Preis von Biodiesel ansetzt, letztlich nicht greifen. Würde sich die Preisbildung von Biokraftstoffen tatsächlich an den Grenzkosten orientieren, dann wäre der Biodieselanteil in der Vergangenheit deutlich höher gewesen. Grundsätzlich konnte nämlich bestätigt werden, dass sich der Biokraftstoffanteil am Gesamtmarkt an der Preisdifferenz zwischen mineralischem Diesel und Biodiesel orientiert.

Für die Zukunft ist jedoch mit einer stärkeren Orientierung an den Grenzkosten der Produktion zu rechnen. Der niedrige Dieselpreis und die nächste Stufe der Anpassung der Energiesteuer für Biokraftstoffe bewirken, dass die Gewinnmargen von Biodieselproduzenten schrumpfen. Bleiben die Dieselpreise konstant auf diesem niedrigen Niveau, wird die dann stärkere Orientierung des Biodieselpreises an den Grenzkosten der Produktion auch den Einfluss fiskalischer Instrumente offenbaren.

Gleichwohl muss hier angemerkt werden, dass jegliche Untersuchung des Preis-Mengen-Zusammenhangs bei Biokraftstoffen auf Basis einer ungenauen Datenlage erfolgt. Es wurde bereits ausgeführt, dass derzeit zwei verschiedene Erhebungsmethoden zur Ermittlung der Biodieselabsatzmengen existieren. Beide stimmen nicht vollständig mit den tatsächlichen Absatzmengen der verschiedenen Kraftstoffarten an Tankstellen überein. Wünschenswert im Sinne der hier vorgenommenen Untersuchung ist sicherlich die direkte Erfassung der Absatzmengen an Tankstellen. Zumindest sollte die Erhebung der Absatzmengen jedoch vereinheitlicht werden. Eine formelle Anfrage der UFOP an das Bundesfinanzministerium zur Klärung der Datenerhebung wurde bislang noch nicht beantwortet.

## 7 POLITISCH-ÖKONOMISCHE ZUSAMMENFASSUNG DER UNTERSUCHUNG

Biokraftstoffe werden definiert als Kraftstoffe, die im Gegensatz zu mineralischen Kraftstoffen biogenen Ursprungs sind. Damit enden jedoch schon fast die Gemeinsamkeiten der verschiedenen Biokraftstoffarten. Das heterogene Bild, das Biokraftstoffe bei näherer Betrachtung zeigen, ist von besonderer Bedeutung für die hier vorgenommene Untersuchung der Verbreitung dieser neuen Technologie. So weisen die verschiedenen Biokraftstoffarten unterschiedliche Vorzüge auf und sind in unterschiedlichem Ausmaß von den verschiedenen Diffusionshemmnissen betroffen, die im Laufe dieser Untersuchung identifiziert und analysiert wurden. Selbst innerhalb einer Biokraftstoffart fällt die Wettbewerbsfähigkeit unter anderem abhängig von der Rohstoffbasis unterschiedlich aus, wie der Ländervergleich mit Brasilien unterstreicht. Ohne staatliche Förderung lassen sich diese Diffusionshemmnisse nicht überwinden und Biokraftstoffe könnten sich lediglich in wenigen Nischen behaupten. In der Konsequenz erfordert die Förderung der Verbreitung von Biokraftstoffen einen differenzierten Ansatz. Die Wahl der Instrumente und Maßnahmen muss auf die jeweilige Biokraftstoffart abgestimmt sein. Die Heterogenität von Biokraftstoffen führt daher zu einer Vielzahl von Einzelergebnissen, die im Laufe dieser Arbeit analysiert und diskutiert wurden. Im Sinne einer politisch-ökonomischen Zusammenfassung dieser Untersuchung, werden die wichtigsten Einzelergebnisse nun nochmals zusammenhängend dargestellt.

Die Vielzahl verschiedener Diffusionsfaktoren, welche die Verbreitung von Biokraftstoffen hemmen, lassen sich den vier Diffusionsobjekten Produkt, Hersteller, Adopter und Rahmenbedingungen zuordnen. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Biokraftstoffarten naturgemäß vor allem im Hinblick auf die produktspezifischen Diffusionsfaktoren. Hingegen lassen sich nur geringfügige Unterschiede bezüglich der herstellerepezifischen und der adopterbezogenen Diffusionsfaktoren erkennen. Bei den politischen Rahmenbedingungen der Diffusion ist diesbezüglich keine Aussage möglich. Vielmehr bestimmt die jeweilige politische Intention, inwiefern etwa Bioethanol und Biodiesel denselben Rahmenbedingungen unterliegen.

Zu den größten herstellerepezifischen Diffusionsfaktoren bei Biokraftstoffen gehören die Ressourceneigenschaften und die Struktur des Kraftstoffmarktes. Die Wirkung beider Faktoren auf die Verbreitung von Biokraftstoffen wurde mittels eines neoklassischen Diffusionsmodells analysiert. Grundsätzlich folgt die Diffusion einer Basisinnovation anderen Regeln, als die Verbreitung von Biokraftstoffen, die eine Verbesserungsinnovation darstellen. Verbesserungsinnovationen verdrängen als Substitute das bereits bestehende Produkt vom Markt. Die Verbreitung von Biokraftstoffen ist damit gleichzeitig mit einem Rückgang des Absatzes mineralischer Kraftstoffe verbunden. Dabei hängt der genaue Diffusionsverlauf aber in nicht unerheblichem Maße von der Ressourcenart der beiden Substitute ab. Erschöpfbare Ressourcen, wie mineralische Kraftstoffe, unterliegen einer anderen Preisbildung als die erneuerbaren Bio-

kraftstoffe. Der Preisbildungsmechanismus fossiler Energieträger verlangt, dass deren Marktpreise im Zeitverlauf in Höhe des Zinses ansteigen. Für die Verbreitung von Biokraftstoffen bedeutet dieser Preisverlauf, dass sie auch dann fortschreitet, wenn es zu keinem weiteren technologischen Fortschritt im Sinne einer Senkung der Herstellkosten kommt. Dabei zeigt das Modell einen sukzessiven Übergang von der erschöpfbaren Ressource auf das erneuerbare Substitut. Dies ist einigermaßen ungewöhnlich für neoklassische Modelle, die üblicherweise eine solche Diffusionsphase nicht abbilden können, sondern vielmehr von einem sprunghaften Übergang auf die Innovation ausgehen. Ein Ziel dieser Untersuchung bestand daher darin, die Eignung neoklassischer Modelle für die volkswirtschaftliche Diffusionsforschung unter realitätsnäheren Annahmen zu zeigen. Im Ergebnis folgt der Verlauf der Diffusion auch im neoklassischen Diffusionsmodell, dem typischen S-förmigen Verlauf, wenn die zu Grunde gelegte Kostenfunktion entsprechend gewählt wird.

Dabei hängen der Zeitpunkt des Markteintritts der Innovation und damit der Beginn dieser Diffusion wesentlich von der Konzentration im Markt ab. Durch das sog. limit pricing gelingt es etwa einem monopolistischen Anbieter einer erschöpfbaren Ressource, den Markteintritt eines erneuerbaren Substituts zu verzögern. Freilich wird er den Markteintritt nicht auf unbegrenzte Zeit verhindern können. Er wird den Preis der Backstop-Technologie jedoch so lange unterbieten, bis seine Ressourcenvorräte erschöpft sind. Wiederum hängt es von den Annahmen über die Kostenfunktionen und den technologischen Fortschritt des erneuerbaren Substituts ab, wie sehr sich dessen Markteintritt verzögert.

Die Konzentration im Kraftstoffmarkt lässt sich durch einen staatlichen Eingriff aber nur bedingt vermindern. Zwar können ordnungspolitische Maßnahmen den Wettbewerb im deutschen Kraftstoffmarkt stimulieren, die Konzentration im Weltmarkt für Erdöl bleibt davon jedoch unberührt. Wenngleich das Wissen um den Einfluss der Marktstruktur auf den Diffusionsverlauf nützlich ist, so konzentriert sich diese Untersuchung doch auf jene Diffusionshemmnisse, die durch gezielte Förderung abgebaut werden können.

Dazu gehören beispielsweise die Informationsdefizite bei den potentiellen Adoptern. Die Kunden im deutschen Kraftstoffmarkt sind oftmals unzureichend über die Qualitätseigenschaften von Biokraftstoffen oder deren Kompatibilität mit den vorhandenen Motorenkonzepten informiert. Zum einen ist das auf die mangelnde Erprobbarkeit der technischen Eigenschaften von Biokraftstoffen zurückzuführen. In der Regel ist die individuelle Erprobung von Verbrauchsgütern unproblematisch. So kann die Entscheidung zur probeweisen Übernahme durch den Adopter schon beim nächsten Tankvorgang wieder revidiert werden. Jedoch müssen die Motoren zunächst auf den Gebrauch von Biodiesel als Reinkraftstoff oder E85 Bioethanol angepasst werden. Zum anderen lassen sich die Informationsdefizite auch nicht durch Beobachtung der Biokraftstoffeigenschaften bei anderen Adoptern abbauen.

Daher kommt der Bereitstellung und Kommunikation von Informationen zu den technischen Eigenschaften von Biokraftstoffen und den Möglichkeiten der Umrüstung von Motoren eine besondere Bedeutung zu. Solche Aktivitäten werden in Deutschland beispielsweise im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Biokraftstoffverbands UFOP durchgeführt. Eine andere Möglichkeit zur Behebung dieser Informationsdefizite, die in Europa und Brasilien gleichermaßen ergriffen wurde, besteht in der Zertifizierung von Biokraftstoffen. Im Jahr 2003 wurde in der Europäischen Union die bis heute gültige Biodieselnorm DIN EN 14214 eingeführt. Mehr als ein reines Instrument zum Abbau von Informationsdefiziten, erfüllt sie auch den Anspruch der Qualitätssicherung bei Biodiesel. Dies ist auch deshalb von besonderer Bedeutung für die Diffusion von Biokraftstoffen, weil sich eine niedrige Qualität nicht nur negativ auf das Unternehmen ausübt, welches das mangelhafte Produkt herstellt oder vertreibt. Der Vertrauensverlust der Konsumenten betrifft die gesamte Branche und bremst entsprechend die Diffusion von Biokraftstoffen. Der Markt für Biokraftstoffe ist jedoch ein globaler und so besteht Bedarf an einer internationalen Biokraftstoffnorm, soll eine Segmentierung des Marktes vermieden werden. Die bestehenden Biokraftstoffnormen bleiben jedoch zumeist hinter den Qualitätsanforderungen der europäischen Normen zurück. Gleiches ist für eine einheitliche internationale Biokraftstoffnorm zu befürchten, wenn diesbezüglich eine Einigung erreicht werden soll. Unklar ist dabei, ob eine solche Norm zu einer insgesamt beschleunigten Verbreitung von Biokraftstoffen beitragen kann, oder ob der Effekt der verzögerten Diffusion in Deutschland und Europa überwiegt.

Ebenso können auch die politischen Rahmenbedingungen die Verbreitung von Biokraftstoffen bremsen. Insbesondere erschweren die Rahmenbedingungen in Deutschland Investitionen im Biokraftstoffmarkt und hemmen dadurch die Verbreitung von Biokraftstoffen. Es liegt in der Natur der Sache, dass die Politik die verlässliche Rahmenbedingungen für Investitionen nur für einen eng begrenzten Zeitraum festlegen kann. Für solche Großinvestitionen, wie sie Biokraftstoffanlagen darstellen, bedeutet das eine hohe Investitionsunsicherheit. Daher gilt es, die verbleibenden Diffusionshemmnisse der politischen Rahmenbedingungen abzubauen. Auf diese Weise könnte die Vielzahl von Maßnahmen zur Förderung von Biokraftstoffen auch eine stärkere Wirkung entfalten und die Verbreitung von Biokraftstoffen würde sich entsprechend beschleunigen.

Solche adopterbezogenen oder herstellerspezifischen Diffusionsfaktoren und die Rahmenbedingungen der Diffusion stehen jedoch oftmals nicht im Mittelpunkt der Analyse, wenn die Verbreitung von Biokraftstoffen untersucht wird. Die meisten Studien konzentrieren sich auf die produktbezogenen Diffusionsfaktoren einzelner Biokraftstoffe oder nehmen eine Gegenüberstellung verschiedener Biokraftstoffarten vor. Wie das Beispiel Brasilien jedoch eindrücklich zeigt, gehören diese produktspezifischen Diffusionsfaktoren nicht zwangsläufig zu den größten Diffusionshemmnissen. Die besondere Attraktivität der produktspezifischen Diffusionsfaktoren für diese Untersuchung besteht vielmehr darin, dass sich das Resultat einer

Förderung hier wesentlich deutlicher zeigen lässt, als dies bei den anderen Diffusionsobjekten der Fall ist.

Zunächst zeigt sich im Hinblick auf das Diffusionsobjekt Produkt der Zusammenhang zwischen der Verbreitung einer Innovation und deren Entwicklung. Die Wettbewerbsfähigkeit einer Innovation hängt insbesondere vom Resultat der Inventionsphase im Innovationszyklus ab. Im Wesentlichen definiert sich die Wettbewerbsfähigkeit bei Verbrauchsgütern wie Biokraftstoffen über die Herstellkosten. Dabei ist die Aufwändigkeit des Produktionsprozesses bei BtL-Kraftstoffen wesentlich höher als bei Biokraftstoffen der ersten Generation. Entsprechend setzt an diesem Punkt auch die staatliche Förderung an. Die Forschung und Entwicklung zur Senkung der Produktionskosten von BtL-Kraftstoffen wird subventioniert. Kurzfristig hat diese Förderung zwar keinen direkten Einfluss auf die Verbreitung von Biokraftstoffen. Durch Forschung und Entwicklung wird jedoch das Zukunftspotential von Biokraftstoffen gesichert. Dies wiederum ist auch für die kurzfristige Attraktivität von Biokraftstoffen und somit deren kurzfristiger Verbreitung von Bedeutung.

Obwohl der Produktionsprozess bei Biokraftstoffen der ersten Generation wesentlich weniger aufwändig ist, verhindern auch hier die hohen Herstellkosten von Bioethanol und Biodiesel deren eigenständige Verbreitung. Auch die Herstellkosten von Bioethanol in Brasilien wurden erst durch die Jahre intensiver Förderung wettbewerbsfähig. In Deutschland und Europa sind die Rohstoffkosten mit Abstand der größte Kostenfaktor. Die Rohstoffbasis ist hierfür nur ein Grund. Auch die Anbaubedingungen für Energiepflanzen sind in Deutschland und Europa deutlich schlechter als etwa in Brasilien. Bei Bioethanol auf Weizenbasis machen die Rohstoffkosten etwa 52% der Herstellkosten aus, bei Bioethanol auf Zuckerrübenbasis steigt dieser Anteil sogar noch auf knapp 57%. Dies gilt jedoch nur bei einem mittleren Preisniveau. Die Kalkulation und Analyse der Herstellkosten für Biodiesel hat gezeigt, wie sehr die Wettbewerbsfähigkeit des Biokraftstoffs durch die Volatilität der Rohstoffpreise schwankt. Im Jahr 2008 zeigen die kalkulierten Herstellkosten für Biodiesel eine Spanne von fast 50%.

Die Förderung von Biokraftstoffen muss sich daher insbesondere auf die Gewährleistung der Wettbewerbsfähigkeit konzentrieren. Gleichzeitig stellt dieser Anspruch auch eine besondere Herausforderung für die Auswahl und Ausgestaltung der Förderinstrumente dar, weil die Schwankungen der Herstellkosten im Zeitverlauf berücksichtigt werden müssen. Diese Problematik umgehen Verwendungsquoten elegant. Seit 2007 legen sie in Deutschland den Anteil der Beimischung von Biokraftstoffen zu mineralischen Kraftstoffen fest. Damit erhöhen Verwendungsquoten ad hoc den Biokraftstoffanteil im Markt und stimulieren auf diese Weise die Verbreitung von Bioethanol und Biodiesel. Im Jahr 2007 erhöhte sich der Biokraftstoffanteil daher um gut 3% und er wird weiter zunehmen, wenn die energetische Verwendungsquote für Bioethanol zum Januar 2010 auf 3,6% steigt. Gleichzeitig schaffen Verwendungsquoten einen stabilen Absatzmarkt, der private Investoren anzieht und Investitionen in Forschung und Ent-

wicklung attraktiv macht. Die Verbreitung von Biokraftstoffen als Reinkraftstoff wird durch diesen Effekt jedoch nur geringfügig gefördert.

Das wichtigste Instrument zur Förderung der Verbreitung von Biodiesel als Reinkraftstoff und E85 Bioethanol ist in Deutschland und vielen anderen Europäischen Mitgliedsstaaten die steuerliche Behandlung dieser Biokraftstoffe. Biokraftstoffe unterliegen außerhalb der vorgeschriebenen Verwendungsquoten einem reduzierten Energiesteuersatz. Dabei berücksichtigt diese Regelung die Schwankungen in den Herstellkosten zumindest teilweise durch die Ermittlung der Über- bzw. Unterkompensation und der entsprechenden Anpassung des Steuersatzes. Im März 2005 hat das Bundesfinanzministerium eine solche Überkompensation festgestellt. In der Folge wurde Biodiesel ab August 2006 energiesteuerpflichtig, wenngleich der Steuersatz bis heute ein reduzierter ist.

Es steht außer Frage, dass die Wettbewerbsfähigkeit von Biokraftstoffen durch ihre Befreiung und teilweise Befreiung von der Energiesteuer so erhöht wird, dass eine Nachfrage nach dem Biokraftstoff besteht und damit – wenn auch noch in geringem Umfang – mineralische Kraftstoffe substituiert werden. Inwiefern sich die Verbreitung von Biokraftstoffen durch dieses Instrument aber noch weiter stimulieren lässt, wird hier bezweifelt. Die Zweifel sind das Ergebnis der Analyse der Wirkung der steuerlichen Behandlung von Biokraftstoffen auf deren Verbreitung, die einen wesentlichen Bestandteil dieser Untersuchung darstellt. Die Befreiung und teilweise Befreiung von der Energiesteuer ist ein fiskalisches Instrument, welches am Preis von Biokraftstoffen ansetzt. Der Untersuchungsgegenstand verlangt daher die Beantwortung zweier Fragen: Welchen Einfluss hat die steuerliche Behandlung von Biokraftstoffen auf deren Tankstellenpreis? Und ist der Tankstellenpreis von Biokraftstoffen, auch im Vergleich zu mineralische Kraftstoffen, der dominierende Diffusionsfaktor?

Um die erste Frage zu beantworten, wurden in dieser Untersuchung zunächst die Herstellkosten von Biokraftstoffen kalkuliert. Weder die Entwicklung dieser Herstellkosten im Zeitverlauf, noch die schrittweise Rückführung der teilweisen Energiesteuerbefreiung haben eine nachweisbare Wirkung auf die Entwicklung der Tankstellenpreise gezeigt. Vielmehr konnte gezeigt werden, dass sich der Tankstellenpreis für Biodiesel eng an den Preis des mineralischen Dieselkraftstoffs anlehnt, solange die Grenzkosten von Biodiesel unter diesem Preis liegen. Damit kann ein fiskalisches Instrument auch nur in begrenztem Umfang Wirkung entfalten. Die Verbreitung des Biokraftstoffs wird wegen dieser Form der Preisbildung immer hinter dem zurückbleiben, was unter den gegebenen Umständen tatsächlich möglich wäre.

Es konnten jedoch erste Hinweise ermittelt werden, welche die Bedeutung des Biokraftstoffpreises für dessen Verbreitung untermauern. Um diese zweite Frage zu beantworten, wurde eine einfache Regressionsanalyse vorgenommen. Dabei war die Zahl der Datenpunkte jedoch sehr gering, weil entsprechende Daten erst seit Anfang 2007 vorliegen. Vor diesem Zeitpunkt wurden die Absatzmengen von Biokraftstoffen nicht kontinuierlich erfasst. Daher kann die

vorgenommene Untersuchung keine belastbare Aussage treffen, sondern lediglich eine erste Vorstellung von einem möglichen Preis-Mengen-Zusammenhang bei Biokraftstoffen geben, die in weiteren Untersuchungen zu einem späteren Zeitpunkt überprüft werden muss. Die Regressionsanalyse zeigt im Ergebnis eine mittlere Korrelation zwischen der Differenz der Tankstellenpreise für mineralischen Dieselmotorkraftstoff und Biodiesel einerseits und den abgesetzten Biodieselmengen andererseits. Damit bekräftigt die Untersuchung den Preis als wichtigen Bestimmungsfaktor der Verbreitung von Biokraftstoffen. Dies steht im Einklang mit anderen Analysen, welche die Bedeutung des Preises verschiedener Verbrauchsgüter für deren Diffusion betonen.

Es bleibt damit letztlich festzuhalten, dass im Hinblick auf die Verbreitung von Biokraftstoffen eine Vielzahl unterschiedlicher Diffusionshemmnisse besteht. Sind diese Hürden jedoch erst einmal überwunden und können Biokraftstoffe mineralische Kraftstoffe hinreichend substituieren, dann wird die Verbreitung von Biokraftstoffen durch deren Tankstellenpreis bestimmt. Insbesondere gilt dies also für die qualitativ höherwertigen BtL-Kraftstoffe. Die Diffusion von Biokraftstoffen bedeutet dabei fast automatisch auch die Substitution mineralischer Kraftstoffe. Weil die Nachfrage nach Kraftstoffen, gleich welcher Art, unelastisch ist, werden Biokraftstoffe zwangsläufig die mineralischen Kraftstoffe verdrängen.

Wenn also die Nachfrage nach Biokraftstoffen bei einem entsprechenden Tankstellenpreis als gegeben angenommen werden kann, dann ist das Rezept für die weitere Verbreitung von Biokraftstoffen so einfach wie einleuchtend: Der Biokraftstoffmarkt muss attraktiv sein für private Investoren.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen hierfür ist das Zukunftspotential des jeweiligen Biokraftstoffs. Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie in den Aufbau von Produktionskapazitäten werden nur dann getätigt, wenn sich diese durch den Absatz von Biokraftstoffen wieder amortisieren können. Die verschiedenen Biokraftstoffarten unterscheiden sich in ihrem Zukunftspotential gewaltig. Die heimische Produktion von Bioethanol kann im Gegensatz zu Biodiesel einen großen Teil der Kraftstoffnachfrage decken. Unter diesen Umständen werden sich wenige private Investoren für den Aufbau weiterer Biodieselanlagen finden. Der Grund hierfür ist nicht etwa die mangelnde Verfügbarkeit von Rohstoffen. Die zur Herstellung von Biodiesel notwendigen Rohstoffe lassen sich auf dem internationalen Markt für landwirtschaftliche Erzeugnisse erstehen. Vielmehr besteht für potentielle Investoren eine hohe Unsicherheit im Hinblick auf die Entwicklung der politischen Rahmenbedingungen, die auch künftig in erster Linie die vollständig heimische Produktion von Biokraftstoffen begünstigen werden. Obwohl Handelsrestriktionen bei Biokraftstoffen deren Verbreitung hemmen und daher im Zeitverlauf abgebaut werden sollten, widerspricht dies doch dem Ziel der Förderung der Landwirtschaft in Deutschland. Aufgrund der Unsicherheit der politischen Rahmenbedingungen für Biodiesel bieten Bioethanol und BtL-Kraftstoffe für private Investoren das

größere Zukunftspotential. Für diese Märkte sollte der Staat Kapital bereitstellen. Langfristige Kredite mit niedrigen Zinssätzen und Risikogarantien sind notwendig, um private Investoren zu gewinnen. In Deutschland wird von dieser Möglichkeit bislang jedoch nur in begrenztem Umfang Gebrauch gemacht.

Das Zukunftspotential von Biokraftstoffen hängt jedoch nicht allein von deren Verfügbarkeit in Deutschland ab. Gleichzeitig kann diese neue Technologie nur dann erfolgreich sein und sich verbreiten, wenn die Herstellkosten konkurrenzfähig im Vergleich zur Produktion mineralischer Kraftstoffe sind. Bislang wird auf die Verringerung der Herstellkosten von Bioethanol und BtL-Kraftstoffen und auf die Herausforderungen einer Massenproduktion von Biokraftstoffen jedoch nur ein kleiner Teil des immensen wissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Potentials verwandt. Entsprechende Aktivitäten sind weltweit derzeit eher am kurzfristigen Erfolg ausgerichtet. Soll der Biokraftstoffmarkt für private Investoren aber langfristig attraktiv werden, dann bedarf es einer längerfristig ausgerichteten Grundlagenforschung. Eine solche Aufgabe fällt üblicherweise dem Staat zu, wenngleich sich dabei die Zusammenarbeit mit Unternehmen und privaten Forschungseinrichtungen, beispielsweise im Rahmen von Public-Private-Partnerships, anbietet. Forschungsbedarf besteht grundsätzlich auf jeder Stufe des Lebenszyklus von Biokraftstoffen. Bei BtL-Kraftstoffen konzentriert sich der Forschungsbedarf jedoch insbesondere auf die einzelnen Produktionsschritte, bei Bioethanol zusätzlich auf die Weiterentwicklung der Rohstoffbasis. Das Beispiel Brasilien zeigt, wie durch den Einsatz von Gentechnologie sowohl die Energieausbeute als auch die Widerstandsfähigkeit von Zuckerrohr deutlich gesteigert werden konnten. Die genetische Modifikation landwirtschaftlicher Erzeugnisse sollte zwar nicht unbesehen in Deutschland übernommen werden, jedoch als Möglichkeit zur Senkung der Herstellkosten besonders bei Bioethanol untersucht werden.

Inwiefern heimisch produzierte Biokraftstoffe tatsächlich eine Zukunft in Deutschland haben, hängt wesentlich vom Ergebnis dieser Forschungsanstrengungen ab. Deswegen muss sich die Förderung von Biokraftstoffen noch stärker auf die Förderung von Forschung und Entwicklung konzentrieren, als das bislang der Fall ist. Nur wenn die Forschungsaktivitäten erfolgreich sind, kann sich eine starke Biokraftstoffindustrie entwickeln und Deutschland zum Technologieführer insbesondere bei BtL-Kraftstoffen werden.

Eine entsprechende Überprüfung und Neuausrichtung der deutschen Biokraftstoffstrategie sollte jedoch nicht isoliert erfolgen. Am Ende dieser Untersuchung darf daher der Hinweis nicht fehlen, dass die Biokraftstoffstrategie in den weiteren Komplex einer energiepolitischen Gesamtstrategie für Deutschland und auch Europa eingebunden werden muss. Diese schließt neben dem Transportsektor insbesondere auch die Stromerzeugung ein. Soll auf Dauer die Versorgungssicherheit in Deutschland gewährleistet sein und gleichzeitig die ambitionierten Klimaziele erreicht werden, dann ist eine integrierte Strategie zum Umbau der energieintensi-

ven Wirtschaftszweige erforderlich. Es muss der Übergang zu einem effizienteren Energieeinsatz und einer umwelt- und insbesondere klimafreundlicheren Energieerzeugung geschafft werden. Im Sinne einer solchen Energierevolution kommt der Biokraftstoffstrategie eine gewichtige Rolle zu.

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- ADAC (ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB E.V.) (2009). Tankstellen in Deutschland: Entwicklung der Zahl seit 1965 und aktuelle Markenverteilung, [http://www.adac.de/Auto\\_Motorrad/Tanken/zahlen\\_fakten/Entwicklung\\_der\\_Zahl\\_der\\_Tankstellen\\_und\\_Markenverteilung/default.asp](http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/zahlen_fakten/Entwicklung_der_Zahl_der_Tankstellen_und_Markenverteilung/default.asp).
- AGQM (ARBEITSGEMEINSCHAFT QUALITÄTSMANAGEMENT BIODIESEL E.V.) (2009a). Qualitätssicherung für Biodiesel auf der Stufe der Tankstellen wird eingestellt, [http://www.agqm-biodiesel.de/\\_1\\_\\_\\_\\_174.html](http://www.agqm-biodiesel.de/_1____174.html).
- AGQM (ARBEITSGEMEINSCHAFT QUALITÄTSMANAGEMENT BIODIESEL E.V.) (2009b). Wir liefern Qualität - Sie schonen die Umwelt!, <http://www.agqm-biodiesel.de/>.
- AHLHEIM, M., O. FRÖR und N. SINPHURMSUKSKUL (2006). Economic valuation of environmental benefits in developing and emerging countries: theoretical considerations and practical evidence from Thailand and the Philippines. *Quarterly Journal of International Agriculture*, 45 (4): S. 397-419.
- AMUNDSEN, E. S. (1992). *Théorie des ressources épuisables et rente pétrolière*. Bonn.
- ANDEL, N. (1977). Subventionen. In: *Handwörterbuch der Wirtschaftswissenschaft*, W. ALBERS (Hrsg.). Stuttgart. 7, 491-510.
- ARMSTRONG, A. P., J. BARO, J. DARTOY, A. P. GROVES, J. NIKKONEN und D. J. RICKEARD (2002). *Energy and Greenhouse Gas Balance for Biofuels for Europe - an Update*. Brüssel.
- ARROW, K. J., H. B. CHENERY, B. B. MINHAS und R. M. SOLOW (1961). Capital Labour Substitution and Economic Efficiency. *Review of Economics and Statistics*, 63: S. 225-250.
- AUSILIO, B. (2006). Future energy sources and systems - Acting on climate change and energy security. *Journal of Power Sources*, 157: S. 893-901.
- BABU, P. G., K. S. K. KUMAR und N. S. MURTHY (1997). An overlapping generations model with exhaustible resources and stock pollution. *Ecological Economics*, 21: S. 35-43.
- BAFA (BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE) (2007). *Amtliche Mineralöl-daten für die Bundesrepublik Deutschland 2007, Monate Januar bis Dezember*, [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel/amtliche\\_mineraloeldaten/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel/amtliche_mineraloeldaten/index.html).
- BAFA (BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE) (2008). *Amtliche Mineralöl-daten für die Bundesrepublik Deutschland 2008, Monate Januar bis Dezember*, [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel/amtliche\\_mineraloeldaten/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel/amtliche_mineraloeldaten/index.html).
- BALTZ, R. A., A. F. BURCHAM, O. C. SITTON und N. L. BOOK (1982). The recycle of sulfuric acid and xylose in the prehydrolysis of corn stover. *Energy*, 7 (259-265).
- BECKER, H., W. KLEINHANß und H. KÖGL (1988). Auswirkungen der Produktion nachwachsender Rohstoffe auf das Nahrungsmittelangebot sowie Wertung von Politikmaßnahmen zur Förderung der Produktion nachwachsender Rohstoffe IfBW-Arbeitsbericht, 4/88, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.
- BEER, T., T. GRANT, W. DAVID und W. HARRY (2002). Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles. *Atmospheric Environment*, 36 (4): S. 753-763.

- BEER, T., T. GRANT, G. MORGAN, J. LAPSZEWICZ, P. ANYON, J. EDWARDS, P. NELSON, H. WATSON und D. WILLIAMS (2001). Comparison of Transport Fuels. Final report submitted to the Australia Greenhouse Office on Stage 2 Study of Life-Cycle Emissions Analysis of Alternative Industrial Research Organisation, [www.greenhouse.gov.au/transport/comparison](http://www.greenhouse.gov.au/transport/comparison).
- BENEDETTI, O. I. B., R. RATHMANN, A. D. PADULA und G. P. STEINHORST (2007). Usage competition between oilseeds and biofuels: impact assessment on the Brazilian food production. 17th IFAMA - annual world food and agribusiness forum and symposium Parma.
- BERG, C. (2005). World Fuel Ethanol - Analysis and Outlook. METI.
- BERNDES, G. und J. HANSSON (2007). Bioenergy expansion in the EU: Cost-effective climate change mitigation, employment creation and reduced dependency on imported fuels. *Energy Policy*, 35: S. 5965-5979.
- BIOKRAFTQUUG (BIOKRAFTSTOFFQUOTENGESETZ) (2006). Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften vom 18. Dezember 2006, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2006 Teil I Nr. 62, ausgegeben zu Bonn am 21. Dezember 2006.
- BMVEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) (2005). Biokraftstoffe - Strategie für Mobilität von morgen.
- BMWA (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT) (2005). Stand der Welthandelsrunde (Doha Development Agenda - DDA), <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/W/wto-handelsrunde-stand-mai-juni-2006,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- BOCK, R. (2004). Biokonversion von Glycerin zu 1,3-Propandiol mit freien und immobilisierten Mikroorganismen.
- BÖCKER, F. und H. GIERL (1987). Determinanten der Diffusion neuer industrieller Produkte. *ZfB*, 57 (7): S. 684-698.
- BOCKEY, D. (2005a). Biodiesel im Spannungsfeld zwischen Akzeptanz und Qualität. Ostfildern.
- BOCKEY, D. (2005b). Biodieselabsatz boomt - aber wie lange noch? *Raps*, 23 (4): S. 173ff.
- BOCKEY, D. (2006). Rohstoffpotenziale für die Produktion von Biodiesel - eine Bestandsaufnahme. Berlin.
- BODE, S. (2006). Multi-period emissions trading in the electricity sector - winners and losers. *Energy Policy*, 34 (6): S. 680-691.
- BOMB, C., K. MCCORMICK, E. DEURWAARDER und T. KÅBERGER (2007). Biofuels for transport in Europe: Lessons from Germany and the UK. *Energy Policy*, 35 (4): S. 2256-2267.
- BONUS, H. (1975). Untersuchungen zur Dynamik des Konsumgüterbesitzes. Berlin.
- BOZBAS, K. (2008). Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2): S. 542-552.
- BP (BRITISH PETROLEUM) (2008). BP Statistical Review of World Energy, London.

- BRAZEE, R. J. und L. M. CLOUTIER (2006). Reconciling Gray and Hotelling. Lessons from Early Exhaustible Resource Economics. *American Journal of Economics and Sociology*, 65 (3): S. 827-856.
- BRENT, R. J. (2006). *Applied cost-benefit analysis*. Cheltenham.
- BREWSTER, S. C. (2007a). The Effect of E100 Water Content on High Load Performance of a Spray Guide Direct Injection Boosted Engine. SAE Paper, 2007-01-2648.
- BREWSTER, S. C. (2007b). Initial Development of a Turbocharged Direct Injection E100 Combustion System. SAE Paper (2007-01-3625).
- BROCKS, F. (2001). *Die staatliche Förderung alternativer Kraftstoffe: das Beispiel Biodiesel*. Frankfurt am Main.
- BRONS, M., P. NIJKAMP, E. PELS und P. RIETVELD (2008). A meta-analysis of the price elasticity of gasoline demand. A SUR approach. *Energy Economics*, 30: S. 2105-2122.
- BRÖSSE, U. (1996). *Industriepolitik*. München.
- BROWN, G. (1974). An Optimal Program for Managing Common Property Resources with Congestion Externalities. *Journal of Political Economy*, 82 (1): S. 163-173.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, L. U. F. (2000). *Agenda 2000: Pflanzlicher Bereich, Agrarumweltmaßnahmen*. Bonn.
- BUNDESREGIERUNG (2005). *Unterrichtung durch die Bundesregierung - Bericht zur Steuerbegünstigung für Biokraft- und Bioheizstoffe*. Deutscher Bundestag, Drucksache 15/5816, 15. Wahlperiode 21. Juni 2005. Berlin.
- BURGER, M., B. GRAEBER und G. SCHINDLMAYR (2007). *Managing Energy Risk - an Integrated View on Power and Other Energy Markets*. Chichester.
- CARDONA, C., J. POSADA und M. MONTOYA (2007). Use of Glycerol from biodiesel production: Conversion to added value products. *European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)*, Kopenhagen, 16.-20. September.
- CARSON, R. T. und W. M. HANEMANN (2005). Chapter 17: Contingent Valuation. In: *Handbook of Environmental Economics (Hrsg.)*. Cheltenham, Elgar. 2: *Valuing Environmental Changes* 821-936.
- CHIANG, A. C. (1992). *Elements of dynamic optimization*. New York.
- CLASING, M. (2006). *CO<sub>2</sub>-Emissionshandel - Auswirkungen auf die deutsche Energiewirtschaft*. Jenaer Beiträge zur Wirtschaftsforschung, (2).
- CLOUTIER, L. M. und R. ROWLEY (2003). Simulation, Quantitative Economics, and Econometrics: Electronic Infrastructure and Challenges to Methodological Standards. *European Journal of Economic and Social Systems*, 15: S. 221-239.
- COELHO, S. T. (2005). *Biofuels - advantages and trade barriers*. United Nations Conference on Trade and Development, Genf, 4. Februar 2005.
- CONNEMANN, J. und J. FISHER (1999). *Biodiesel in Europe 2000 - Biodiesel Processing Technologies and Future market Development*. Symposium "Biodiesel - Fuel from Vegetable Oils for Compression-Ignition Engines" TEA, Ostfildern, Stuttgart.
- COOPER, J. C. B. (2003). Price elasticity of demand for crude oil: estimates for 23 countries. *OPEC Review*, 27 (1): S. 1-8.

- CORRELJE, A. und C. VAN DER LIND (2006). Energy supply security and geopolitics: A European perspective. 34: S. 532–543.
- COUVILLION, J. K. (2008). Ultra Deepwater Developments in Drilling and Production. OCS Committee Policy Meeting 6.3.2008, [www.mms.gov/mmab/PDF/WebPageOCSPMeetingHerndonVAMarch2008/Couvillion%20Ultra%20Deepwater%20Advances%20in%20Drilling%20and%20Development%20030606.pdf](http://www.mms.gov/mmab/PDF/WebPageOCSPMeetingHerndonVAMarch2008/Couvillion%20Ultra%20Deepwater%20Advances%20in%20Drilling%20and%20Development%20030606.pdf).
- CUMMINGS, R. (1969). Some Extensions of the Economic Theory of Exhaustible Resources. *Western Economic Journal*, 7: S. 201-210.
- CUTEC (CLAUSTHALER UMWELTTECHNIK-INSTITUT GMBH) (2009). Biomassekonversion, <http://www.cutec.de/thermische.php>.
- DASGUPTA, P. und G. M. HEAL (1974). The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies*, 41: S. 3-28.
- DASGUPTA, P. und G. M. HEAL (1979). *Economic Theory and Exhaustible Resources*. Cambridge.
- DASGUPTA, P. und J. E. STIGLITZ (1976). Uncertainty and the Rate of Extraction Under Alternative Institutional Arrangements.
- DASGUPTA, P. und J. E. STIGLITZ (1981). Market Structure and Resource Extraction under Uncertainty. *The Scandinavian Journal of Economics*, 83 (2): S. 318-333.
- DE LA FUENTE, A. (2000). *Mathematical Methods and Models for Economists*. Cambridge.
- DEMIRBAS, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, Article in Press: S. 11.
- DICHTL, E. (1991). Dimensionen der Produktqualität. *Marketing, ZFP*, 3: S. 149-155.
- DIDZOLEIT, W. und D. KOCH (1998). Der Melker auf dem Sofa. *Der Spiegel*, 48: S. 202-208.
- DORFMAN, R. (1969). An Economic Interpretation of Optimal Control Theory. *The American Economic Review*, 59 (5): S. 817-831.
- DURBIN, T., J. W. MILLER, T. YOUNGLOVE, T. HUAI und K. COCKER (2005). Final Report: Effects of Ethanol and Volatility Parameters on Exhaust Emissions. University of California.
- ECOTEC (ECOTEC RESEARCH & CONSULTING LTD.) (1999). *The Impact of Renewables on Employment and Economic Growth*.
- EDWARDS, R., J.-F. LARIVÉ und V. MATHIEU (2005). Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Conservation of clean air and water in Europe (CONCAWE), European Council for Automotive R&D (EU-CAR), European Commission Directorate General, Joint Research Center (JRC).
- EEX (EUROPEAN ENERGY EXCHANGE) (2009a). Historical Data for Coal Year Futures, <http://www.eex.com/de/Marktdaten/Handelsdaten/Kohle/Coal%20Futures%20Terminmarkt>.
- EEX (EUROPEAN ENERGY EXCHANGE) (2009b). Historical Data for EUA Futures, <http://www.eex.com/de/Marktdaten/Handelsdaten/Emissionsrechte/European%20Carbon%20Futures%20Terminmarkt>.

- EEX (EUROPEAN ENERGY EXCHANGE) (2009c). Historical Data for Natural Gas Year Futures, <http://www.eex.com/de/Marktdaten/Handelsdaten/Erdgas/Natural%20Gas%20Futures%20|%20Terminmarkt>.
- EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION) (2008). Weekly Europe (UK) Brent Blend Spot Price FOB, <http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/wepcbrentw.htm>.
- ENERGIEStG (ENERGIESTEUEERGESETZ) (2006). Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. ) S. 1534; 2008, 660; 2008, 1007), geändert durch Artikel 1 des Gsetzes vom 18. Dezember 2006 (BGBl. I S. 3180).
- ENGUÍDANOS, M., A. SORIA, B. KAVALOV und P. JENSEN (2002). Techno-economic analysis of Bio-diesel production in the EU: a short summary for decision-makers.
- ERDÖLBEVG (1978). Gesetz über die Bevorratung mit Erdöl und Erdölerzeugnissen (Erdölbevorrattungsgesetz - ErdölBevG), Neugefasst durch Bek. v. 6.4.1998 I 679; zuletzt geändert durch Art. 165 V v. 31.10.2006 I 2407.
- ETHERINGTON, J. R. und J. E. RITTER (2007). The 2007 SPE/AAPG/WPC/SPEE Reserves and Resources Classification, Definition and Guidelines: Defining the Standard! Society of Petroleum Engineers' Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, 1. - 3. April 2007.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (1994). Application of Biologically Derived Products as Fuels of Additives in Combustion Engines, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (1997). Getreide, Ölsaaten und Eiweißpflanzen - Lage und Ausblick, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003a). Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003b). Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport. , Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003c). Directive 2003/30/EC, 8 May 2003 on the Promotion of the Use of Biofuels or Other Renewable Fuels for Transport. Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003d). Directive 2003/96/EC of the European Parliament and of the Council on restructuring the Community framework for the taxation of energy products and electricity, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003e). Directive 2003/96/EC, 27 October 2003, Restructuring the Community Framework for the Taxation of Energy Products and Electricity. Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2005a). Commission Urges Luxembourg, Italy, Portugal and Slovakia to Implement Biofuels Directive, Press Release, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2005b). EU Biomass Action Plan, Final Draft, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006a). Biomass Electricity - Technical Development Status, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006b). Commission Urges New Drive to Boost Production of Biofuels, Press Release, Brüssel.

- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006c). Communication from the Commission - An EU Strategy for Biofuels, Com(2006)34final, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006d). An EU Strategy for Biofuels, Final Draft, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006e). Geänderter Beschluss 1982/2006/EG des Parlaments und des Rates vom 28. Juni 2006 über das siebte Rahmenprogramm der Europäischen Gemeinschaft für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration (2007-2013), KOM(2006) 364 2008/C 186/06, Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006f). Green Paper: A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy. Brüssel.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2008). 2008/C 186/06 Mitteilung der Kommission an alle Landwirte betreffend die Abschaffung der Flächenstilllegungsregelung ab 2009. Amtsblatt der Europäischen Union vom 23.7.2008.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2009). Draft Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - 7 Measures for 2 Million New EU Jobs: A Low Carbon Eco Efficient & Cleaner Economy for European Citizens, Brüssel.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT (EUROPÄISCHES PARLAMENT GENERALDIREKTION INTERNE POLITIKBEREICHE DER UNION) (2005). Die Förderung von Industriepflanzen - Studie für das Fachreferat Struktur- und Kohäsionspolitik, Landwirtschaft und Ländliche Entwicklung, Brüssel.
- F.O. LICHT (2006). Ethanol: World Production by Country. World Ethanol and Biofuels Report, 4 (17): S. 395.
- F.O. LICHT (2008). World Biodiesel Markets - The Outlook to 2010.
- FAHL, U., E. LÄGE, W. RÜFFLER, P. SCHAUMANN, C. BÖHRINGER, R. KRÜGER und A. VOß (1995). Emissionsminderungen von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg. Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 21.
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) (2009). World Food Situation - Food Price Indices, <http://www.fao.org/worldfoodsituation/FoodPricesIndex/en/>.
- FARRELL, A. E., R. J. PLEVIN, B. T. TURNER, A. D. JONES, M. O'HARE und D. M. KAMMEN (2006). Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science, 27. Januar: S. 27-29.
- FAUCHEUX, S. und J.-F. NOËL (2001). Ökonomie natürlicher Ressourcen und der Umwelt. Marburg.
- FELS, G. und K.-D. SCHMIDT, Eds. (1984). Im Anpassungsprozeß zurückgeworfen - Die deutsche Wirtschaft vor neuen Herausforderungen. Kieler Studien Nr. 185. Tübingen.
- FFU (FORSCHUNGSSTELLE FÜR UMWELTPOLITIK) (2007). Zukünftiger Ausbau erneuerbarer Energieträger unter besonderer Berücksichtigung der Bundesländer. Endbericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- FISCHER, C. und R. LAXMINARAYAN (2005). Sequential development and exploitation of an exhaustible resource: do monopoly rights promote conservation? Journal of Environmental Economics and Management, 49 (3): S. 500-515.
- FISHER, A. C. (1981). Resource and environmental economics. Cambridge.

- FLAIG, H. und H. MOHR (1993). Energie aus Biomasse. Berlin und Heidelberg.
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2008a). BtL: Synthetische Kraftstoffe aus Biomasse, <http://www.bio-kraftstoffe.info/cms35/Biomass-to-Liquid-BtL.974.0.html>.
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2008b). Entwicklungsstand, <http://www.btl-plattform.de/cms35/Entwicklungsstand.733.0.html>.
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2008c). Herstellungsprozess BtL Kraftstoff, <http://www.btl-plattform.de/cms35/Herstellung.741.0.html>.
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2008d). Primärkraftstoffverbrauch Deutschland 2007, [http://www.bio-kraftstoffe.info/cms35/fileadmin/fnr/images/daten-und-fakten/Abb29\\_2008\\_cmyk300.zip](http://www.bio-kraftstoffe.info/cms35/fileadmin/fnr/images/daten-und-fakten/Abb29_2008_cmyk300.zip).
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2009a). Besteuerung von Biokraftstoffen, <http://www.btl-plattform.de/cms35/Rahmenbedingungen.762.0.html>.
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2009b). Eigenverbrauchsanlagen, <http://www.bio-kraftstoffe.info/cms35/Eigenverbrauchstankste.245.0.html>.
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2009c). Förderprogramme des Bundes, [http://www.biokraftstoff-portal.de/data/File/nova/Sonstiges/Foerderprogramme\\_des\\_Bundes\\_09.07.2008.pdf](http://www.biokraftstoff-portal.de/data/File/nova/Sonstiges/Foerderprogramme_des_Bundes_09.07.2008.pdf).
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2009d). Kapazitäten, Produktion und Absatz Biodiesel in Deutschland, Persönliche Kommunikation.
- FNR (FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2009e). Tankstellenpreise für Diesel und Biodiesel in Deutschland 2007-2008, Persönliche Kommunikation.
- FOLKERS, C. und F. BROCKS (1999). Gutachten zur ökonomischen Bewertung von Rapsöl/Rapsölmethylester (RME) gegenüber Dieselkraftstoff. In: Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff, Texte 79/99, UMWELT-BUNDESAMT (Hrsg.). Berlin.
- FRANK, R. H. (2005). Microeconomics and behavior. New York.
- G20 (2008). Work Program Brazil 2008, [http://www.g20.org/Documents/work\\_program\\_brazil2008.pdf](http://www.g20.org/Documents/work_program_brazil2008.pdf).
- GAUDET, G. und P. LASSERRE (1986). On Comparing Monopoly and Competition in Exhaustible Resource Exploitation.
- GENERAL MOTORS (2002). GM Well-to-Wheel analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study. . Ottobrunn.
- GEROSKI, P. A. (1999). Models of Technology Diffusion. Centre for Economic Policy Research, Discussion Paper No. 2146.
- GEROSKI, P. A. (2000). Models of technology diffusion. Research Policy, 29 (4-5): S. 603-625.
- GILBERT, R. J. (1978). Dominant Firm Pricing Policy in a Market for an Exhaustible Resource. The Bell Journal of Economics, 9 (2): S. 385-395.
- GOLDEMBERG, J., S. T. COELHO und P. GUARABASSI (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. Energy Policy, 35 (6): S. 2086-2097.

- GORDON, R. L. (1966). Conservation and the Theory of Exhaustible Resources. *The Canadian Journal of Economics and Political Science*, 32 (3): S. 319-326.
- GORDON, R. L. (1967). A Reinterpretation of the Pure Theory of Exhaustion. *The Journal of Political Economy*, 75 (3): S. 274-286.
- GOTTWALD, D. (1981). Die dynamische Theorie der Allokation erschöpfbarer Ressourcen: Eine Kontroll- und spieltheoretische Analyse unter besonderer Berücksichtigung mehrstufiger Entscheidungsprozesse. Göttingen.
- GOVER, M. P., S. A. COLLINGS und G. S. HITCHCOCK (1996). Alternative Road Transport Fuels - A Preliminary Life-cycle Study for the UK. A study co-funded by the Department of Trade and Industry and the Department of Transport.
- GRAHAM, D. und S. GLAISTER (2002). Review of income and price elasticities of demand for road traffic. (Hrsg.). London, Centre for Transportation Studies.
- GREENER INDUSTRY. (2008). "Ethanol - Annual Production." from <http://www.greener-industry.org/index.htm>.
- GRÖBNER, B. F. (1983). Subventionen: Eine kritische Analyse. Göttingen.
- GUDERJAHN, L. (2005). Bioethanol - Konzept der Südzucker. FNR-Kongress "Bioethanol als Kraftstoff", 2. Mai 2005, Bonn.
- HALTER, A. N., H. O. CARTER und J. G. HOCKING (1957). A Note on the Transcendental Production Function. *Journal of Farm Economics*, 39 (4): S. 966-974.
- HANLY, M., J. DARGAY und P. GOODWIN (2002). Review of price elasticities in the demand for road traffic. London.
- HARTWICK, J. M. und N. D. OLEWILER (1998). The economics of natural resource use. New York.
- HAUK, P. (2006). Nachwachsende Rohstoffe durch Forschung weiter fördern und ausbauen. In: Pressemitteilung 421/2006, Minister Peter Hauk (MdB), MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LÄNDLICHEN RAUM BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.).
- HEAL, G. (1976). The Relationship between Price and Extraction Cost for a Resource with a Backstop Technology. *The Bell Journal of Economics*, 7 (2): S. 371-378.
- HENKE, J. M. und G. KLEPPER (2006). Biokraftstoffe: Königsweg für Klimaschutz, profitable Landwirtschaft und sichere Energieversorgung? Kieler Diskussionsbeiträge.
- HENNIGES, O. (2007). Die Bioethanolproduktion - Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland unter Berücksichtigung der internationalen Konkurrenz. Lohmar - Köln.
- HENTRICH, S., J. WIEMERS und J. RAGNITZ (2004). Beschäftigungseffekte durch den Ausbau erneuerbarer Energien. IWH Sonderheft
- HERFINDAHL, O. C. (1967). Depletion and Economic Theory. In: *Extractive Resources and Taxation*, M. GAFFNEY (Hrsg.). Madison, 63-90.
- HESTENES, M. R. (1950). A General Problem in the Calculus of Variations with Applications to Paths of Least Time.
- HESTENES, M. R. (1965). On Variational Theory and Optimal Control Theory. *SIAM Journal on Control*, 3 (1).

- HINTEMANN, R., Ed. (2000). Die Diffusion umweltfreundlicher und hochwertiger Gebrauchsgüter - dargestellt am Beispiel des 3-Liter-Autos. Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft. Frankfurt am Main.
- HOEL, M. (1978a). Resource extraction under some alternative market structures. Meisenheim am Glan.
- HOEL, M. (1978b). Resource extraction, Substitute Production, and Monopoly. *Journal of Economic Theory*, 19 (1): S. 28-37.
- HOTELLING, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *The Journal of Political Economy*, 39 (2): S. 137-175.
- HUNG, N. M. und N. V. QUYEN (1989). On R&D Timing Under Uncertainty: The Case of Exhaustible Resource Substitution.
- HUNTINGTON, H. G. und S. P. A. BROWN (2004). Energy security and global climate change mitigation. *Energy Policy*, 32: S. 715-718.
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA) (2009). *Estatística*, [http://www.ibge.gov.br/servidor\\_arquivos\\_est/](http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_est/).
- ICE (INTERCONTINENTAL EXCHANGE) (2009). Product Details Canola, <https://www.theice.com/productguide/ProductDetails.shtml?specId=251>.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (1988-2009). *World Oil Supply and Demand. Monthly Oil Market Report*, <http://omrpublic.iea.org>.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (2005). *Resources to Reserves, Oil and Gas Technologies for the Energy Markets of the Future*, Paris, IEA/OECD.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) (2008). *From 1st- to 2nd-Generation Biofuel Technologies - An overview of current industry and RD&D activities*.
- IEA/OECD (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY UND ORGANISATION OF THE PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES) (2008). *World Energy Outlook*, Paris, IEA PUBLICATIONS.
- IMF (INTERNATIONAL MONETARY FUND) (2009). *IMF Exchange Rates*, <http://www.imf.org/external/np/fin/ert/GUI/Pages/ReportData.aspx?Type=Excel>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, I. (2002). *Renewables in global energy supply. An IEA Fact Sheet*. Paris.
- IOFFE, A. D. und V. M. TICHOMIROV (1979). *Theorie der Extremalaufgaben*. Berlin.
- ITAS (2006). *Biogene Kraftstoffe - Kraftstoffe der Zukunft? Sonderdruck des Themenschwerpunkts Heft Nr. 1, 15. Jahrgang (April 2006) der Zeitschrift "Technikfolgeabschätzung - Theorie und Praxis"*.
- JOHANSSON, D. (2000). *Renewable Raw Materials - a way to reduce greenhouse gas emissions for the EU industry?*
- JOHANSSON, D. J. A. und C. AZAR (2006). *A scenario based analysis of land competition between food and bioenergy production in the US*.
- JUNGMEIER, G., S. HAUSBERGER und L. CANELLA (2003). *Treibhausgasemissionen und Kosten von Transportsystemen - Vergleich von biogenen mit fossilen Treibstoffen*. Graz.

- KAAS, K. P. (1973a). Diffusion und Marketing - Das Konsumentenverhalten bei der Einführung neuer Produkte. Stuttgart.
- KAAS, K. P. (1973b). Diffusion und Marketing: das Konsumentenverhalten bei der Einführung neuer Produkte.
- KALTNER, F. J. (2005). Liquid Biofuels for Transportation in Brazil: Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century. Rio de Janeiro.
- KALTNER, F. J., G. F. P. AZEVEDO, I. A. CAMPOS und A. O. F. MUNDIM (2005). Liquid Biofuels for Transportation in Brazil - Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy for the 21st Century.
- KALTSCHMITT, M. und H. HARTMANN (2001). Energie aus Biomasse. Berlin.
- KALTSCHMITT, M. und G. REINHARDT (1997). Nachwachsende Energieträger. Wiesbaden.
- KALTSCHMITT, M. und A. WIESE (1992). Technical potentials of a bioenergy production in a bundesland in the federal republic of germany. *Bioass & Bioenergy*, 31 (5): S. 309-317.
- KALYMON, B. A. (1975). Economic incentives in OPEC oil pricing policy. *Journal of Development Economics*, 2 (4): S. 337-362.
- KAMIEN, M. I. und N. L. SCHWARTZ (1980). Dynamic optimization: the calculus of variations and optimal control in economics and management.
- KANEMOTO, Y. (1980). Theories of urban externalities.
- KARSHENAS, M. und P. L. STONEMAN (1993). Rank, stock, order, and epidemic effects in the diffusion of new process technologies: An empirical model. *The Rand Journal of Economics*: S. 503-528.
- KATAYAMA, S. und A. FUMIO (1998). Is the monopolist the friend of the conservationist? Two remarks on the Hotelling-Solow paradox. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 33: S. 493-505.
- KAVALOV, B. (2004). Biofuel Potentials in the EU. Report EUR 21012 EN an die Europäische Kommission.
- KAY, J. A. und J. A. MIRRLEES (1975). The Economics of Natural Resource Depletion. *The Economics of Natural Resource Depletion*. London: Macmillan.
- KEMP, R. (1997). Environmental Policy and Technical Change, A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments. Cheltenham.
- KHALATBARI, F. (1976). Planning Uncertainties and Exhaustible Resources. London, London School of Economics.
- KHALATBARI, F. (1977). Market Imperfections and the Optimum Rate of Depletion of Natural Resources. *Economica*, 44 (176): S. 409-414.
- KIM, S. und B. E. DALE (2005). Life Cycle Assessment of Various Cropping Systems utilized for producing Biofuels: Bioethanol and Biodiesel. *Biomass Energy*, 29: S. 426-439.
- KOJIMA, M. und T. JOHNSON (2005). Potential for Biofuels for Transport in Developing Countries. Washington.

- KOOPMANS, T. C., U. YALE und E. COWLES FOUNDATION FOR RESEARCH IN (1973). Some Observations on 'optimal' Economic Growth and Exhaustible Resources. Charles Foundation Discussion Paper, 356.
- KORTMANN, W., Ed. (1994). Diffusion, Marktentwicklung und Wettbewerb. Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft. Frankfurt am Main.
- KRATZAT, M., U. LEHR, J. NITSCH, D. EDLER und C. LUTZ (2007). Erneuerbare Energien: Bruttobeschäftigung 2006. Teilbericht zum Abschlußbericht des Vorhabens „Wirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt – Follow up“.
- KRONENBERG, T. (2006). Should We Worry About The Failure Of The Hotelling Rule? STE Preprint, 25.
- KUULUVAINEN, J. und O. TAHVONEN (1995). The Economics of Natural Resource Utilization. In: Principles of Environmental and Resource Economics: A Guide for Students and Decision Makers, HENK FOLMER und LANDIS H. GABEL (Hrsg.). Cheltenham, Edward Elgar.
- KUUSKRAA, V. A. (2006). "Undeveloped Domestic Oil Resources: The Foundation for Increasing Oil Production and a Viable Domestic Oil Industry." from [www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/publications/eor\\_co2/Undeveloped\\_oil\\_Document.pdf](http://www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/publications/eor_co2/Undeveloped_oil_Document.pdf).
- KYOTO PROTOKOLL (UNITED NATIONS) (1998). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- LAMPE, M. v. (2006). Agricultural market impact of future growth in the production of biofuels. Paris.
- LARIVÉ, J.-F. (2005). The Joint JCR/EUCAR/CONCAWE Well-to-Wheels Study. 4. CONCAWE Symposium, 30.11.2005-1.12.2005.
- LARSON, E. D. (2005). Liquid Biofuel Systems for the Transport Sector: A Background Paper. Global Environment Facility Scientific and Technical Advisory Panel Workshop on Liquid Biofuels. New Delhi.
- LEIBLE, L., S. KÄLBER, E. NIEKE und B. FÜRNIß (2006). Biogene Kraftstoffe - Kraftstoffe der Zukunft? Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis, 15 (1).
- LEPP, B. T. (MERCANTILE CONSULTING) (2009). Hedging Canola Using Futures and Options, <http://www.mcgacanola.org/documents/market-hedging-canola.pdf>.
- LEVELTON (LEVELTON ENGINEERING LTD) (2002). Assessment of Biodiesel and Ethanol Diesel Blends, Greenhouse Gas Emissions, Exhaust Emissions, And Policy Issues, Ottawa.
- LEVY, A. (2000). From Hotelling to Backstop Technology. Working Paper.
- LEVY, R. H. (1993). Les Biocarburants - Bericht an die Französische Regierung. Paris.
- LEWIS, T. R. (1976). Monopoly exploitation of an exhaustible resource. Journal of Environmental Economics and Management, 3: S. 198-204.
- LIPSKY, J. (2008). Commodity Prices and Global Inflation. Council on Foreign Relations, New York, <http://www.imf.org/external/np/speeches/2008/050808.htm>.

- LOIS CORREA, J. A. (2002). Advantages of the production and use of gasohol and biodiesel as a clean, renewable energy resource from sugar cane juice. *Sugar Journal*, 65 (5): S. 18-19.
- MACEDO, I. C., R. LIMA VERDE LEAL und J. SILVA (2004). Assessment of Greenhouse Gas Emissions in the Production and Use of Fuel Ethanol in Brazil. Sao Paulo.
- MANNE, A. S. (1974). Waiting for the Breeder. *The Review of Economic Studies*, 41: S. 47-65.
- MANNING, D. N. (1991). Petrol prices, oil price rises and oil price falls: some evidence for the UK since 1972. *Applied Economics*, 23 (9): S. 1535-1541.
- MARLAND, G. und A. F. TURHOLLOW (1991). CO<sub>2</sub> emissions from the production and combustion of fuel ethanol from corn. *Energy*, 16 (11/12): S. 1307-1316.
- MASUHR, K. P. (1990). Austausch fossiler Energieträger untereinander. In: *Energie und Klima, Band 4: Fossile Energieträger*, ENQUETE-KOMMISSION "VORSORGE ZUM SCHUTZ DER ERDAMOTSPHÄRE" (Hrsg.). Bonn, 323-387.
- MDA (PECUÀRIA E ABASTECIMENTO MINISTÉRIO DA AGRICULTURA) (2009). Estatísticas, <http://www.agricultura.gov.br>.
- MEADOWS, D. H., D. L. MEADOWS, J. RANDERS und W. W. I. BEHRENS (1972). *The Limits of Growth. A Report for The Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York.
- METTLER, D. (1988). *Investitionen, Innovation und Unsicherheit*. Zürich.
- MILLER, J. (2005). Bestimmungübergabe des Technikums des Technologie- und Förderzentrums im Kompetenzzentrum für Nachwuchsende Rohstoffe am 05. Oktober 2005 in Straubing, <http://www.stmlf-design2.bayern.de/publikationen/ministerreden/2005/re10705>.
- MINÖSTG (MINERALÖLSTEUERGESETZ) (1992). Mineralölsteuergesetz vom 21. Dezember 1992 (BGBl. I S. 2150, 2185, 1993 I S. 169, 2000 I S. 147).
- MITCHELL, D. (2008). A Note on Rising Food Prices. The World Bank, Development Prospects Group, Policy Research Working Paper 4682.
- MOREIRA, J. R. und J. GOLDEMBERG (1997). The alcohol program. *Energy Policy*, 27: S. 229-245.
- MOTAAL, D. A. (2008). The biofuels landscape: is there a role for the WTO? *Journal of World Trade*, 42 (1): S. 61-86.
- MWV (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.) (1996). Öl - Rohstoff und Energieträger.
- MWV (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.) (2004). Preisbildung am Rohölmarkt.
- MWV (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.) (2008a). *Produktenpreis Diesel monatlich*, Persönliche Kommunikation.
- MWV (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.) (2008b). *Produktenpreis Diesel wöchentlich*, Persönliche Kommunikation.
- MWV (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.) (2009a). *Prognose des Mineralölverbrauchs in Deutschland bis 2025*, <http://www.mwv.de/cms/upload/pdf/statistiken/prognose/Prognose.pdf>.

- MWV (MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.) (2009b). Zusammensetzung des Verbraucherpreises für Dieselkraftstoff, [http://www.mwv.de/cms/front\\_content.php?idcat=14&idart=52](http://www.mwv.de/cms/front_content.php?idcat=14&idart=52).
- NATIONAL ETHANOL VEHICLE COALITION. (kein Datum).
- NEUWAHL, F., A. LÖSCHEL, I. MONGELLI und L. DELGADO (2008). Employment impacts of EU biofuels policy: Combining bottom-up technology information and sectoral market simulations in an input-output framework. *Ecological Economics* 68: S. 447-460.
- NITSCH, J., W. KREWITT, M. NAST, P. VIEBAHN, S. GÄRTNER, M. PEHNT, G. REINHARDT, R. SCHMIDT, A. UHLEIN und C. BARTHEL (2004). Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal: DLR, IFEU, WI.
- NNFCC (THE NATIONAL NON-FOOD CROPS CENTRE) (2005). Die Förderung von Industriepflanzen.
- NORDHAUS, W. D. (1973). The Allocation of Energy Resources. *Brookings Papers on Economic Activity*, 3: S. 529-569.
- NORDHAUS, W. D. (1979). *The Efficient Use of Energy Resources*. London.
- NOVEM/ADL (DUTCH ENERGY AGENCY & ARTHUR D. LITTLE) (1999). Analysis and Evaluation of GAVE Chains, voll-3, Utrecht, GAVE Analysis Programme, December.
- NOVOZYMES UND BBI INTERNATIONAL (2005). *Fuel Ethanol: A Technological Evolution*. Grand Forks.
- O&GJ (2007). Worldwide Look at Reserves and Production. *Oil and Gas Journal*, 105 (48).
- OLSEN, T. E. (1993). Perfect equilibrium timing of a backstop technology - Limit pricing induced by trigger zones. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 17: S. 123-151.
- OPEC (ORGANIZATION OF THE PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES) (2008). *World Oil Outlook*, Wien.
- OTT, A. E. (1992). Klassifikationen des technischen Fortschritts. *WISU*, 12: S. 964-968.
- PAHLKE, G., H. LEONHARDT und M. TRAPPE (2000). Mögliche Umweltbelastungen durch die Nutzung von MTBE als Kraftstoffzusatz in Deutschland und Westeuropa. *Erdöl Erdgas Kohle, Monatszeitschrift der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.*, (10): S. 2-10.
- PARKER, P. M. (1988). *The Effects of Competition on the Diffusion of Innovations*.
- PFAFFENBERGER, W., K. NGUYEN und J. GABRIEL (2003). Ermittlung der Arbeitsplätze und Beschäftigungswirkungen im Bereich erneuerbare Energien. Studie im Auftrag der Hans-Böckler Stiftung.
- PHELPS, E. S. und S. G. WINTER (1970). Optimal price policy under atomistic competition. In: *Microeconomic Foundations of Employment and Inflation Theory*, E. S. PHELPS (Hrsg.). New York, Norton.
- PIMENTEL, D. (1991). Ethanol fuels: Energy security, economics and the environment. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 4: S. 1-13.
- PIMENTEL, D. (2001). The Limits of Biomass Energy. *Encyclopedia of Physical Sciences and Technology*.

- PIMENTEL, D. und T. PATZEK (2005). Ethanol production using corn, switchgrass and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resources Research*, 14 (1): S. 65-76.
- PINDYCK, R. S. und D. L. RUBINFELD (2005). *Mikroökonomie*. 5, München.
- PIRA (PIRA ENERGY GROUP) (2009). European Biodiesel Production Capacity Database, <http://www.pira.com>.
- PITAFI, B., S. PONGKIJVORASIN und J. ROUMASSE (2006). Pricing Resource Extraction with Stock Externalities. Präsentation beim American Agricultural Economics Association Annual Meeting, Long Beach, California, July 23-26, 2006.
- POHLMANN, E.-M. (2000). Entwicklungen auf dem deutschen Spirituosenmarkt 1998. Konsolidierung des Spirituosenmarktes nicht in Sicht? In: *Handbuch für die Brennerei- und Alkoholwirtschaft* (Hrsg.), Balve. 47. Jg.
- POINT CARBON (2009). Japan launches world's first GHG observation satellite.
- POLLAN, M. (2002). When a crop becomes a king, *New York Times*.
- PONTRJAGIN, L. S., V. G. BOLTJANSKIJ, R. V. GAMKRELIDZE und E. F. MISCENKO (1962). *Mathematische Theorie optimaler Prozesse*. München.
- POWELL, S. G. und S. S. OREN (1989). The Transition to Nondepletable Energy: Social Planning and Market Models of Capacity Expansion. *Operations Research*, 37 (3): S. 373-383.
- QUIRIN, M., S. O. GÄRTNER, M. PEHNT und G. A. REINHARDT (2004a). CO<sub>2</sub> -neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe.
- QUIRIN, M., S. O. GÄRTNER, M. PEHNT und G. A. REINHARDT (2004b). CO<sub>2</sub> Mitigation through Biofuels in the Transport Sector: Status and Perspectives, Main Report. Heidelberg.
- RATHMANN, R., A. SZKLO und R. SCHAEFFER (2009). Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate. *Renewable Energy*, available online.
- REFOCUS (2001). Biomass Energy in Brazil - Past activities and perspectives. *REFOCUS*. Januar/Februar: 26-30.
- REINHARDT, G. (1999). Ressourcen und Energiebilanzen: Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. In: *Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff*, Texte 79/99, UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.). Berlin.
- RFA (RENEWABLE FUEL ASSOCIATION) (2009a). 2007 World fuel ethanol production, <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/#A>.
- RFA (RENEWABLE FUEL ASSOCIATION) (2009b). Annual World Ethanol Production by Country, <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/#A>.
- RFA (RENEWABLE FUEL ASSOCIATION) (2009c). Historic U.S. fuel Ethanol Production, <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/#A>.
- RICHARDS, I. R. (2000). Energy Balances in the Growth of Oilseed Rape for Biodiesel and of Wheat for Bioethanol. Report prepared for the British Association for Bio Fuels and Oils (BABFO), Levington Park Ipswich, Suffolk, UK, Levington Agriculture Ltd, Junde, [www.biodiesel.co.uk/levington.htm](http://www.biodiesel.co.uk/levington.htm).

- RICHTLINIE 98/70/EG (1998).
- RICHTLINIE 2003/30/EG (2003). des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor.
- ROGERS, E. M. (1983). Diffusion of Innovations. 3. Aufl., London.
- ROGERS, E. M. (1995). Diffusion of Innovations. 4. Aufl., London.
- ROSILLO-CALLE, F. und L. A. B. CORTEZ (1998). Towards Proalcool II - A Review of the Brazilian Bioethanol Programme. Biomass and Bioenergy, 14 (2): S. 114-124.
- RUDLOFF, M. (2005). Biomass-to-liquid Fuels (BTL) made by CHOREN. Process, environmental impact and latest developments. Automobile and Environment Belgrade EAEC Congress.
- SAUTER-SERVAES, F. (1982). Über die Ablösung einer erschöpfbaren Ressource durch ihr Substitut. Königstein/Ts.
- SCHARMER, K. und G. GOSSE (1996). Energy Balance, Ecological Impact and Economics of Vegetable Oil Methyl ester Production in Europe as a Substitute for Fossil Diesel. Report commissioned by GET Germany and INRA France, Brüssel, EU ALTENER Programme.
- SCHINDLER, J. (1997). Kraftstoffe für morgen: eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen. Berlin.
- SCHINDLER, J. und W. WEINDORF (2006). Einordnung und Vergleich biogener Kraftstoffe - "Well-to-Wheel"-Betrachtung. In: Biogene Kraftstoffe - Kraftstoffe der Zukunft? Themenschwerpunkt Heft 1/2006 der Zeitschrift "Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis", L. LEIBLE, S. KÄLBER, E. NIEKE und B. FÜRNIß (Hrsg.).
- SCHMALEN (1993). Diffusionsprozesse und Diffusionstheorie. In: Handwörterbuch der Betriebswirtschaftslehre (Hrsg.), Sp. 775-787.
- SCHMALEN, H., F.-M. BINNINGER und H. PECHTL (1993a). Diffusionsmodelle als Entscheidungshilfe zur Planung absatzpolitischer Maßnahmen bei Neuprodukteinführungen. DBW, 53: S. 513-527.
- SCHMALEN, H., F.-M. BINNINGER und H. PECHTL (1993b). Ist die klassische Diffusionsmodellierung wirklich am Ende? Marketing, ZFP, 15 (1): S. 5-11.
- SCHMITZ, N. (2003). Bioethanol in Deutschland. Münster.
- SCHMITZ, N. (2006a). Biokraftstoffe - eine vergleichende Analyse. Gülzow.
- SCHMITZ, N. (2006b). Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow.
- SCHMITZ, N. (2007). Nachwachsende Rohstoffe: Welche Märkte haben Zukunft? Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teilmarkt Biokraftstoffe.
- SCHÖPE, M. und G. BRITSCHKAT (2002). Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Rapsanbaus zur Biodieselproduktion in Deutschland. ifo-Schnelldienst, (6).
- SCHÜTTEL, C. (2006). Positionen der deutschen Mineralöl- und Automobilunternehmen zu Biokraftstoffen unter spezieller Berücksichtigung einer Beimischung von Bioethanol zu Ottokraftstoffen. . Filderstadt.

- SCOTT, A. (1955). *Natural Resources: The Economics of Conservation*.
- SCOTT, A. D. (1967). *The Theory of the Mine under Conditions of Certainty*. In: *Extractive Resources and Taxation*, M. GAFFNEY (Hrsg.). Madison, WI: University of Wisconsin Press.
- SENN, T. (2003). *Die Produktion von Bioethanol als Treibstoff unter dem Aspekt der Energie-, Kosten- und Ökobilanz*. Fachtagung "Regenerative Kraftstoffe", Universität Hohenheim, 13.-14. November 2003, Institut für Lebensmitteltechnologie, Fachrichtung Gärungstechnologie mit Forschungs- und Lehrbrennerei.
- SHEEHAN, J. (1998). *An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles*.
- SIMS, R. E. H., H.-H. ROGNER und K. GREGORY (2003). *Carbon Emission and Mitigation Cost Comparison Between Fossil Fuel, Nuclear and Renewable Energy Sources for Electricity Generation*. *Energy Policy*, 31 (13): S. 1315-1326.
- SINN, H.-W. (1981). *The theory of exhaustible resources*. *Journal of Economics*, 41 (1): S. 183-192.
- SMEETS, E., M. JUNGINGER, A. FAJJI, A. WALTER, P. DOLZAN und W. TURKENBURG (2008). *The sustainability of Brazilian ethanol - An assessment of the possibilities of certified production*. *Biomass and Bioenergy*, 32 (8): S. 781-813.
- SMULDERS, S. (1995). *Environmental policy and sustainable economic growth*. *De Economist*, 143 (2): S. 163-195.
- SOKHANSANJ, S., A. TURHOLLOW, J. CUSMAN und J. CUNDIFF (2002). *Engineering Aspects of collection Corn Stover for Bioenergy*. *Biomass Energy*, 23: S. 347-355.
- SOLOW, R. M. (1974). *The Economics of Resources or the Resources of Economics*. *The American Economic Review*, 64 (2): S. 1-14.
- SPE. (2007). "The Petroleum Resources Management System." Retrieved 03.09.2008, from [www.spe.org/spe-site/spe/spe/industry/reserves/Petroleum\\_Resources\\_Management\\_System\\_2007.pdf](http://www.spe.org/spe-site/spe/spe/industry/reserves/Petroleum_Resources_Management_System_2007.pdf).
- SRAFFA, P. (1926). *The Laws of Returns under Competitive Conditions*. *The Economic Journal*, 36 (144): S. 535-550.
- STAHLCKER, P., N. HAUENSCHILD und M. KLINTWORTH (2003). *Optimierung und ökonomische Analyse*. Berlin.
- STAIB, F., M. KRATZAT, J. NITSCH, U. LEHR, D. EDLER und C. LUTZ (2006). *Erneuerbare Energien: Arbeitsplatzeffekte - Wirkung des Ausbaus erneuerbarer Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt*. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2007). *Energiesteuer Monatsmeldungen 2007, Abschnitt II: Energieerzeugnisse (ohne Heizstoffe)*, VI D / 37343100.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2008). *Energiesteuer Monatsmeldungen 2008, Abschnitt II: Energieerzeugnisse (ohne Heizstoffe)*, VI D / 37343100.
- STERN, D. I. und C. J. CLEVELAND (2004). *Energy and Economic Growth*. *Rensselaer Working Papers in Economics*, 410.
- STERN, N. (2006). *Stern Review: The Economics of Climate Change*. London.

- STIGLITZ, J. E. (1976). Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources. *The American Economic Review*, 66 (4): S. 655-661.
- STIGLITZ, J. E. und P. DASGUPTA (1982). Market Structure and Resource Depletion: A Contribution to the Theory of Intertemporal Monopolistic Competition. *Journal of Economic Theory*, 28: S. 128-164.
- STIGLITZ, J. E., R. J. GILBERT und P. DASGUPTA (1982). Invention and Innovation Under Alternative Market Structures: The Case of Natural Resources. *The Review of Economic Studies*, 49 (4): S. 567-582.
- STREIT, M. (1991). *Theorie der Wirtschaftspolitik*. 4, Düsseldorf.
- SWEENEY, J. L. (1993). Economic Theory of Depletable Resources: An Introduction. *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, III: S. 759-854.
- TAHVONEN, O. (1997). Fossil Fuels, Stock Externalities, and Backstop Technology. *The Canadian Journal of Economics*, 30 (4a): S. 855-874.
- TAKAYAMA, A. (1985). *Mathematical Economics*.
- TAMERS, M. (2006). "Distinguishing between 'Bioethanol' and Petroleum Ethanol." from [http://ethanolproducer.com/article-print-jsp?article\\_id=2077](http://ethanolproducer.com/article-print-jsp?article_id=2077).
- TFZ (TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE) (2005). Neues Technikum für Straubinger Kompetenzzentrum. Pressemitteilung Az. 0121-2005-015, [http://www.tfz.bayern.de/sonstiges/31924/pm\\_20051005\\_einweihung\\_technikum\\_15.pdf](http://www.tfz.bayern.de/sonstiges/31924/pm_20051005_einweihung_technikum_15.pdf).
- THE ECONOMIST (2003). Interview with Sheikh Zaki Yamani, 23. Oktober.
- THRÄHN, D., M. WEBER, A. SCHEUERMANN, N. FRÖHLICH, J. ZEDDIES, A. HENZE, C. THOROE, J. SCHWEINLE, U. FRITSCHKE, W. JENSEIT, L. RAUSCH und K. SCHMIDT (2006). Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext.
- TOL, R. S. J., B. GAITAN und I. H. YETKINER (2006). The Hotelling's Rule Revisited in a Dynamic General Equilibrium Model. Working Paper, FNU-44.
- TRIFFIN, R. (1940). *Monopolistic Competition and General Equilibrium Theory*. Cambridge.
- TURPIN, N., P. DUPRAZ, C. THENAIL, A. JOANNON, J. BAUDRY und H. S. (2009). Shaping the landscape: agricultural policies and local biodiversity schemes. *Land Use Policy* 26 (2): S. 273-283.
- TZIMAS, V., A. GEORGAKAKI, G. GARCIA CORTES und S. PETEVES. (2005). "EOR Using CO2 in the European Energy System." from [www.ie.jrc.ec.europa.eu/publications/scientific\\_publications/2005/EUR21895EN.pdf](http://www.ie.jrc.ec.europa.eu/publications/scientific_publications/2005/EUR21895EN.pdf).
- UBA (UMWELTBUNDESAMT) (2008). Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2006, Dessau.
- UFOP (UNION ZUR FÖRDERUNG VON ÖL- UND PROTEINPFLANZEN E. V.) (2006). UFOP Bericht 2005/2006, [http://www.ufop.de/downloads/UFOP\\_Bericht\\_06.pdf](http://www.ufop.de/downloads/UFOP_Bericht_06.pdf).
- UFOP (UNION ZUR FÖRDERUNG VON ÖL- UND PROTEINPFLANZEN E. V.) (2007a). UFOP Bericht 2006/2007, [http://www.ufop.de/downloads/UFOP\\_Geschaeftsbericht\\_06\\_07.pdf](http://www.ufop.de/downloads/UFOP_Geschaeftsbericht_06_07.pdf).

- UFOP (UNION ZUR FÖRDERUNG VON ÖL- UND PROTEINPFLANZEN E.V.) (2007b). UFOP Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe, [http://www.ufop.de/publikationen\\_marktinformationen.php](http://www.ufop.de/publikationen_marktinformationen.php).
- UFOP (UNION ZUR FÖRDERUNG VON ÖL- UND PROTEINPFLANZEN E. V.) (2008a). UFOP Bericht 2007/2008, [http://www.ufop.de/downloads/Ufop\\_Bericht\\_07\\_08.pdf](http://www.ufop.de/downloads/Ufop_Bericht_07_08.pdf).
- UFOP (UNION ZUR FÖRDERUNG VON ÖL- UND PROTEINPFLANZEN E.V.) (2008b). UFOP Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe, [http://www.ufop.de/publikationen\\_marktinformationen.php](http://www.ufop.de/publikationen_marktinformationen.php).
- UFOP (UNION ZUR FÖRDERUNG VON ÖL- UND PROTEINPFLANZEN E.V.) (2009). UFOP Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe, [http://www.ufop.de/publikationen\\_marktinformationen.php](http://www.ufop.de/publikationen_marktinformationen.php).
- UN (UNITED NATIONS) (2007). Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers.
- UNF (UNITED NATIONS FOUNDATION) (2006). The United Nations biofuels initiative, New York, [www.unfoundation.org](http://www.unfoundation.org).
- UNFCCC (2008). National Reports.
- ÚNICA (UNIAO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-ACUACAR - SUGARCANE INDUSTRY ASSOCIATION) (2007). Beschäftigung, <http://english.unica.com.br>.
- ÚNICA. (2008a). "Annual Brazilian Ethanol Exports." from [www.unica.com.br/3](http://www.unica.com.br/3).
- ÚNICA (UNIAO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-ACUACAR - SUGARCANE INDUSTRY ASSOCIATION) (2008b). Annual Brazilian Sugar Exports, <http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/eng/SUGAR%20EXPORTS%20-%20ANNUAL.xls>.
- ÚNICA (UNIAO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-ACUACAR - SUGARCANE INDUSTRY ASSOCIATION) (2008c). Vehicle Sales in Brazil, [www.unica.com.br/vehicle\\_sales](http://www.unica.com.br/vehicle_sales).
- ÚNICA (UNIAO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-ACUACAR - SUGARCANE INDUSTRY ASSOCIATION) (2009a). Ethanol Production - Brazil, <http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/eng/BRAZILIAN%20ETHANOL%20PRODUCTION.xls>.
- ÚNICA (UNIAO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-ACUACAR - SUGARCANE INDUSTRY ASSOCIATION) (2009b). Sugar Production - Brazil, <http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/eng/BRAZILIAN%20SUGAR%20PRODUCTION.xls>.
- ÚNICA (UNIAO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-ACUACAR - SUGARCANE INDUSTRY ASSOCIATION) (2009c). Sugarcane Production - Brazil, <http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/eng/BRAZILIAN%20SUGARCANE%20PRODUCTION.xls>.
- USDA (USDA FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE) (2009). GAIN Report, [http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Commodity%20Report\\_EU-27%20OILSEEDS%20\\_Berlin\\_Germany%20EU-27\\_4-30-2009.pdf](http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Commodity%20Report_EU-27%20OILSEEDS%20_Berlin_Germany%20EU-27_4-30-2009.pdf).
- USTG (USTG UMSATZSTEUERGESETZ) (2005). Umsatzsteuergesetz 2005 in der Fassung vom 21.02.2005 (BGBl. 2005 I S. 386, BStBl 2005 I S. 505).

- VALERIA, C., G. FRANCESCO, M. ANIL und V. GIORGIO (2007). Security of energy supply: Comparing scenarios from a European perspective. *Energy Policy*, *Energy Policy*: S. 210–226.
- VAN WYK, R. L. (1984). Panoramic Scanning and the Technological Environment. *Technovation*, 2: S. 101-120.
- VAN ZON, A. und I. H. YETKINER (2001). An Endogenous Growth Model à la Romer with Embodied Energy-saving Technological Change.
- VARIAN, H. R. (2007). *Grundzüge der Mikroökonomik*. München.
- VOß, A. (1991). Energie und Klima: Ist eine klimaverträgliche Energieversorgung erreichbar? In: *Energie, Umwelt und Klima - Eine wachsende Herausforderung für Europa*, P. SCHUMANN und A. VOß (Hrsg.). Köln, S. 70-99.
- WAGNER, U. und O. BRÜCKL (2003). Erneuerbare Energien und die Zukunft der deutschen Energieversorgung. VRE Symposium "Erneuerbare Energien zwischen Anspruch und Machbarkeit", Berlin, 16. Oktober 2003.
- WALLACE, R. (2005). *Feasibility Study for Co-Locating and Integrating Ethanol Production Plants from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*. Washington.
- WALTER, A., F. ROSILLO-CALLE, P. DOLZAN, E. PIACENTE und K. B. D. CUNHA (2008). Perspectives on fuel ethanol consumption and trade. *Biomass and Bioenergy*, 32: S. 730-748.
- WALTER, U. (1985). Strukturwirkungen des technischen Fortschritts - grundlegende und intersektorale Aspekte. In: *Innovationen im Verkehr*, Heft 104 der Beiträge aus dem Institut für Verkehrswissenschaften an der Universität Münster, H.S. SEIDENFUS (Hrsg.). Göttingen 7-78.
- WALTERA, A., F. ROSILLO-CALLEB, P. DOLZANA, E. PIACENTEA und K. B. DA CUNHAA (2008). Perspectives on fuel ethanol consumption and trade. *Biomass and Bioenergy*, 32: S. 730-748.
- WANG, M. (2001). Greet Model Version 1.5a (die Berechnungen wurden vom Worldwatch Institute in Absprache mit dem Autor durchgeführt: Worldwatch Institute (2005:180)).
- WANG, M., C. SARICKS und D. SANTINI (1999). Effects of Fuel Ethanol on Fuel-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emissions. Argonne, Center for Transportation Research, Januar.
- WATANABE, M., J. GOMES und H. DEWES (2007). Sugarcane-induced changes in the land use in the Parana´ State Brazil. VI international Pensa conference, Ribeirão Preto.
- WEC (WORLD ENERGY COUNCIL) (2007). *Survey of Energy Resources* London, [www.worldenergy.org.documents/ser2007\\_final\\_online\\_version\\_1.pdf](http://www.worldenergy.org.documents/ser2007_final_online_version_1.pdf).
- WEINSTEIN, M. C. und R. J. ZECKHAUSER (1975). The Optimal Consumption of Depletable Natural Resources. *Quarterly Journal of Economics*, 89: S. 471-477.
- WHEALS, A. E., L. C. BASSO, D. M. G. ALVES und H. V. AMORIM (1999). Fuel ethanol after 25 years. *Tibtech*, 17: S. 482-487.
- WINDHORST, H. W. (2007). The Boom of Bioenergy Production - A Threat to the Global Poultry Meat Industry? *World's Poultry Science Journal*, Cambridge University Press, 63: S. 365-379.

- WIRL, F. (1991). (Monopolistic) Resource Extraction and Limit Pricing: The Market Penetration of Competitively Produced Synfuels. *Environmental and Resource Economics*, 1: S. 157-178.
- WOODS, J., A. BAUEN, I. DEPT. OF TRADE AND, D. T. I. NEW, R. E. PROGRAMME und G. BRITAIN (2003). *Technology Status Review and Carbon Abatement Potential of Renewable Transport Fuels in the UK*.
- WORLDWATCH INSTITUTE (2007). *Biofuels for transport: global potential and implications for energy and agriculture*. London.
- WUPPERTAL INSTITUT (2005). *Synopsis of German and European Experience and State of the Art of Biofuels for Transport*. Im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Wuppertal.
- ZEDDIES, J. (2006a). *Nachwachsende Rohstoffe für den Energiesektor*. In: *Alternative Strategien für die Landwirtschaft*, I. DARNHOFER, C. WALLA und H.K. WYTRZENS (Hrsg.). Wien, Facultas, 123-134.
- ZEDDIES, J. (2006b). *Rohstoffverfügbarkeit für die Produktion von Biokraftstoffen in Deutschland und in der EU-25*. *Agrarökonomische Forschung*, Forschungsbericht 6/2006.
- ZELLNER, A. und N. S. REVANKAR (1969). *Generalized Production Functions*. *The Review of Economic Studies*, 36 (2): S. 241-250.
- ZMP (ZENTRALE MARKT- UND PREISBERICHTSSTELLE GMBH) (2008a). *Durchschnittliche wöchentliche Börsennotierungen für Raps 2001-2008*, Persönliche Kommunikation.
- ZMP (ZENTRALE MARKT- UND PREISBERICHTSSTELLE GMBH) (2008b). *Durchschnittliche wöchentliche Börsennotierungen für Rapsschrot 2001-2008*, Persönliche Kommunikation.
- ZMP (ZENTRALE MARKT- UND PREISBERICHTSSTELLE GMBH) (2009). *Verbraucherpreise für Biodiesel und mineralischen Diesel an der Tankstelle in EURcent/l*, Persönliche Kommunikation.