ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Matthes, Felix Christian

Article — Digitized Version

Anmerkungen zu den langfristigen Nutzungsgrenzen fossiler Brennstoffe

Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung

Provided in Cooperation with:
German Institute for Economic Research (DIW Berlin)

Suggested Citation: Matthes, Felix Christian (1999) : Anmerkungen zu den langfristigen Nutzungsgrenzen fossiler Brennstoffe, Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, ISSN 0340-1707, Duncker & Humblot, Berlin, Vol. 68, Iss. 4, pp. 600-613

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/141268

Standard-Nutzungsbedingungen:

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

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

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

Terms of use:

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

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

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

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Anmerkungen zu den langfristigen Nutzungsgrenzen fossiler Brennstoffe

Von Felix Christian Matthes*

Zusammenfassung

Mit der Klimaproblematik steht die mittel- und langfristige Entwicklung der Energiewirtschaft neben den traditionellen Restriktionen durch die Verfügbarkeit fossiler Energierohstoffe auch vor ökologischen Begrenzungen. Die Arbeit untersucht in einem ersten Analyseschritt den aktuellen Diskussionszustand zur Verfügbarkeit von Reserven und Ressourcen für die fossilen Energierohstoffe Öl, Gas und Kohle. In einem zweiten Untersuchungsgang wird der Forschungsstand zu den aus der Klimaproblematik entstehenden Emissionsbegrenzungen in ihrer mengenmäßigen und zeitlichen Dimension dargestellt. Auf dieser Grundlage werden die Verfügbarkeitsgrenzen und die ökologischen Einsatzgrenzen für fossile Energierohstoffe miteinander verglichen. Über eine zusätzliche Analyse der Trends und der Strukturen von Klimagasemissionen in den Industriestaaten wird in einem abschließenden Schritt versucht, die Rolle der energiebedingten Kohlendioxidemissionen im Gesamtkontext der Klimaproblematik detaillierter herauszuarbeiten.

1. Einleitung

Die Energiewirtschaft ist durch einen äußerst kapitalintensiven und langlebigen Kapitalstock sowie einen erheblichen Vorlauf bei der Erschließung neuer Rohstoffe gekennzeichnet. Vor allem aus diesen beiden Gründen werden traditionell mittel- und langfristige Projektionen des Energiebedarfs und seiner Deckung erstellt, in denen die mengenmäßigen und zeitlichen Restriktionen für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems identifiziert und abgebildet werden. Als besonders relevanter Verursachersektor hinsichtlich ökologischer Probleme wird die Energiewirtschaft jedoch in zunehmendem Maße umweltpolitischen Restriktionen unterworfen. Die hier vorliegende Arbeit unternimmt den Versuch, mit der Verfügbarkeit fossiler Energierohstoffe und den ökologischen Restriktionen zwei der wichtigsten Restriktionen für die mittel- und langfristige Entwicklung der Energiewirtschaft in Beziehung zu setzen.

Dazu werden zunächst aktuelle Überblicksarbeiten zur Reserven- und Ressourcensituation vergleichend zusammengefaßt. In einem zweiten Schritt werden die sich aus der derzeitigen Klimafolgenforschung ergebenden Restriktionen für die Verbrennung fossiler Brennstoffe abgeleitet, mit der Reserven- bzw. Ressourcensituation verglichen und erste Schlußfolgerungen abgeleitet. In einem letzten Schritt wird versucht, die Rolle der energiebedingten Kohlendioxidemissionen und deren aktuelle Trends auf der Grundlage von detaillierten Treibhausgasinventaren für die Industriestaaten näher zu bestimmen.

2. Reserven- und Ressourcenverfügbarkeit fossiler Brennstoffe

Für die langfristige Entwicklung der Energiewirtschaft bildet die Verfügbarkeit der heute dominierenden Energieträger eine wichtige Rahmenbedingung. Im Rahmen der hier vorliegenden Analyse wird auf zwei Überblicksarbeiten zur Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe zurückgegriffen, die jeweils aus unterschiedlichen Perspektiven den entsprechenden Forschungsstand aufarbeiten.[1] Beide Arbeiten behandeln neben den im folgenden betrachteten weltweit aggregierten Daten auch die regionale Dimension der Reserven und Ressourcen, die hier jedoch nicht weiter berücksichtigt wird. Hinsichtlich der Terminologie für den Bereich Reserven und Ressourcen wird weitgehend auf die Definitionen der BGR (1998) zurückgegriffen:

* Dr. Felix Christian Matthes, Öko-Institut, Novalisstraße 10, D-10115 Berlin; e-mail: *matthes@oeko.de*

[1] BGR (1998); Gregory und Rogner (1998).

- Die *Reserven* sind dabei der Teil der Gesamtressourcen fossiler Brennstoffe, die nachgewiesen und erfaßt sind sowie unter den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können.
- Die *Ressourcen* bezeichnen hier den Teil der Gesamtressourcen, der noch unentdeckt ist, für deren Gewinnung wesentliche technologische Fortschritte gemacht werden müßten bzw. die bei heutigen Preisniveaus nicht wirtschaftlich gewinnbar sind.
- Das *Gesamtpotential* fossiler Brennstoffe ergibt sich als die Summe aus der bisherigen kumulierten Förderung, der Reserven und der Ressourcen. Für den Bereich der Kohlenwasserstoffe wird synonym auch die Kategorie *Estimated Ultimate Recovery (EUR)* gebraucht.
- Als Depletion Mid-point (DMP) für die Reserven wird der Zeitpunkt bezeichnet, an dem die bisherige kumulierte Förderung zuzüglich der Reserven zur Hälfte genutzt sein wird.

Im folgenden kann und soll nicht auf die bei den verschiedenen Energieträgern sehr differenzierten Diskussionen zu den methodischen Verfahren und Grenzen einer Reserven- und Ressourcenbewertung eingegangen werden. Das Ziel der nachstehenden Ausführungen soll *allein* dazu dienen, einen groben Überblick zu schaffen.

Erdöl

Konventionelles Erdöl ist heute der meistgenutzte fossile Energieträger. 1998 wurden weltweit insgesamt 142 Exajoule (EJ) überwiegend zur Verbrennung genutzt. Aus historischer Sicht wurden seit Beginn der Industrialisierung etwa 4.390 EJ Erdöl gefördert und verbrannt. Die zukünftige Entwicklung ohne signifikante umweltpolitische Kurskorrekturen kann exemplarisch in Anlehnung an das Szenario B ("middle course") von IIASA/WEC (1998) illustriert werden, in dem für das Jahr 2050 ein weltweiter Erdölverbrauch von ca. 188 EJ erwartet wird.

Die verschiedenen Angaben zu den *Reserven* für konventionelles Erdöl weisen zwar eine gewisse Streubreite auf, sind jedoch in den Niveaus durchaus gut vergleichbar. Die BGR berichtet hier zum Stand Ende 1997 Angaben zwischen 132,5 und 151,4 Milliarden Tonnen (Mrd. t) Öl und hält den letztgenannten (höchsten) Wert, der ca. 5984 EJ entspricht, für die beste Schätzung. Eine ähnliche Bewertung nehmen Gregory und Rogner (1998) vor, die Schätzungen von 5908 bzw. 6299 EJ für die belastbarsten Größen halten. Beide Schätzungen korrespondieren — auch unter Berücksichtigung der verschiedenen Schätzzeitpunkte — relativ gut mit der jüngsten Angabe von BP Amoco (1999) in Höhe von etwa 6000 EJ.

Deutlich höhere Unsicherheiten und damit Spannbreiten ergeben sich bei den verschiedenen Angaben zu den *Ressourcen* an konventionellem Öl. Die BGR zeigt hier ein Spektrum der Schätzungen von 64 bis 121 Mrd. t und unterstellt eine Größenordnung von 75,6 Mrd. t, entsprechend 3320 EJ. Gregory und Rogner beziehen sich vor allem auf eine Arbeit von Masters et al. (1994), in der mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% Ressourcen von insgesamt 1.608 PJ angegeben werden, die für geringe Wahrscheinlichkeiten (50 und 5%) jedoch mit 2626 bzw. 5885 EJ noch deutlich größere Ressourcen referiert.

Unter *unkonventionelle Ölvorkommen* werden Schweröl, Ölsand und Schwerstöl sowie Ölschiefer gefaßt. Eine kommerzielle Förderung von unkonventionellem Öl erfolgt heute jedoch nur für Schweröl in nennenswertem Umfang (v.a. Venezuela, USA, Irak und Kanada). Andere unkonventionellen Ölvorkommen werden nur in vergleichsweise kleinem Umfang genutzt: für Ölsande und Schwerstöl vor allem in Kanada sowie für Ölschiefer in Estland und China. Die *Reserven* gibt die BGR hier mit etwa 33 Mrd. t für Schweröl, ca. 100 Mrd. t für Ölsand und Schwerstöl sowie äußerst geringe Mengen für Ölschiefer (40 EJ) an, die insgesamt 5889 EJ entsprechen. Gregory und Rogner diskutieren für die Reserven unkonventionellen Öls eine Größenordnung von ca. 7100 EJ, wobei in diesem Zusammenhang auf die hinsichtlich der Gewinnungskosten komplizierte Abgrenzung zwischen Reserven und Ressourcen hinzuweisen ist.[2]

Die *Ressourcen* liegen für den Fall *unkonventionellen Öls* deutlich über den Reserven. Die BGR gibt hier für Schweröl einen Wert von ca. 77 Mrd. t (3.390 EJ) an, Gregory und Rogner beziffern deren Wert — allerdings unter Rückgriff auf eine Angabe von 1987 — auf 3261 EJ. Für Ölsand bzw. Schwerstöl schwanken die Ressourcenschätzungen zwischen 660 EJ bei BGR und 2.490 EJ bei Gregory und Rogner. Die bei weitem größten Ressourcen werden jedoch für Ölschiefer angegeben. Nach BGR betragen diese ca. 482 Mrd. t (21160 EJ), davon werden allerdings 462 Mrd. t als spekulativ charakterisiert, Gregory und Rogner referieren hier noch deutlich höhere Werte.

Erdgas

Nach erheblichen Zuwächsen lag der weltweite Konsum von *Erdgas* 1998 mit 84 EJ nur noch wenig unter

---

[2] Die Abgrenzung ist hier vor allem durch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Förderung determiniert. Die Förderung von Schweröl bildet heute einen Anteil von ca. 8% der gesamten kommerziellen Ölförderung, bei der heute die marginalen Gewinnungskosten bei maximal 10 US-$ je Barrel (bbl) liegen. Für den größten Teil der Vorkommen an Ölsand und Schwerstöl liegen die Gewinnungskosten jedoch mit ca. 20-30 US$/bbl in einer Größenordnung, die bei Neufunden konventioneller Ölvorkommen durchaus erreicht werden kann. Daraus ergibt sich eine äußerst schwierige Abgrenzung zwischen Reserven und Ressourcen. Die Förderkosten für Ölschiefer liegen im Gegensatz dazu bei 50 bis 60 US $/bbl. Dieser Teil der unkonventionellen Ölvorkommen ist so eindeutig den Ressourcen zuzuordnen.

dem weltweiten Kohleverbrauch. Der kumulierte Verbrauch liegt damit bei etwa 2340 EJ. Für die zukünftige Entwicklung wird im Szenario B von IIASA/WEC (1998) eine deutliche Steigerung des weltweiten Verbrauchs erwartet, die für das Jahr 2050 zu einem Niveau von ca. 169 EJ führt.

Die Angaben zum *Reservenstand bei konventionellem Erdgas* liegen sowohl bei der BGR als auch bei Gregory und Rogner (1998) in der Größenordnung von ca. 5300 EJ, was leicht unter dem Niveau der aktuellen Schätzung von BP Amoco (1999) mit 5500 EJ liegt.

Die Schätzungen zu den *Ressourcen konventionellen Erdgases* bewegen sich bei Gregory und Rogner zwischen ca. 9500 EJ (mit 95 % Wahrscheinlichkeit), 12700 EJ (50 %) und 22700 EJ (5 %). Verglichen mit diesen Werten bewegt sich die Angabe der BGR mit 7820 EJ deutlich im unteren Bereich.

Unter *unkonventionellen* fossilen *Erdgasvorkommen* werden Gasvorkommen aus Kohleflözen, aus dichtem Speichergestein, aus Aquiferen, aus Gashydraten sowie aus Tiefenschichten des Erdmantels bezeichnet. Eine Nutzung unkonventionellen Erdgases erfolgt dabei heute nur aus Kohleflözen sowie aus dichten Gesteinen.

Für eine Einordnung als *Reserven* kommt nur die Methangewinnung aus Kohleflözen sowie aus dichten Speichergesteinen in Betracht. Die BGR gibt für Flözgas eine Größenordnung von 69 EJ an, die jedoch mangels belastbarer Daten vor allem die in China und Rußland in Größenordnungen zu vermutenden Reserven ausklammert. Eine entsprechende Hochrechnung der Reserven führt Werten, die um ein Mehrfaches über der von der BGR genannten Größe liegen können. Für Erdgas aus dichtem Speichergestein schätzt die BGR einen Reservenbestand von etwa 45 EJ.

Die *Ressourcen* unkonventionellen Gases liegen deutlich höher, mit Blick auf die Vorkommen sowie die erforderlichen Fördertechnologien und die Gewinnungskosten jedoch ganz überwiegend im spekulativen Bereich. Für Gas aus Kohleflözen und dichtem Speichergestein schätzt die BGR einen Ressourcenstand von 2940 bzw. 3870 EJ. Gregory und Rogner geben hier mit 9702 und 7398 EJ deutlich höhere Werte an, die jedoch zunächst noch nicht berücksichtigen, daß die Lagerstätten keineswegs vollständig ausgebeutet werden können. Unterstellt man einen Ausbeutefaktor von ca. 55 %, so ergeben sich Ressourcenniveaus von ca. 5300 bzw. 4100 EJ.[3] Die größten Ressourcen bei unkonventionellem Erdgas werden zunächst für Gashydrate in Permafrost-Vorkommen auf dem Festland sowie im Offshore-Bereich angegeben. Die BGR schätzt hier Gesamtpotential von etwa 325000 EJ, woraus bei einem Ausbeutefaktor von 30 % (Festland) bzw. 10 % (Offshore) Ressourcen von 53250 EJ errechnet werden. Gregory und Rogner geben das Gesamtpotential mit ca. 983000 EJ an, woraus bei Ansatz eines Ausbeutefaktors von 10 % ein überschlägiges Ressourcenniveau von ca. 100 EJ resultiert. Im Grundwasser gelöste Erdgasvorkommen größeren Umfangs werden weiterhin in der Gesteinskruste der Erde erwartet. In grober Schätzung ermittelte die BGR für diese Erdgas-Ressourcen aus Aquiferen eine Größenordnung von 51860 EJ, wobei die Erschließung dieser Ressourcen in höchstem Maße spekulativ ist.

Kohle

In der historischen Perspektive spielt seit Beginn der Industrialisierung vor allem die *Kohle*verbrennung die wichtigste Rolle. Bis 1998 wurden kumulativ über 5900 EJ gefördert und ganz überwiegend verbrannt. Zu diesem Zeitpunkt war der Anteil der Kohle am weltweiten Verbrauch fossiler Energieträger jedoch bereits deutlich geringer als der von Öl und lag mit 93 EJ nur noch wenig über dem von Erdgas. Für das Jahr 2050 erwarten IIASA/WEC (1998) im Szenario B einen Kohleverbrauch, der mit 173 EJ weiterhin vor dem Erdgaseinsatz liegt.

In Anlehnung an die Schätzungen des Weltenergierates von 1995 geben Gregory und Rogner die *Reserven* für Kohle insgesamt mit 22941 EJ an, davon 15217 EJ für Hartkohle und 7724 EJ für Weichbraunkohle. Die BGR veranschlagt für Hartkohle 14269 EJ und für Weichbraunkohle 2080 EJ und liegt damit in der Summe deutlich unter der aktuellsten Erhebungen von BP Amoco, die für Hartkohle Reserven von etwa 14200 EJ sowie für Weichbraunkohle etwa 6600 EJ ergeben. Damit wird deutlich, daß sich die Differenzen vor allem auf die Einschätzungen der Weichbraunkohlereserven — und hier vor allem auf deren wirtschaftliche Gewinnbarkeit — beschränken.

Die *Ressourcen* für Kohle werden bei BGR mit insgesamt 179023 EJ angegeben. Gregory und Rogner schätzen hier ebenfalls etwa 190.000 EJ, unterstellen aber nur für 14898 EJ die Möglichkeit einer zukünftig technisch-wirtschaftlichen Förderung.

Künftige Entwicklung

Tabelle 1 zeigt den beschriebenen Stand von Reserven und Ressourcen in der Übersicht. Die niedrige Variante für die Ressourcen bezeichnet dabei den unteren Wert der diskutierten Angaben, die hohe Variante ein Gewinnungsniveau, bei dem erstens erhebliche Fortschritte im technologischen Bereich vollzogen bzw. erhebliche höhere Preisniveau erzielt werden müßten und das darüber hinaus ein teilweise erhebliches spekulatives Element

[3] Insbesondere bei der Methangewinnung aus Kohleflözen ist jedoch hinsichtlich der Förderkosten auf die schwierige Abgrenzung zwischen Reserven und Ressourcen hinzuweisen. Möglicherweise könnte ein Teil der hier genannten Ressourcen auch den Reserven zugeordnet werden.

enthält. Unter der Maßgabe der gezeigten Projektion für die zukünftige Entwicklung des Verbrauchs fossiler Energierohstoffe stellt sich die Situation für die gezeigten Energieträger äußerst unterschiedlich dar.

Bei den Reserven an konventionellem *Öl* könnte sich um 2010 der *Depletion Mid-point* (DMP) einstellen, wenn in den nächsten Jahren keine wesentlichen Reservenzugänge mehr erfolgen würden. Schließt man die Reserven der unkonventionellen Ölvorkommen mit ein, so würde der DMP erst um 2030 erreicht. Die statische Reichweite[4] der Ölvorräte würde sich im genannten Szenario für die konventionellen Ölvorräte auf über 40 Jahre bzw. unter Einschluß der unkonventionellen Ölvorkommen auf deutlich über 80 Jahre erstrecken. Unter Berücksichtigung des in der *Business as usual*-Variante zukünftig weiter steigenden Ölverbrauchs verringert sich die Reichweite bis 2050 um ca. 5 Jahre. Bei einer zusätzlichen Berücksichtigung der Ressourcen könnten sich die genannten Reichweiten jedoch noch mehr als verdoppeln.

Für *Erdgas* stellt sich die Situation in Bezug auf die Reserven zunächst durchaus vergleichbar dar. Der DMP könnte hier bei den konventionellen Reserven und bei weiter steigendem Verbrauch im Zeitraum um 2020 erreicht werden. Die statische Reichweite für konventionelles Erdgas, bezogen auf den Verbrauch des Jahres 1998 beläuft sich auf einen Zeitraum von etwa 65 Jahren. Bei Berücksichtigung eines weltweit steigenden Erdgasbedarfes entsprechend dem Szenario B von IIASA/WEC (1998) würde die Reichweite nochüber 50 Jahre betragen. Auch ohne die heute noch sehr spekulativen Erdgasressourcen aus Hydraten oder Aquiferen könnte sich die Reichweite von Erdgas unter Einbeziehung der Ressourcen noch um ein Mehrfaches vergrößern.

Der DMP für die Reserven an *Kohle* würde sich vor dem Hintergrund der gezeigten Verbrauchsprojektion erst zur Hälfte des nächsten Jahrhunderts einstellen. Die statische Reichweite beträgt auf der Basis des Weltkohleverbrauchs von 1998 nahezu 250 Jahre. Selbst eine Berücksichtigung des bei IIASA/WEC (1998) unterstellten starken Anstiegs des Kohleverbrauchs bis zum Jahr 2050 und darüber hinaus ergibt Reichweiten in der Größenordnung von weit über 100 Jahren. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache erscheint die große Spannbreite der Angaben für Kohle-Ressourcen als relativ unerheblich.

Für den Zeitraum der nächsten 30 bis 50 Jahre dürfte vor diesem Hintergrund und bei summarischer Betrachtung die weltweite Versorgung mit den fossilen Energieträgern Öl, Erdgas und Kohle ressourcenbezogen gesichert, aus technischer Sicht relativ unproblematisch und hinsichtlich der Kostenniveaus ohne dramatische Sprünge realisierbar sein. Voraussichtlich erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wäre die Weltenergieversorgung wesentlich von der Erschließung der heute nur als Ressourcen einstufbaren Vorräte abhängig, wäre also unabdingbar verbunden mit neuen Funden, deutlichen technologischen Sprüngen und ggf. signifikant höheren Kosten- bzw. Preisniveaus.

3. Ökologische Restriktionen des Einsatzes fossiler Brennstoffe

3.1 Klimaproblematik und ihre erwarteten Auswirkungen

Nachdem sich die Situation hinsichtlich der Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe als zumindest kurz- und mittelfri-

[4] Die Aussagekraft der Kenngröße „statische Reichweite" als Quotient aus dem Umfang der Reserven bzw. Ressourcen und der Jahresförderung zu einem bestimmten Zeitpunkt ist umstritten, da sie den Produktionsauslauf bei zunehmend erschöpften Reserven in seiner Dynamik nicht adäquat abbildet. Sie dient hier, in Kombination mit dem DMP, zur Illustration der Zeithorizonte.

Tabelle 1

Verbrauch, Reserven und Ressourcen fossiler Energierohstoffe

		Verbrauch[a]			Reserven	Resourcen	
		1860–1998	1998	2050[b]		niedrig	hoch
		Mill. PJ					
Öl	konventionell	4,4	0,14	0,19	6,0	1,6	5,9
	unkonventionell				5,9	0,9	20,3
Gas	konventionell	2,3	0,08	0,17	5,5	7,8	22,7
	unkonventionell[c]				0,5	6,8	>10,0
	Hydrate						>50,0
	Aquiferen						>50,0
Kohle		5,9	0,09	0,17	22,9	14,9	>180,0

[a] Bei Öl und Gas ist die Nutzung unkonventioneller Vorkommen unter den jeweiligen Angaben für die konventionellen Rohstoffe enthalten. — [b] „Middle-Course"-Szenario von IIASA/WEC (1998). — [c] Ohne Erdgas aus Hydraten und Aquiferen.

Quellen: Gregory und Rogner (1998); BGR (1998); BP (1999); eigene Berechnungen.

stig keineswegs dramatisch darstellt, soll der Frage nach den ökologischen Restriktionen des Einsatzes fossiler Brennstoffe nachgegangen werden.

Obwohl die mit der Förderung und Umwandlung, vor allem aber mit der Verbrennung fossiler Energierohstoffe einhergehenden ökologischen Veränderungen vielfältiger Natur sind, sticht unter den Umweltproblemen vor allem die Klimaproblematik, also die anthropogene Beeinflussung der Klimaprozesse besonders hervor. Durch den zusätzlichen Eintrag und die damit steigenden Konzentrationen strahlungsaktiver Gase (Klima- oder Treibhausgase) in der Atmosphäre kann eine zusätzliche Erwärmung der Erdatmosphäre entstehen.

Tabelle 2 zeigt die wichtigsten Klimagase und ihren Beitrag sowohl zum natürlichen als auch zum anthropogenen Treibhauseffekt. Während der natürliche Treibhauseffekt - der eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um etwa 33 Kelvin (K) verursacht - vor allem durch den Wassergehalt der Atmosphäre entsteht, werden für den anthropogenen Treibhauseffekt (mit einer geschätzten Wirkung von bisher 0,5 bis 1 K) vor allem die steigenden Konzentrationen von Kohlendioxid und Methan verantwortlich gemacht. Die steigenden Klimagaskonzentrationen in der Erdatmosphäre ergeben sich aus den wachsenden Emissionen, die Mitte der 90er Jahre folgende Größenordnungen erreichten:

- Die Kohlendioxidemissionen beliefen sich insgesamt auf ca. 29 bis 30 Mrd. t, davon etwa 22 Mrd. t aus der Verbrennung fossiler Energieträger.
- Die Methanemissionen betrugen etwa 400 Millionen Tonnen (Mill. t), jeweils zu etwa einem Viertel aus der Gewinnung und Nutzung fossiler Energieträger bzw. der Viehhaltung.
- Die Emissionen von Lachgas (Distickstoffoxid) in Höhe von ca. 15 Mill. t werden fast zur Hälfte durch die Bearbeitung von Böden freigesetzt oder entstehen zu etwa einem weiteren Viertel im Zusammenhang mit der Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen.
- Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) werden aus Spraydosen, kältetechnischen Anlagen, Dämmaterial sowie aus Reinigungsmaterialien freigesetzt.
- Zu den verbleibenden direkten Klimagasen gehören die synthetischen Gase halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) sowie Schwefelhexafluorid (SF_6), die den verschiedensten Produktionsprozessen bzw. Anwendungen entstammen.
- Das troposphärische Ozon bildet sich über chemische Reaktionen der sogenannter Vorläufersubstanzen, zu denen vor allem Stickoxide und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe gehören und die vor allem über Verbrennungsprozesse entstehen.

Für den Fall weiter steigender Treibhausgasemissionen ergeben die Modellrechnungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts eine markante Erhöhung der atmosphärischen Konzentrationen, was nach Berechnungen mit den derzeit aufwendigsten und aussagekräftigsten Klimamodellen zu einer Steigerung der global gemittelten Lufttemperaturen in Bodennähe um 0,8 bis 4,5 K, im „best estimate" um 2,4 K führen würde.[5] Bei einer solchen Steigerung werden Folgewirkungen erwartet, die die Anpassungsfähigkeiten von Ökosystemen,

[5] IPCC 1996a.

Tabelle 2

Beiträge der wichtigsten Klimagase zum Treibhauseffekt

		Konzentrationen		Beitrag zum „Treibhauseffekt"	
		vorindustriell[a]	derzeit	natürlich	anthropogene Verstärkung
Kohlendioxid	CO_2	ca. 280 ppm	360 ppm	22 %	61 %
Methan	CH_4	ca. 700 ppb	1.720 ppb	2,5 %	15 %
Fluorchlorkohlenwasserstoffe	FCKW	-	0,7 ppb	-	11%
Distickstoffoxid	N_2O	ca. 275 ppb	312 ppb	4 %	4 %
Ozon	O_3	?	15–50 ppb	7%	
Wasserdampf	H_2O	ca. 2,6 %		61 %	9 %[b]
andere Gase				2,5 %	(unsicher)

[a] Ca. 1800. — [b] Summarische Angabe für Ozon, Wasserdampf und andere Gase.
Quelle: Schönwiese (1996).

aber auch der Volkswirtschaften überfordern dürften.[6] Als vertretbares Niveau der mittleren Temperaturerhöhung wird die natürliche Schwankungsbreite der klimatologischen Temperaturvariationen in den letzten 10.000 Jahren angesehen, woraus ein maximaler Temperaturgradient von 0,1 K je Dekade abgeleitet wurde.[7] Auf dieser Grundlage hat beispielsweise der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) ein Emissionsminderungsszenario vorgelegt, in dem die globalen CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre — ausgehend von den ökologisch und ökonomisch als noch tragbar angesehenen Belastungen durch Klimaänderungen — auf einen Wert von unter 450 ppm begrenzt werden. Für die nächsten mehr als 150 Jahre müßten dafür Emissionsreduktionen von jährlich knapp 1 % erfolgen.[8]

3.2 Nutzungsgrenzen für fossile Energierohstoffe aufgrund der Klimaproblematik

Das Ziel von Emissionsminderungenim Kontext der Klimaproblematik ist die Dämpfung der Klimagas*konzentrationen*. Damit stehen weniger die zu einem bestimmten Zeitpunkt erreichten Jahresemissionen als vielmehr die *kumulativen* Emissionen in bestimmten Zeiträumen im Mittelpunkt des Interesses, wobei die zeitlichen Emissionsprofile eine erhebliche Rolle spielen. Aus einer Stabilisierung der CO_2-Konzentrationen auf etwa 450 ppm zum Ende des nächsten Jahrhunderts ergibt sich ein Limit für die kumulierten CO_2-Emissionen von noch etwa 2000 bis 2100 Mrd. t.[9] Diese Größenordnung kann mit den in Tabelle 1 zusammengestellten Daten zu den fossilen Brennstoffen bzw. deren Emissionspotential verglichen werden:

- Die in den gezeigten Reserven festgelegten potentiellen Emissionen betragen deutlich über 3200 Mrd. t CO_2, wozu die Kohlereserven mit etwa 64 % und die Kohlenwasserstoffreserven mit etwa 36 % beitragen.
- Darüber hinaus ist in den Ressourcen ein CO_2-Emissionspotential von 2250 Mrd. t (niedrige Variante) bis über 25 000 Mrd. t (obere Variante) zu vermuten.

Neben einer Stabilisierung der Klimagaskonzentrationen durch einen verminderten Einsatz fossiler Energierohstoffe besteht jedoch auch noch die Möglichkeit einer verstärkten Einbindung von CO_2 in Biomasse sowie zur Abspaltung und Deponierung des bei der Verbrennungsprozessen entstehenden CO_2. Auch wenn die prinzipielle Möglichkeit beider Optionen unbestritten ist, herrschen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Fragen, wie groß das jeweilige Minderungspotential in der Realität ist, über welche Zeiträume sie CO_2-Emissionen binden können sowie welche technischen und Kostenaufwendungen notwendig würden.[10]

Vor diesem Hintergrund und in Abhängigkeit von den Möglichkeiten zur Minderung bzw. zur Dämpfung der Emissionen bei nicht-energiebedingten CO_2-Emissionen bzw. bei anderen Treibhausgasen muß so von einer *umweltseitigen Restriktion* bei der Verbrennung fossiler Energierohstoffe ausgegangen werden. Unter der Annahme, daß für die nicht-energiebedingten CO_2-Emissionen vergleichbare Minderungspotentiale existieren, so ergibt sich aus dem o. g. Limit von etwa 2000 bis 2100 Mrd. t CO_2 eine Begrenzung der energiebedingten CO_2-Emissionen auf kumuliert etwa 1 500 Mrd. t. Für den Zeitraum bis 2050 resultiert daraus eine Nutzungsbeschränkung auf etwa ein Drittel und bis zum Jahr 2100 auf ca. 45 % des über die Energierohstoff-Reserven existierenden CO_2-Emissionspotentials. Bei einer optimistischeren oder einer pessimistischeren Einschätzungen der Möglichkeiten zur Klimagasminderung in den Nicht-Verbrennungsbereichen verändern sich diese Anteile entsprechend. Gleiches gilt für den Fall, daß die Nutzungseinschränkungen für die verschiedenen Energieträger unterschiedlich betrachtet werden. Eine stärkere „Nutzungseinschränkung" kohlenstoffintensiver Brennstoffe (z. B. Kohle) würde zu einer weniger starken Limitierung der Verbrennung weniger kohlenstoffintensiver Energieträger (Erdas, Öl) führen. Aber selbst wenn — als Gedankenexperiment - unterstellt wird, daß die Kohlennutzung kurzfristig und vollständig unterbliebe, würde bereits das CO_2-Emissionspotential der konventionellen und unkonventionellen Kohlenwasserstoffreserven die genannten Emissionsbegrenzungen bereits zu knapp 80 % ausschöpfen.

4. Aktuelle Emissionstrends und -strukturen für Klimagase

Sowohl hinsichtlich der Differenzierung von Emissionsminderungszielen für Länder bzw. Ländergruppen als auch für die Identifizierung von Minderungspotentialen nach Gasen und Sektoren geben die Trends und die Strukturen der Treibhausgasemissionen erste Anhalts-

---

6 Vgl. dazu im Detail IPCC (1996c).

7 Enquete-Kommission 1995.

8 WBGU 1995.

9 In IPCC (1996a) werden für den Zeitraum 1991-2100 etwa 2300 bis 2400 Mrd. t CO_2 angegeben, die um die kumulierten CO_2-Emissionen für die letzte Dekade in Höhe von mehr als 200 Mrd. t für die CO_2-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energierohstoffe sowie um ca. 70 Mrd. t aus anderen Quellen vermindert wurden.

10 Einige Klärungen der umstrittenen Fragen zu den Treibhausgassenken werden von einem Special Report des IPCC erwartet, der Mitte 2000 vorliegen wird. Zur Frage der großtechnischen und umfangreichen Abspaltung und Deponierung von CO_2 in den Ozeanen oder in leeren Erdgas- oder Ölfeldern existieren weitgehende Meinungsunterschiede. Zu einer sehr optimistischen Position vgl. Seifritz (1995), eher einschränkend IPCC (1996b).

punkte. Im folgenden sollen daher einige aktuelle Emissionsdaten dargestellt und kommentiert werden.

Die Tabelle 3 enthält eine Schätzung für die Entwicklung der aus der Verbrennung kommerziell gehandelter Energieträger resultierenden CO_2-Emissionen in den wichtigsten Regionen der Welt. Zunächst zeigt sich hier ein in der Summe deutlich steigender Emissionstrend, der jedoch in den Jahren seit 1990 durch eine Reihe von Sondereinflüssen überlagert wurde. Insbesondere in den Jahren bis 1995 werden die sowohl in Nord- und Südamerika sowie im asiatisch-pazifischen Raum erheblich steigenden CO_2-Emissionen durch die umfangreichen transformationsbedingten Emissionsminderungen in den ehemaligen Staatsplanwirtschaften Mittel- und Osteuropas (MOE) sowie der früheren Sowjetunion (FSU) weitgehend kompensiert. Ähnliches gilt für Westeuropa, wo die Entwicklung Anfang der neunziger Jahre vor allem durch die vereinigungsbedingte Entwicklung in Deutschland geprägt ist.

Die größten Steigerungsraten verzeichneten bis 1997 vor allem die Schwellenländer in Südostasien bzw. in Mittel- und Südamerika sowie die Staaten des Mittleren Ostens. Seitdem die Reduktionsdynamik in den MOE- und FSU-Ländern seit 1994 deutlich nachgelassen hat zeigt auch die weltweite Emissionsentwicklung wieder einen starken Aufwärtstrend, der erst 1998 durch den starken Sondereinfluß der Asienkrise gestoppt wurde.[11] Aufgrund des absoluten Emissionsvolumens, ab Mitte der neunziger Jahre jedoch auch wegen der starken Steigerungsraten bei den CO_2-Emissionen in China und Indien erhalten diese Staaten eine zunehmende Bedeutung hinsichtlich der Klimaproblematik. Während die globalen Emissionsanteile Nordamerikas sowie der Industriestaaten des Asien-Pazifik-Raumes von 1990 bis 1998 jeweils etwa um 1,5 Prozentpunkte auf 28,8 bzw. 10,5 Prozent

[11] Die geringe Steigerungsrate in Nordamerika ist vor allem den dortigen klimatischen Bedingungen des Jahres 1998 geschuldet.

Tabelle 3

Energiebedingte CO_2-Emissionen nach Regionen

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
	Mrd. t CO_2								
Nordamerika	6,0	5,9	6,0	6,1	6,3	6,3	6,5	6,6	6,6
Mittel- und Südamerika	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
Europa[a]	4,6	4,6	4,5	4,4	4,3	4,4	4,5	4,5	4,5
dar. Westeuropa	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,6	3,7	3,7	3,7
dar. Osteuropa	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Frühere Sowjetunion[b]	3,7	3,5	3,3	2,9	2,6	2,4	2,3	2,2	2,2
Mittlerer Osten	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
Afrika	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Asien/Pazifik gesamt	5,5	5,6	5,9	6,1	6,5	6,8	7,2	7,3	7,1
dar. Industrieländer[c]	1,9	2,0	2,1	2,1	2,3	2,3	2,4	2,5	2,4
dar. Schwellenländer[d]	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
dar. andere	3,3	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,3	4,3	4,2
Welt	21,9	21,7	21,8	21,7	22,0	22,3	23,1	23,2	23,1
	% zum Vorjahr								
Nordamerika	–0,7	–1,0	1,7	1,9	2,2	0,4	3,6	1,6	0,2
Mittel- und Südamerika	–0,2	1,9	3,2	2,4	4,2	5,4	4,2	3,8	2,2
Europa[a]	–2,6	–1,7	–2,3	–1,6	–1,1	1,6	2,6	–0,9	–0,1
dar. Westeuropa	0,6	0,5	–0,7	–1,6	–0,5	1,6	2,5	–0,7	1,4
dar. Osteuropa	–12,2	–9,5	–8,4	–1,5	–3,9	1,6	3,1	–2,0	–6,9
Frühere Sowjetunion[b]	1,5	–4,7	–7,6	–11,1	–10,5	–6,5	–5,3	–3,7	–0,8
Mittlerer Osten	2,5	2,3	4,7	4,1	5,6	5,2	6,2	3,7	2,7
Afrika	3,2	–0,3	–0,1	3,2	3,8	4,2	3,8	2,4	3,2
Asien/Pazifik gesamt	3,5	2,6	4,4	3,5	5,9	5,1	6,0	0,9	–2,3
dar. Industrieländer[c]	5,0	3,3	4,4	1,7	6,2	3,6	3,6	2,6	–2,5
dar. Schwellenländer[d]	13,2	9,7	7,2	9,8	7,4	9,1	10,9	4,7	–3,4
dar. andere	1,9	1,7	4,1	4,0	5,6	5,7	6,9	–0,6	–2,1
Welt	0,5	–0,6	0,1	–0,2	1,1	1,7	3,3	0,5	–0,5

[a] Ohne frühere Sowjetunion. — [b] Einschließlich Baltikum. — [c] Australien, Neuseeland, Japan, Hong-Kong, Singapur, Süd-Korea, Taiwan. — [d] Indonesien, Thailand, Malaysia.

Quellen: BP (1999); eigene Schätzungen und Berechnungen.

zunahmen, stieg der Emissionsanteil von China und Indien um mehr als 3 Prozentpunkte auf 16,6 Prozent. Westeuropa trägt aktuell mit etwa 16,1 % zu den weltweiten Emissionen bei, die Anteile der MOE- und FSU-Staaten lagen 1998 bei etwa 3,3 bzw. 9,5 Prozent. Eine noch kleine, aber deutlich wachsende Rolle spielen mit 3,9 bzw. 4,3 Prozent Mittel- und Südamerika bzw. der Mittlere Osten. Der Anteil von Afrika ist mit ca. 3,5 % vergleichsweise gering, der Emissionsverlauf zeigt aber insbesondere seit Mitte der neunziger Jahre ebenfalls eine erhebliche Entwicklungsdynamik.

Da den Industriestaaten nach wie vor die wichtigste Rolle bei den Treibhausgasemissionen zukommt, sollen hier einige detailliertere Analysen vorgenommen werden. Die hierfür verwendeten Daten entstammen den im Kontext der Klimarahmenkonvention bereitgestellten Emissionsinventaren für die im Annex I der Konvention aufgeführten Länder, die wohl den qualitativ besten Datenbestand darstellen dürften.[12] Diese Inventare enthalten neben den energiebedingten CO_2-Emissionen auch Angaben zu Emissionen aus anderen Prozessen sowie auch zu anderen Treibhausgasen. Vergleichsweise vollständige, wenn auch von der Qualität sehr unterschiedliche Daten liegen dabei für die drei Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O vor, Angaben zu den Treibhausgasen bzw. Treibhausgasgruppen HFKW, FKW und SF_6 existieren wegen erheblicher Datenprobleme nur für einzelne Länder.

Tabelle 4 zeigt die Emissionen für die erwähnten Treibhausgase im Basisjahr des Kioto-Protokolls zur Klimarahmenkonvention.[13] Die Emissionen für die verschiedenen Treibhausgase wurden mit spezifischen Treibhauspotentialen (THP) in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet und sind so unmittelbar vergleichbar.[14] Die Übersicht macht zunächst deutlich, daß die CO_2-Emissionen für die ganz überwiegende Zahl der aufgeführten Länder den größten Beitrag zum Gesamtausstoß von Klimagasen darstellen. Im Regelfall haben die CO_2-Emissionen einen Anteil von über 70 %, oft auch mehr als 80 %. Ausnahmen bilden hier Australien und insbesondere Neuseeland, wo die CO_2-Emissionen nur zwei bzw. sogar nur ein Drittel des gesamten Treibhausgaspotentials ausmachen. Die Methanemissionen tragen im Mittel von 10 bis 20 Prozent und die Lachgasemissionen durchschnittlich mit bis zu 20 % zum gesamten Treibhauspotential bei. Nur eine geringe Rolle spielen nach den vorliegenden Daten die neuen Treibhausgase, wo sich allein für Norwegen ein — vor allem aus der Aluminiumerzeugung resultierender — signifikanter Emissionsbeitrag ergibt. Ebenfalls nur nachrichtlich sind hier die CO_2-Emissionen bzw. -einbindungen aus Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft zu erwähnen, die wegen der hohen methodischen und datenseitigen Probleme ein signifikantes Maß an Unsicherheit beinhalten.

Die *CO_2-Emissionen* für das Jahr 1990 in größerer Detailauflösung zeigt Tabelle 5. Die energiebedingten CO_2-Emissionen aus der Verbrennung bilden in der Regel einen Anteil von etwa 90 % und mehr. Die Anteile der verschiedenen Sektoren schwanken zwischen den verschiedenen Staaten relativ stark, sind im Mittel jedoch relativ gleichgewichtig. Einen besonderen Emissionsschwerpunkt bildet jedoch die Energieindustrie vor allem in den osteuropäischen Staaten sowie in den Ländern mit hohem Kohleanteil bei der Stromerzeugung (z. B. Deutschland, Australien). Die industriellen Prozeßemissionen bilden nur in denjenigen Staaten eine herausgehobene Rolle, in denen erstens die verbrennungsbedingten Emissionen z. B. durch einen hohen Wasserkraftanteil in der Stromerzeugung vergleichsweise niedrig ausfallen, und die zweitens einen relativ hohen Ausstoß der entsprechenden Industrien (v. a. Zementherstellung) haben.

Die sektorale Struktur der *Methanemissionen* zeigt Tabelle 6. Hier ergeben sich deutlich andere Emissionsschwerpunkte als im Bereich der CO_2-Emissionen. Nur ausnahmsweise erreichen die Emissionen aus dem Verbrennungsbereich hier Anteile von mehr als 5 %.[15] Obwohl in Staaten mit erheblichem Anteil von Kohle- oder Gasgewinnung die Emissionen aus der Brennstoffextraktion eine nicht unerhebliche Größenordnung erreichen können, bilden die Land- und Abfallwirtschaft durchweg die Schlüsselsektoren für den Methanausstoß. Dies ist um so mehr von Bedeutung, da der größte Teil der Emissionen hier der Fermentation entstammt und jenseits einer Veränderung der Viehbestandszahlen nur wenig beeinflußt werden kann. Bei Anteilen der CH_4-Emissionen aus der Landwirtschaft von oft über 50 % zeichnen sich deutliche Grenzen für mögliche Emissionsminderungen ab. Im Gegensatz dazu bietet die Abfallwirtschaft eine Vielzahl von weitgehenden Emissionsminderungsoptionen.

Der Bereich der *Lachgasemissionen* ist durch eine erheblich größere Datenunsicherheit gekennzeichnet, welche bei der Erklärung von Spannbreiten und Strukturunterschieden der in Tabelle 7 gezeigten Emissionsdaten berücksichtigt werden muß. Die Zusammenstellung der Verursacherbereiche zeigt jedoch auch einige Strukturschwerpunkte. So beläuft sich der Anteil der verbren-

---

[12] Aufgrund der unterschiedlichen Ermittlungsmethoden und Abgrenzungen sind die im folgenden dargestellten Daten nicht unmittelbar mit den in Tabelle 3 zusammengestellten Emissionsangaben vergleichbar.

[13] Generell ist das Basisjahr für die Kioto-Verpflichtungen 1990, den osteuropäischen Transformationsstaaten wurde hier jedoch eine Wahlfreiheit eingeräumt. Für HFKW, FKW und SF_6 kann wegen der Datenprobleme darüber hinaus von allen Staaten das Jahr 1995 als Bezugszeitpunkt gewählt werden.

[14] Gewählt wurden hier die für die Berichterstattung im Rahmen der Klimarahmenkonvention verbindlichen THP für einen Zeithorizont von 100 Jahren.

[15] Die erhebliche Abweichung der Daten für Monaco ist kaum erklärbar und offensichtlich auf methodische Probleme zurückzuführen.

Tabelle 4

Treibhausgasemissionen der Annex I-Staaten im Basisjahr des Kioto-Protokolls

1000 t CO_2 bzw. CO_2-Äquivalent

	Emissionen[a]				*nachrichtlich*	
	CO_2	CH_4[b]	N_2O[b]	Gesamt[b]	CO_2 aus LNÄ & F[c]	Neue Gase[b,c]
Österreich	62042	9655	2030	73727	-13300	
Belgien	116090	13314	9539	138943	-2057	333
Dänemark	52277	8841	10540	71658	-924	
Finnland	59200	7520	5766	72486	300	
Frankreich	395506	63489	94581	553576	-59617	7755
Deutschland	1014500	116990	69626	1201117	-33719	8930
Griechenland	85349	9179	9269	103797	1438	
Irland	30719	17038	9105	56861	-5160	
Italien	432607	49319	50964	532890	-24949	873
Luxemburg	12750	502	197	13448	-295	
Niederlande	161360	27138	19809	208307	-1500	8745
Portugal	47123	16979	4340	68442	-1152	
Spanien	226423	45806	29203	301431		
Schweden	55443	5964	8060	69467	-34368	
Großbritannien	584171	76371	66100	726642	21413	717
Island	2147	294	130	2571		
Liechtenstein	208	21	31	260	-22	
Monaco	108	1	1	111		
Norwegen	35202	6657	5270	47129	-9590	4745
Schweiz	45070	5114	3565	53749	-4360	
Bulgarien[d]	96878	29667	9548	136093	-5801	
Kroatien[e]						
Tschechien	165490	16349	7998	189837	-2281	
Estland	37797	2209	713	40719	-11317	
Ungarn[f]	83676	13952	4005	101634	-4467	
Lettland	24771	3913	6984	35669	-10826	
Litauen	39535	7937	4077	51548	-8848	
Polen[g]	476625	65961	21700	564286	-44663	
Rumänien[h]	194826	49497	20556	264879	-5646	
Slowakei	60032	8589	3875	72496	-4257	
Slowenien	13935	3701	1576	19212	-2293	
Ukraine	703792	197448	17980	919220	-52107	
Rußland	2372300	556500	69967	2998767	-392000	41295
Kanada	461250	73500	55800	590550	-44000	8900
USA	4928900	622860	351230	5902990	-1142200	80580
Australien	275344	112236	23216	410796	58873	4860
Japan	1124532	32400	18090	1175022	-83903	
Neuseeland	25241	35145	11503	71889	-20888	626
nachr.: THP	1	21	310	1		

[a] Ohne Emissionen aus Bunker Fuels im internationalen Transport sowie Landnutzungsänderung (LNÄ) und Forstwirtschaft (F). — [b] Errechnet mit THP für 100 Jahre nach IPCC (1996a). — [c] Soweit verfügbar. — [d] Basisjahr: 1988. — [e] Keine vergleichbaren Inventardaten verfügbar. — [f] Basisjahr: Mittelwert aus den Jahren 1985 bis 1987. — [g] Basisjahr: 1988. — [h] Basisjahr: 1989.

Quellen: UNFCCC Database, Stand vom 1. Oktober 1999; eigene Berechnungen.

nungsbedingten N_2O-Emissionen oft auf 20 bis 30 Prozent, die Emissionen aus der Landwirtschaft liegen in aller Regel bei sehr deutlich über 50 % der Gesamtemissionen. Dagegen sind die Verursacheranteile der industriellen Prozesse stark vom Vorhandensein der entsprechenden Produktionslinien abhängig, die sich oft auf wenige Anlagen beschränken.

Die Tabelle 8 zeigt eine Zusammenstellung der jeweils aktuellsten und hinsichtlich der drei Gase CO_2, CH_4 und N_2O vollständigen Treibhausgasinventare für die Annex I-Staaten. Zwei Trends werden hier überaus deutlich. In MOE- und FSU-Ländern sind stark gesunkene Treibhausgasemissionen zu konstatieren, während die Emissionen in Nordamerika und in den asiatisch-pazifischen Staaten erheblich gestiegen sind. In Westeuropa ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Während eine ganze Reihe von Ländern durchaus die Emissionstrends umkehren konnten (Frankreich, Deutschland, Schweden, Schweiz, Großbri-

Tabelle 5

Struktur der CO_2-Emissionen im Jahr 1990

1000 t

	Verbrennung					Brennstoff-gewinnung	Industrie-prozesse	Andere Sektoren	Gesamt
	Energie-industrie	Industrie Sektoren	Verkehr	Andere Sektoren	Verbrennung gesamt				
Österreich	12 363	7 432	13 569	13 256	46 620	2 139	12 703	579	62 042
Belgien	28 140	31 027	19 964	26 788	105 919		9 188	983	116 090
Dänemark	25 865	5 776	10 474	8 783	50 898	240	1 006	133	52 277
Finnland	18 400	14 100	11 900	9 500	53 900	3 500	1 200	600	59 200
Frankreich	65 495	82 266	122 566	93 987	364 315	4 306	21 211	5 674	395 506
Deutschland	412 896	196 457	162 281	215 199	986 832		27 668		1 014 500
Griechenland	43 658	9 820	15 170	8 608	77 256		7 804	289	85 349
Irland	10 863	5 431	4 885	7 859	29 038		1 627	54	30 719
Italien	148 445	78 117	95 521	77 964	400 047	2 353	27 520	2 687	432 607
Luxemburg	1 883	6 353	2 625	1 272	12 133		585	32	12 750
Niederlande	51 040	41 400	28 560	36 530	157 530	420	1 880	1 530	161 360
Portugal	17 015	7 225	14 060	4 981	43 281	159	3 421	262	47 123
Spanien	75 184	47 971	58 260	26 177	207 592	414	17 690	727	226 423
Schweden	8 849	13 050	18 650	10 779	51 328	53	3 786	276	55 443
Großbritannien	229 316	94 757	116 721	117 297	558 091	11 481	13 939	660	584 171
Island	4	243	721	706	1 674	79	391	4	2 147
Liechtenstein[a]									
Monaco	37		39	29	106			2	108
Norwegen	7 396	3 043	13 533	2 431	26 403	1 900	6 718	181	35 202
Schweiz	963	5 406	14 668	19 293	40 330	56	3 363	1 321	45 070
Bulgarien	49 249	9 086	11 756	6 393	76 484		7 200	721	84 405
Kroatien[a]									
Tschechien	94 090	23 104	7 959	34 920	160 073		5 417		165 490
Estland	28 461	2 897	2 656	3 170	37 184		613	0	37 797
Ungarn	29 746	7 893	8 208	22 258	68 105		3 568		71 673
Lettland	9 530	2 683	5 829	6 168	24 209		563	0	24 771
Litauen	16 425	5 396	5 791	9 720	37 332		2 203		39 535
Polen	236 582	49 820	29 103	55 928	371 433	52	9 212		380 697
Rumänien	74 856	49 585	9 417	31 525	165 382		7 121	7	172 510
Slowakei	11 970	25 398	5 168	14 049	56 585		3 447		60 032
Slowenien	6 483	2 488	3 179	1 144	13 294		641	0	13 935
Ukraine				672 075	672 075	0	31 717		703 792
Rußland				2 298 900	2 298 900	27 100	46 300		2 372 300
Kanada	141 000	54 700	147 000	69 300	412 000	10 000	32 000	7 250	461 250
USA	1 748 400	1 052 500	1 482 400	582 700	4 866 000	8 400	54 500		4 928 900
Australien	141 807	47 363	59 596	13 857	262 623	6 066	6 655		275 344
Japan	339 065	339 378	205 633	168 888	1 052 964		58 795	12 773	1 124 532
Neuseeland	6 040	4 710	8 645	2 846	22 240	615	2 386	0	25 241

[a] Keine vergleichbaren Inventardaten verfügbar.

Quellen: UNFCCC Database, Stand vom 1. Oktober 1999; eigene Berechnungen.

tannien) ist in den anderen Staaten ein erheblicher Emissionszuwachs zu verzeichnen, der in einigen Staaten sogar im zweistelligen Bereich liegt (Dänemark, Niederlande, Norwegen).

Im Vergleich zu den mit dem Kioto-Protokoll eingegangenen — wenn auch bisher völkerrechtlich nicht verbindlichen — Verpflichtungen[16] wird deutlich, daß nach fast einem Drittel des Zeitraums bis zur Verpflichtungsperiode 2008–2012 mit Ausnahme der osteuropäischen sowie einzelner westeuropäischer (Deutschland, Großbritannien etc.) Vertragsstaaten die Volumina der notwendigen Emissionsminderungen eher zu- als abgenommen haben.

5. Schlußfolgerungen

Aus der Analyse der vorliegenden Arbeiten zur Reserven- und Ressourcensituation einerseits und dem Stand der Forschungen zur Klimaveränderungen andererseits ergeben sich Beschränkungen bei der langfristigen Nutzung fossiler Energierohstoffe vor allem aus der Klima-

[16] Hinsichtlich der Verpflichtungen von EU-Staaten sind in der Tabelle die im Falle einer Ratifikation des Protokolls ebenfalls völkerrechtlich verbindlichen Zusagen im Rahmen der EU-Lastenteilung (Burden sharing) aufgeführt. Vgl. hierzu Oberthür und Ott (1999).

Tabelle 6

Struktur der CH_4-Emissionen im Jahr 1990

1000 t

	Verbrennung					Energie-gewinnung	Land-wirtschaft	Abfall-wirtschaft	Andere Sektoren	Gesamt
	Energie-industrie	Industrie	Verkehr	Andere Sektoren	Verbrennung gesamt					
Österreich	0,2	0,5	3,3	16,2	20,2	4,3	208,1	227,2	0,1	459,8
Belgien	0,3	1,4	9,3	4,5	15,5	53,1	388,0	174,0	3,4	634,0
Dänemark	1,0	1,0	2,0	6,0	10,0	12,0	329,0	71,0		421,0
Finnland	1,2	1,9	3,3	12,9	19,3	1,2	93,8	240,0	3,8	358,1
Frankreich	2,2	4,4	23,8	130,4	160,7	311,0	1 630,7	819,1	101,7	3 023,3
Deutschland	8,0	12,4	63,7	129,8	213,9	1 561,0	1 902,4	1 893,7		5 571,0
Griechenland	0,2	1,6	3,3	8,2	13,3	44,2	270,6	109,0		437,1
Irland	0,2	1,2	3,9	5,3	10,2	640,3	136,0	19,6	811,3	
Italien	5,0	8,1	61,7	21,7	96,5	309,0	909,1	842,5	191,4	2 348,5
Luxemburg	0,0	0,0	0,2	0,6	0,8	1,6	17,7	3,8		23,9
Niederlande	3,0	4,0	7,8	20,0	34,8	178,8	505,0	568,4	5,3	1 292,3
Portugal	1,3	1,6	4,8	7,3	14,9	4,3	210,7	578,3	0,4	808,5
Spanien	12,4	6,0	12,2	45,1	75,6	686,7	925,6	491,3	2,0	2 181,2
Schweden	1,0	5,0	23,0	11,0	40,0	160,0	85,0		284,0	
Großbritannien	7,7	11,7	29,5	70,5	119,4	1 328,9	1 037,2	1 150,4	0,8	3 636,7
Island			0,2		0,2		11,9	1,9		14,0
Liechtenstein[a]										
Monaco	0,0		0,0	0,0	0,0			0,0		0,1
Norwegen	2,0		4,0	7,0	13,0	20,0	101,0	182,0	1,0	317,0
Schweiz	0,1	0,3	4,5	4,1	8,9	14,6	150,9	68,6	0,4	243,5
Bulgarien	2,9	0,2	2,9	1,5	7,5	311,0	264,5	833,7	3,3	1 420,0
Kroatien[a]										
Tschechien	7,1	1,2	2,7	48,3	59,3	394,1	204,2	104,9	16,0	778,5
Estland	0,1	0,1	1,9	0,6	2,6		60,2	42,4	0,0	105,2
Ungarn				5,6	5,6	366,0	173,0			544,6
Lettland	0,5	0,1	1,6	0,3	2,4	53,2	111,3	19,4		186,3
Litauen	0,7	0,4	1,4	2,7	5,3	26,1	180,7	165,7	0,2	378,0
Polen	9,0	15,0	7,0	6,0	37,0	994,0	850,0	907,0	13,0	2 801,0
Rumänien	6,1	3,5	1,4	33,8	44,8	1 130,3	560,3	229,7	11,1	1 976,2
Slowakei	2,0	1,0	22,0	25,0	122,0	187,0	65,0	10,0	409,0	
Slowenien	0,9	0,2	0,8	4,9	6,7	50,5	43,8	75,6		176,2
Ukraine					35,8	6 219,8	2 254,2	892,3	0,2	9 402,3
Rußland					200,0	18 900,0	5 060,0	1 940,0	400,0	26 500,0
Kanada	1,6	1,7	25,0	231,7	260,0	1 300,0	950,0	900,0	90,0	3 500,0
USA	23,0	140,0	252,0	241,0	656,0	10 172,0	8 775,0	10 000,0	57,0	29 660,0
Australien	1,9	1,6	29,4	75,8	108,7	1 107,7	3 200,4	704,4	223,4	5 344,6
Japan	1,5	15,3	75,7		89,3	166,2	842,0	394,3	51,0	1 542,9
Neuseeland	0,3	0,4	7,1	2,9	10,6	24,8	1 492,2	141,2	4,7	1 673,6

[a] Keine vergleichbaren Inventardaten verfügbar.

Quellen: UNFCCC Database, Stand vom 1. Oktober 1999; eigene Berechnungen.

problematik. Die Möglichkeiten zur Senkung der atmosphärischen Konzentrationen bei CO_2 liegen nach dem heutigen Stand des Wissens ganz überwiegend bei quellenorientierten Optionen. Ob, in welchem Umfang, für welche Zeiträume und zu welchen Kosten die Kohlenstoffeinbindung in Biomasse oder die Abspaltung und Einlagerung von CO_2 eine reale Option darstellen, bleibt bisher in hohem Maße unsicher.

Zwar sind die anthropogenen CO_2-Emissionen nicht die einzigen Verursacher für den zusätzlichen Treibhauseffekt. Eine grobe Analyse der Emittentenstruktur für die anderen Treibhausgase in den Industriestaaten läßt jedoch den Schluß zu, daß hier zwar ebenfalls erhebliche Emissionsminderungspotentiale existieren, diese aber in wichtigen Sektoren (v.a. Landwirtschaft) auch deutlich begrenzt sind. Maßnahmen zur Verringerung der energiebedingten CO_2-Emissionen bilden damit eindeutig den Schlüssel zur Eingrenzung des Klimaproblems.

Der Emissionsverlauf in der letzten Dekade zeigt jedoch auch, daß die notwendige Trendwende in der Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den Industriestaaten bisher keineswegs geschafft werden konnte.

Tabelle 7

Struktur der N_2O-Emissionen im Jahr 1990

1000 t

	Verbrennung					Industrie-Prozesse	Land-wirtschaft	Abfall-wirtschaft	Andere Sektoren	Gesamt
	Energie-industrie	Industrie	Verkehr	Andere Sektoren	Verbren-nung gesamt					
Österreich	0,1	0,1	1,0	0,6	1,9	0,6	3,3	0,0	0,8	6,5
Belgien	2,1	1,9	0,9	2,8	7,7	11,5	10,9	0,1	0,6	30,8
Dänemark	1,0			1,0	2,0		33,0			34,0
Finnland	1,2	1,2	1,7	1,4	5,5	3,0	10,1		0,0	18,6
Frankreich	1,8	2,8	4,0	4,2	12,8	87,4	182,0	3,1	19,8	305,1
Deutschland	14,3	6,0	10,3	6,0	36,6	82,0	96,0	4,0	6,0	224,6
Griechenland	2,7	1,5	0,6	1,9	6,7	2,3	20,6	0,3	0,0	29,9
Irland	1,4	0,4	0,2	0,8	2,8	2,6	23,3	0,6		29,4
Italien	19,9	9,5	3,6	11,6	44,6	23,5	75,0	0,3	21,0	164,4
Luxemburg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1		0,5	0,0	0,0	0,6
Niederlande	0,5	0,1	4,6	0,1	5,3	31,5	22,2	0,5	4,4	63,9
Portugal	0,3	0,2	0,5	0,8	1,8	1,9	7,4	2,9		14,0
Spanien	10,2	5,2	2,0	2,8	20,2	10,4	63,5	0,1	0,0	94,2
Schweden	1,0	2,0	3,0		6,0	3,0	17,0			26,0
Großbritannien	6,8	3,5	4,2	2,1	16,7	95,3	100,4	0,9	0,0	213,2
Island			0,0	0,0	0,0	0,2	0,2			0,4
Liechtenstein[a]										
Monaco	0,0		0,0	0,0	0,0			0,0		0,0
Norwegen			1,0		1,0	7,0	9,0			17,0
Schweiz	0,0	0,0	1,1	0,2	1,4	0,3	9,2	0,2	0,4	11,5
Bulgarien	11,3		0,3	0,2	11,8	9,7	8,2			29,7
Kroatien[a]										
Tschechien	12,3	2,5	0,8	4,4	20,0	3,3	2,3		0,2	25,8
Estland	0,0		0,0	1,4	1,4		0,9		0,0	2,3
Ungarn				7,3	7,3		4,1			11,4
Lettland	0,1	0,0	0,1	0,1	0,3		22,0	0,3	0,0	22,5
Litauen	0,4	0,1	0,2	0,3	1,0	1,4	10,8			13,2
Polen	3,0	1,0	1,0	1,0	6,0	16,0	41,0			63,0
Rumänien	8,7	1,9	0,3	4,0	15,0	13,0	20,7			48,7
Slowakei	0,2	0,2		0,2	0,6	2,1	9,5	0,3	0,0	12,5
Slowenien	0,1		0,1	0,3	0,5		4,6		0,0	5,1
Ukraine					6,7	22,9	28,0	0,1	0,3	58,0
Rußland					17,4	3,0	200,0	0,3	5,0	225,7
Kanada	2,7	1,6	21,0	3,7	29,0	37,0	110,0	3,0	1,0	180,0
USA	24,0	17,0	161,0	5,0	207,0	96,0	805,0	25,0		1 133,0
Australien	1,4	0,7	5,2	0,4	7,7	1,6	63,0		2,6	74,9
Japan	1,9	4,6	12,9		19,3	23,9	9,3	4,9	0,9	58,4
Neuseeland	0,0	0,1	0,4	0,1	0,6		36,3	0,2	0,0	37,1

[a] Keine vergleichbaren Inventardaten verfügbar.

Quellen: UNFCCC Database, Stand vom 1. Oktober 1999; eigene Berechnungen.

Tabelle 8

Aktueller Stand der Treibhausgasemissionen in den Annex I-Staaten

1000 t CO_2 bzw. CO_2-Äquivalent

	Kioto-Ziel[a] 1990 = 100	Jahr des aktuellsten Inventars[b]	Emissionen[c] CO_2	CH_4	N_2O	Summe[d]	1990 = 100	*nachrichtlich:* CO_2 aus LNÄ & F[e]	1990 = 100
Österreich	87,0	1997	66062	9237	2273	77571	105,2	–13753	96,6
Belgien	92,5	1996	128546	12403	10909	151858	109,3	–2057	100,0
Dänemark	79,0	1997	64322	8892	10289	83503	116,5	–997	92,1
Finnland	100,0	1997	64600	5725	5859	76184	105,1		
Frankreich	100,0	1997	402237	55006	93096	550339	99,4	–67772	86,3
Deutschland	79,0	1997	894000	74844	66960	1035804	86,2	–33493	100,7
Griechenland	125,0	1996	91978	9597	9083	110658	106,6		
Irland	113,0	1996	34819	16793	8110	59722	105,0	–6497	74,1
Italien	93,5	1995	438490	53666	50158	542314	101,8	–24745	100,8
Luxemburg	94,0	1995	9545	464	213	10223	76,0	–295	100,0
Niederlande	72,0	1996	184870	24757	22444	232071	111,4	–1700	86,7
Portugal	127,0	1994	50841	17367	4371	72579	106,0	–1152	100,0
Spanien	115,0	1995	247703	49778	28049	325530	108,0		
Schweden	104,0	1997	56428	5460	7440	69328	99,8	–31774	107,5
Großbritannien	87,5	1997	540643	57257	59535	657435	90,5	15518	72,5
Island	110,0	1995	2282	286	124	2692	104,7		
Liechtenstein[f]	92,0								
Monaco	92,0	1997	143	1	3	147	133,0		
Norwegen	101,0	1997	41430	7350	4960	53740	114,0	–16499	28,0
Schweiz	92,0	1997	43370	4704	3627	51701	96,2	–5400	76,1
Bulgarien[g]	92,0	1997	59148	18740	6572	84461	62,1	–5852	99,1
Kroatien[f]	95,0								
Tschechien	92,0	1997	137125	11808	8883	157816	83,1	–4639	–3,4
Estland	92,0	1997	20716	2164	217	23097	56,7		
Ungarn[h]	94,0	1996	60475	17073	1582	79130	77,9	–3931	112,0
Lettland	92,0	1997	12842	1944	1172	15959	44,7	–14315	67,8
Litauen	92,0	1997	16200	6342		22.542	43,7		
Polen[i]	94,0	1997	361626	47850	16744	426220	75,5	–40521	109,3
Rumänien[k]	92,0	1994	125597	30679	7750	164026	61,9	–6590	83,3
Slowakei	92,0	1996	46105	6594	2449	55148	76,1	–5281	75,9
Slowenien[f]	92,0	1990	13935	3701	1576	19212	100,0	–2293	100,0
Ukraine	100,0	1998	314445	135591	4898	454934	49,5	–68708	68,1
Rußland	100,0	1994	1660000	411810	39556	2111366	70,4	–568000	55,1
Kanada	94,0	1997	519280	90300	65100	674680	114,2	–19000	156,8
USA	93,0	1997	5455553	658493	399828	6513874	110,3	–764683	133,1
Australien	108,0	1996	308413	111463	24465	444341	108,2	36260	61,6
Japan	94,0	1997	1230831	29160	20374	1280365	109,0		
Neuseeland	100,0	1997	30284	33481	11623	75388	104,9	–17008	118,6
nachr.: THP			1	21	310			1	

[a] Für EU-Länder EU-Burden sharing. — [b] Für vergleichbare Inventare für CO_2, CH_4 und N_2O. — [c] Ohne Emissionen aus Bunker Fuels im internationalen Transport sowie Landnutzungsänderungen (LNÄ) und Forstwirtschaft (F). — [d] Errechnet mit THP für 100 Jahre nach IPCC (1996a). — [e] Soweit verfügbar. — [f] Keine vergleichbaren Inventardaten verfügbar. — [g] Basisjahr: 1988. — [h] Basisjahr: Mittelwert der Jahre 1985 bis 1987.— [i] Basisjahr 1988. — [k] Basisjahr 1989.

Quellen: UNFCCC Database, Stand zum 1. Oktober 1999; eigene Berechnungen.

2 5. JULI 2000 Weltwirtschaft Kiel

Literatur

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (1998): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 1998. Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien XVII, Hannover.

BP Amoco (1999): Statistical Review of World Energy 1999. London.

Enquete-Kommission (Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre" des 12. Deutschen Bundestages) (1995): Mehr Zukunft für die Erde. Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz. Bonn.

Gregory, K., H.-H. *Rogner* (1998): Energy Ressources and Conversion Technologies for the 21st Century. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 3 No. 2–4, S. 171–229.

IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis)/WEC (World Energy Council) (1998): Global Energy Perspectives. Cambridge.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996a): Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996b): Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: ScientificTechnical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996c): Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.

Masters, C.D., E.D., *Attanasi*, D.H. *Root* (1994): World Petroleum Assessment and Analysis. Proceedings of the 14th World Petroleum Congress, Stavanger.

Oberthür, S., H.E. *Ott* (1999): The Kyoto Protocol. International Climate Policy for the 21st Century. Berlin, Heidelberg u. a.

Schönwiese, Chr.-D. (1996): Naturwissenschaftliche Grundlagen: Klima und Treibhauseffekt. In: Brauch, H.G. (Hrsg.): Klimapolitik. Berlin, Heidelberg u. a.

Seifritz, W. (1995): Status der CO_2-Entsorgungstechniken. IKARUS-Teilprojekt Nr. 4–08. Jülich.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (1995): Welt im Wandel. Wege zur Lösung globaler Umweltprobleme. Jahresgutachten 1995. Berlin; Heidelberg u. a.

Long-term Constraints to the Use of Fossil Fuels: Some Comments

Summary

In the medium to long term, the energy sector will have to face a double challenge. Constraints to the use of fossil fuels are not only emerging from the traditional argument of resource depletion. The ultimate constraint for burning fossil fuels is rather given by the need to limit greenhouse gas concentrations in the earth's atmosphere to a level which allows for an adaptation of nature and of humankind to a changing global climate. The article first discusses recent contributions on the availability of reserves and resources of oil, gas and coal on a global level. Secondly, an overview on the results of the climate change research is presented, with particular emphasis on quantitative and time restrictions to future greenhouse gas emissions. On this basis, both restrictions are discussed and compared. Finally, an analysis of recent trends and structures of greenhouse gas emissions in industrialized countries helps to demonstrate the relative importance of carbon dioxide emissions from fossil fuel combustion in total emission trends.