

**ellschaftliche Aspekte
von Klimaänderungen**

herausgegeben von

W. Fischer

H. Schütz

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
W. Fischer / H. Schütz Forschungszentrum Jülich (KFA) Klimaänderungen und Gesellschaft: Probleme und Perspektiven	1
A. Grübler Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA), Laxenburg Energiestrategien und CO₂-Minderung	36
B. Schlomann Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe Treibhausgas-Emissionen und Reduktionskonzepte	72
R. Petersen Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie Das Mobilitätsproblem	95
W. Schluchter Gesellschaft für Statistik und angewandte Sozialwissenschaft, Heidelberg Die Kosten des Klimas - oder was ist uns das Klima wert?	118
F. Prose / D. Kupfer / G. Hübner Universität Kiel Social Marketing und Klimaschutz	132
V. Prittwitz Gesellschaft für Politikanalyse, Berlin Umweltpolitik als Modernisierungsprozeß	145
G. Geiger Stiftung Wissenschaft und Politik, Ebenhausen Regelungsansätze und Wirksamkeit der internationalen Klimaschutzpolitik	157
H. Müller Hessische Stiftung für Friedens- und Konfliktforschung, Frankfurt/M. Umwelt und internationale Konflikte	181

A. Grübler

Energiestrategien und CO₂-Minderung

Arbeiten am Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) über umweltverträgliche Energiestrategien versuchen Wege in eine Zukunft der Energieversorgung zu weisen, in der der Energieeinsatz im allgemeinen, und der von Kohlenstoff im speziellen, möglichst gering gehalten wird, um damit weniger Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre abzugeben (Nakicenovic, 1992). Kohlenstoff steht hier natürlich nur stellvertretend für eine Reihe anderer Umweltschadstoffe, deren Minimierung ebenfalls vorangetrieben werden muß. Warum sich das IIASA neben der Problematik grenzüberschreitender Luftschadstoffe (Stichwort: Saurer Regen) mit der CO₂ Problematik befaßt, ist vor allem in der globalen und langfristigen Perspektive begründet, die im Mittelpunkt des IIASA Forschungsauftrages steht.

Natürlich arbeitet nicht nur das IIASA am komplexen Thema der "Entkarbonisierung" des globalen Energiesystems. Die Zahl der wissenschaftlichen Publikationen über die CO₂-Problematik und der damit befaßten nationalen und internationalen Institutionen nimmt rasch zu. Ihr Zuwachs ist sicherlich rascher als der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, der sich momentan bei ungefähr einem halben Prozent pro Jahr bewegt.

Die neue Problemdimension

Wir haben in den letzten Jahren gelernt, daß Umwelt generell und die Atmosphäre speziell zu einer beschränkten Ressource geworden ist. Das große Thema der siebziger Jahre, die Beschränktheit der Energieressourcen (Meadows et al., 1972; Häfele, 1981), ist von einer neuen Perspektive der globalen ökologischen Grenzen unserer industriell-technischen Gesellschaft in den Hintergrund gedrängt worden (IPCC, 1990 und 1992). Insbesondere, wenn man eine Weiterverfolgung bestehender Trends im Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum unterstellt und die relativ große Verfügbarkeit (kohlenstoffreicher) fossiler Energievorräte in Betracht zieht, sind die Grenzen des Wachstums eher von der globalen Biosphäre zu erwarten, als von der Verfügbarkeit von Rohstoffen.

Die Situation wird zusätzlich noch durch große wissenschaftliche Unsicherheiten bezüglich des Kohlenstoffkreislaufs und der klimatischen Auswirkungen seiner Veränderung, bzw. der ökologischen Folgen eines CO₂-Anstieges, kompliziert. Gegenwärtig (und wohl auch in absehbarer Zukunft) wird es nicht möglich sein, Grenzwerte für tolerierbare CO₂ Konzentrationen oder deren Anstieg wissenschaftlich eindeutig zu bestimmen. Dies bedeutet, daß wir einen langwierigen politischen Entscheidungsfindungsprozeß auf nationaler und internationaler Ebene vor uns haben, in dem so-

	Coal	Oil	Gas	Total	As a % of current atmospheric carbon loading (760 Gt)
1860-1990 consumption	121.9	65.6	27.7	215.2	28
1990 consumption	2.3	2.5	1.1	5.9	<1
Reserves (conventional)	515.5	108.6	63.7	687.8	90
Total resource base	2853	447	405	3705	490
Additional occurrences	>3000	>2700	>450	>6150	810
Methane clathrates			>8850	>8850	1160
Total				>18700	2460

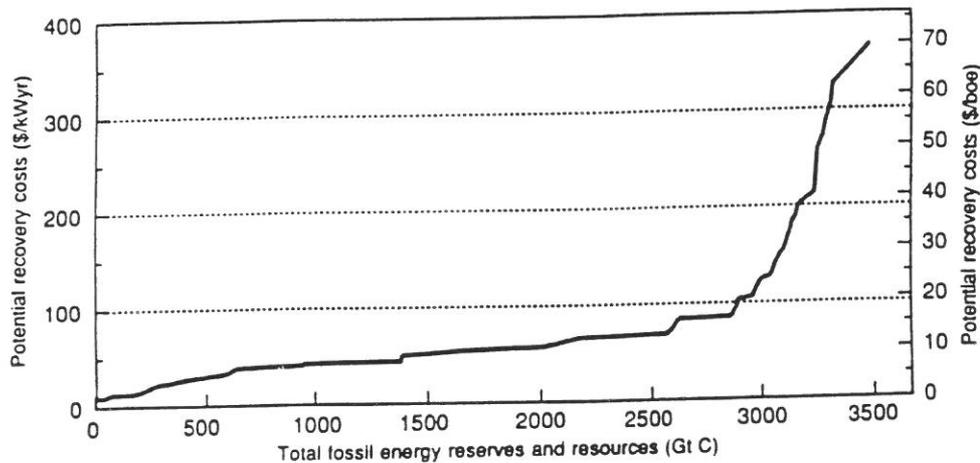


Abbildung 1. Globale Kohlenstoffbilanz fossiler Energieträger: kumulierter Verbrauch 1860-1990, Verbrauch 1990, Reserven, Ressourcen, und zusätzliche (gegenwärtig nicht gewinnbare) Vorkommen. In Gigatonnen (Gt) Kohlenstoff. Von den fossilen Ressourcen können schätzungsweise 3000 Gt zu Preisen unter 20 US \$ pro Faß Erdöläquivalent gewonnen werden. Quelle: Rogner et al., 1993.

wohl mögliche Risiken einerseits, als auch Kosten und Nutzen von Gegenmaßnahmen, bzw. des Zeitpunkts, wann diese gesetzt werden sollen, abzuwägen sind.

Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft anthropogener CO₂-Emissionen

Bevor man einen Blick in die Zukunft des Energiesystems und der CO₂-Emissionen werfen will, taucht unweigerlich die Frage auf, wie viel fossile Energie die Menschheit bereits verbraucht hat und welche Mengen ihr voraussichtlich noch zur Verfügung stehen werden. Bei den noch zur Verfügung stehenden Vorräten muß man zwischen *Reserven* (den Mengen, die genau vermessen wurden und mit gegenwärtiger Technologie und zu heutigen Energiepreisen gewonnen werden können) und *Ressourcen* unterscheiden, die entweder nur ungenügend erfaßt, oder nur mit einem höheren Preisniveau und/oder mit neuer Technik zu nutzen sind.

Am IIASA wurde eine globale Bilanz der fossilen Energiereserven und Ressourcen aufgestellt (Rogner et al., 1993), aber nicht, wie üblich, in Erdöl- oder in Steinkohlen-einheiten, sondern in Kohlenstoffeinheiten (Abbildung 1). Die erste Zeile der Abbildung gibt den kumulativen Verbrauch von Kohle, Erdöl und Erdgas in Gigatonnen (Gt, d.h. Milliarden Tonnen) Kohlenstoff seit der Mitte des 19. Jahrhunderts bis zur Gegenwart an. Verglichen mit diesem Wert ist der momentane Verbrauch an fossilen Energieträgern mit ca. sechs Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr relativ bescheiden. Das gilt auch insbesondere im Vergleich mit den Reserven und vor allem den geologischen Ressourcen. Wir sehen, daß ungefähr ein Faktor 100 zwischen dem gegenwärtigen Verbrauch (oder den heutigen CO₂-Emissionen) und den Reserven liegt. Beziehen wir die Ressourcen ein, wächst der Faktor nahezu um eine weitere Größenordnung. Die Abbildung macht auch deutlich, daß das geologische (und Emissions-) Potential insbesondere bei den schmutzigen fossilen Energieträgern (Ölschiefer, Teersand, Steinkohle und Braunkohle) sehr hoch, aber auch bei dem vergleichsweise umweltfreundlichen Erdgas beträchtlich ist. Dies zeigt, daß die Diskussion über die Beschränktheit der Ressourcen eher in das Gegenteil umgeschlagen hat. Noch vor knapp zwei Dekaden waren fast alle Experten der Ansicht, daß die fossilen Energieträger nicht ausreichen werden, um den globalen Energiebedarf vor allem in einer längerfristigen Perspektive (etwa über das Jahr 2030 hinaus) zu decken. Heute müssen wir davon ausgehen, daß die Erde geologisch gesehen ca. 5000 Gigatonnen (Gt) Kohlenstoff in Form fossiler Lagerstätten im Boden hat - und das sind noch relativ konservative Schätzungen -, also genug für die Deckung auch eines steigenden Bedarfs weit über das 21. Jahrhundert hinaus. Im Gegensatz dazu enthält die Atmosphäre gegenwärtig 760 Gt Kohlenstoff. Würden die Menschen auch nur einen größeren Teil der fossilen Ressourcen wirklich nutzen, könnte sich die Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre signifikant erhöhen, sich verdreifachen oder sogar vervierfachen. Deshalb erkennen wir heute klarer, daß das wirkliche Problem eher das Überangebot an kohlenstoffhaltigen fossilen Energieträger

ist; d
saub

Die (

Wir

zent

starr

Mit l

anal

tion

Zeit

etwa

von

sion

Beit

abg

zusi

(Kol

mer

zun

glei

Trei

ist

war

zu

Kel

es

bei

En

En

Jal

sei

Bil

ge

ist; daß wir nicht eine Knappheit von fossiler Energie an sich haben, sondern daß saubere Energien fehlen.

Die Geschichte der anthropogenen CO₂-Emissionen

Wir wissen aus Meßergebnissen über den atmosphärischen CO₂-Gehalt, daß die Konzentration dieses Gases in der Atmosphäre gestiegen ist. Die bekannteste Meßreihe stammt vom Berg Mauna Loa auf Hawaii und reicht bis in die fünfziger Jahre zurück. Mit Hilfe dieser Messungen und von Daten für frühere Zeiträume, die aus Luftblasenanalysen von Eisbohrkernen stammen, läßt sich abschätzen, daß die CO₂-Konzentration von ca. 280 ppm (parts per million, d.h. ein Teil von einer Million Teilen) zum Zeitpunkt vor Beginn der Industrialisierung (um ca. 1800) bis gegenwärtig (1991) auf etwa 355 ppm, also um ca. 75 ppm, gestiegen ist (IPCC, 1990 und 1992). Mit Hilfe von Datensätzen über historische Emissionen und eines einfachen Modells um Emissionen in atmosphärische Konzentrationserhöhung umzurechnen, kann ungefähr der Beitrag verschiedener anthropogener Quellen zur CO₂-Erhöhung in der Atmosphäre abgeschätzt werden (Grübler und Fujii, 1991). Solche Berechnungen zeigen, daß die zusätzlichen 75 ppm ungefähr je zur Hälfte aus der Nutzung von fossiler Energie (Kohle, Erdöl, Erdgas, siehe Abbildung 1) und aus Landnutzungsänderungen stammen. Diese Zahlen sind nur Näherungswerte, da die Daten gerade für die Landnutzung sehr unsicher sind. Diese Aufteilung der historischen Emissionen auf zwei etwa gleich große Emissionsblöcke deutet auch schon auf die Problematik hin, die sich bei Treibhausgasemissionen, bzw. deren Minderung, stellt: Nicht nur der Energiesektor ist wichtig, sondern auch andere sehr komplexe Phänomene, die mit Bevölkerungswachstum, der Verteilungs- und Entwicklungsproblematik zusammenhängen und die zu Änderungen in der Landnutzung führen.

Kehrt man zu den fossilen Energieträgern zurück, die hier im Vordergrund stehen, ist es in erster Linie die Kohle, die den größten Teil zur Erhöhung der CO₂-Konzentration beigetragen hat. Denn Kohle substituierte Holz und wurde damit zum dominanten Energieträger der industriellen Revolution. Sie ist zugleich der kohlenstoffreichste Energieträger. Der Beitrag des Erdöls zu den CO₂-Emissionen begann erst um die Jahrhundertwende merklich anzusteigen, um insbesondere mit der Automobilisierung seit den fünfziger Jahren einen signifikanten Anstoß zu erhalten. Erdgas fällt in dieser Bilanz noch wenig ins Gewicht, da Methan der zuletzt eingeführte fossile Energieträger, und außerdem am geringsten mit Kohlenstoff belastet ist.

Die gegenwärtigen anthropogenen CO₂-Emissionen

Allen Formulierungen von Strategien zur möglichen Reduktion der CO₂-Emissionen geht nicht nur die Untersuchung ihrer historischen, sondern insbesondere ihrer gegenwärtigen Herkunft voraus. Hier stoßen wir auf ein Problem, denn die Herkunft der globalen Emissionen von CO₂ vor allem außerhalb der Energienutzung ist nur schwer und nicht sehr zuverlässig zu ermitteln. Der gegenwärtige Stand der Wissenschaft geht davon aus, daß fossile Energienutzung und andere industrielle Quellen (Zementherstellung und Abfackeln von Erdgas) 1990 rund 6 Gt Kohlenstoff emittierten (IPCC, 1992). Der Unsicherheitsbereich dieser Angaben ist ca. 10 Prozent. Demgegenüber werden die Emissionen aus Landnutzungsänderungen gegenwärtig auf zwischen 0.6 bis 2.6 Gt Kohlenstoff geschätzt.

Nach Ländergruppen aufgeteilt, stammt der Großteil der energiebedingten Emissionen aus den OECD Ländern (2.6 Gt) und den ehemaligen Planwirtschaften Europas (1.5 Gt). 1988 emittierten die entwickelteren Länder mit rund 4.1 Gt Kohlenstoff rund 72 Prozent der globalen energiebedingten Emissionen. Bei den Emissionen aus Landnutzungsänderung ist es genau umgekehrt: praktisch die gesamten Emissionen stammen aus der südlichen Hemisphäre (d.h. aus Entwicklungsländern). Die Abbildung 2 zeigt die energiebedingten Kohlenstoffemissionen pro Kopf der Bevölkerung im Jahre 1988 für verschiedene Länder, aufgeteilt nach der Quelle der Emissionen (Kohle, Erdöl, Erdgas). Die politische Entwicklung in den ehemaligen Planwirtschaften wurde ebenfalls berücksichtigt, indem die Emissionen der Unionsrepubliken der ehemaligen UdSSR berechnet wurden. Aus der Abbildung läßt sich im Vergleich zwischen Westeuropa, den USA, Japan, den ehemaligen Planwirtschaften und Entwicklungsländern, aber auch innerhalb Europas, die extreme Heterogenität bei den energiebedingten pro-Kopf-Kohlenstoffemissionen illustrieren. Emissionsbilder sind das Resultat von vielen komplexen Faktoren, wie z.B. dem Niveau der wirtschaftlichen Entwicklung, der Wirtschaftsstruktur eines Landes, verschiedenen Lebensstilen, aber auch der Ausstattung mit energetischen Rohstoffen, der Struktur und der Effizienz von Energiesystemen. Selbst wenn die Emissionen eine ähnliche numerische Größe haben, wie z.B. im Falle der USA und der ehemaligen DDR, wo die pro-Kopf-Emissionen 1988 ungefähr 5 Tonnen Kohlenstoff betragen, so sind doch die Gründe für diese Höhe sehr unterschiedlich. Die DDR war eine ineffiziente, zentral geplante schwerindustrielle Kohleökonomie, in den USA konsumiert eine mobile Wohlstandsgesellschaft mit mäßiger Effizienz sehr viel Erdöl und elektrischen Strom. Die wichtigste Information aus der Abbildung aber ist die enorme Diskrepanz bei den CO₂-Emissionen zwischen "Nord" und "Süd", auf die noch eingegangen wird. Nur soviel vorweg: Wie die Verhandlungen im Rahmen des Intergovernmental Negotiating Commit-

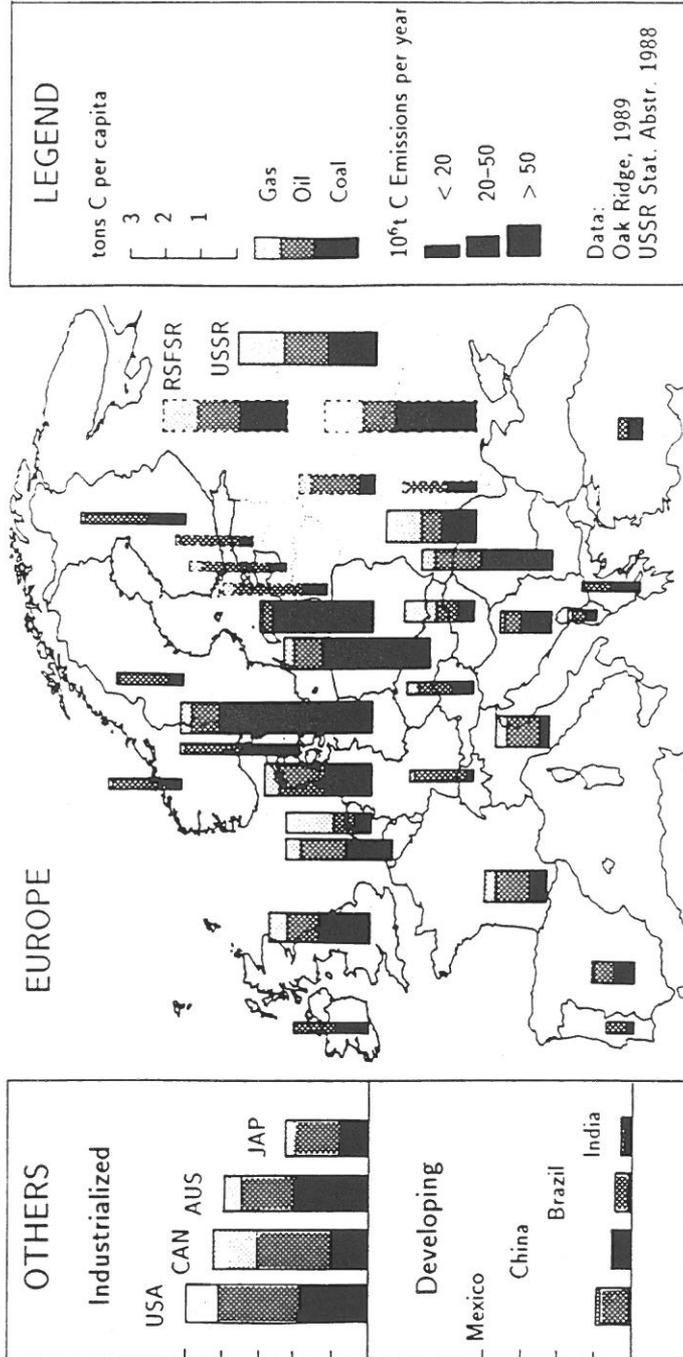


Abbildung 2. Energiebedingte Kohlenstoffemissionen pro Kopf der Bevölkerung in ausgewählten Ländern, unterschieden nach Herkunft der Emissionen (Kohle, Erdöl, Erdgas) und nach drei Klassen, abhängig von der absoluten Höhe der Emissionen. In Tonnen Kohlenstoff pro Kopf im Jahre 1988. Quelle: Grübler, 1991.

tee (INC) über eine Klimakonvention in den Jahren 1991-92 und die United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) in Rio de Janeiro im Jahre 1992 gezeigt haben, erschwert diese Diskrepanz internationale Übereinkünfte zum Klimaschutz erheblich. Diese Nord-Süd-Ungleichgewichte werden besonders bei den nicht-energiebedingten CO₂-Emissionen (d.h. aus Landnutzungsänderungen) besonders deutlich. Deren Beitrag zur CO₂-Problematik läßt sich mit Hilfe eines sehr detaillierten Modells über den Kohlenstoffkreislauf der Biosphäre ermitteln, das Esser (1989) u.a. am IIASA entwickelt hat. Es zeigt für das Jahr 1980 den globalen biosphärischen Kohlenstoffkreislauf und seine Veränderungen, gemessen in Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter. Das Modell zeigt eine positive Bilanz des Kohlenstoffflusses, d.h. Kohlenstoffspeicher werden aufgelöst (z.B. bei Brandrodung wird CO₂ durch Verbrennen der Biomasse aber auch nachfolgend aus dem Boden frei) und ihr Inhalt wird als CO₂ in die Atmosphäre entlassen. Dabei zeigt sich, daß nicht nur Brasilien eine Hauptquelle der Emissionen ist, sondern daß dieses Phänomen in vielen Entwicklungsländern weitverbreitet ist. Aber es gibt nicht nur Einträge in die Atmosphäre, sondern auch eine negative Bilanz durch Bindung von CO₂ in Biomasse und erhöhte Kohlenstoffbindung im Boden: z.B. durch Aufforstung, aber auch möglicherweise durch verstärktes Pflanzenwachstum auf Grund erhöhter CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (Düngeeffekt). Diese Stärkung der Kohlenstoffsinken macht das Bild kompliziert, da ein und dasselbe Land sowohl Regionen mit Freisetzung von CO₂ (Quellen) als auch mit einer erhöhten Bindung von Kohlenstoff in Biomasse (Senken) aufweisen kann (vgl. Esser, 1989, und IIASA, 1991). Allerdings hängt die positive Seite der Bilanz von spezifischen Modellannahmen ab, insbesondere über den CO₂-Düngeeffekt. All dies demonstriert, wie schwierig es ist, genau festzustellen, welche Netto-Emissionen denn nun ein Land freisetzt, da man Quellen und Senken bestimmen muß. Obwohl diesbezügliche nationale Inventare fester Bestandteil der in Rio unterzeichneten Klimakonvention sind, dürfen doch die erheblichen Schwierigkeiten der Bilanzierung von Emissionen nicht unterschätzt werden, vor allem da der Kohlenstoffkreislauf weiterhin wissenschaftlich nur ungenügend verstanden wird. Ganz schwierig würde diese Bilanzierung, wenn der Fluß von CO₂ zwischen der Atmosphäre und dem großen Kohlenstoffspeicher Ozean (Tiefsee) einbezogen würde.

Die Zukunft der anthropogenen CO₂-Emissionen

Wenden wir uns der Zukunft des Energiesektors und damit eines gewichtigen Teils der anthropogenen CO₂-Emissionen zu. Abbildung 3 zeigt eine Reihe von Szenarien der energiebedingten CO₂-Emissionen. "Business-as-usual"-Szenarien wie sie etwa

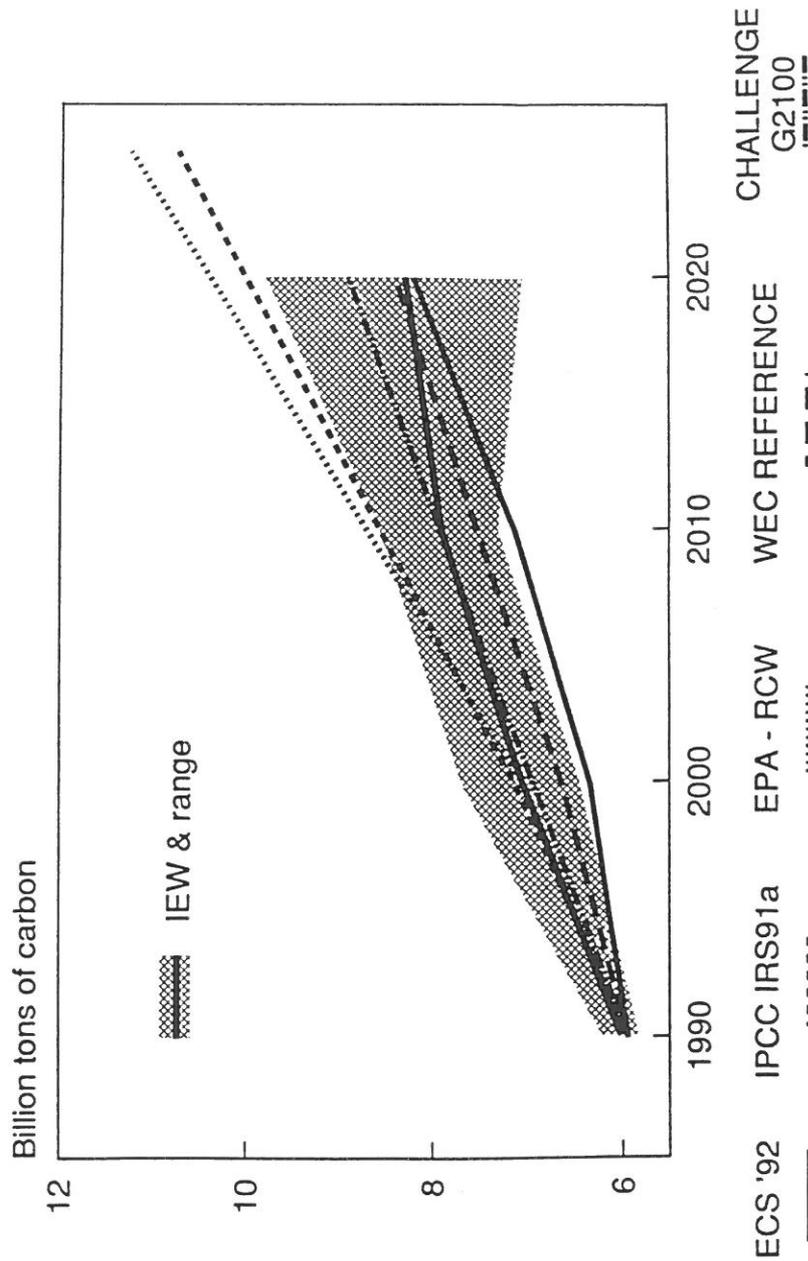


Abbildung 3. Szenarien globaler Kohlenstoffemissionen des Energiesektors 1990-2025: Intergovernmental Panel on Climate Change (IRS91a), U.S. Environmental Protection Agency (Rapidly Changing World, RCW), World Energy Council (WEC Reference), Median und Bandbreite (+/- eine Standardabweichung) der vom International Energy Workshop (IEW) analysierten Prognosen und zwei am IASA entwickelte Szenarien: ECS'92 (basierend auf einem Optimierungsmodell) und G2100 (basierend auf einem makroökonomischen Modell). Quelle: Manne und Schratzenholzer, 1993.

im Rahmen des IPCC (1990, und 1992) oder von der US- Umweltbehörde EPA (1990) entwickelt wurden, nehmen einen starken Anstieg der globalen Emissionen bis ca. 10 Gt im Jahre 2020 an. Welcher Wert nun kommt solchen Szenarien zu, geben sie aus heutiger Sicht den Trend des globalen Energiesystems richtig wieder? Wir haben diese "business- as-usual"-Szenarien mit Hilfe einer Expertenbefragung auf seine Zuverlässigkeit hin überprüft. Dabei können wir uns auf die Erkenntnisse des International Energy Workshop (Manne und Schrattenholzer, 1992) stützen, in dessen Rahmen ca. 200 Experten ihre Energieszenarien entwickeln. Diese individuellen Abschätzungen wurden analysiert und statistisch bearbeitet. Der verschattete Bereich in der Abbildung deutet den Median plus/minus einer Standardabweichung an, der sich für die globalen CO₂-Emissionen aus diesen Szenarien ergibt. Dieser Bereich zeigt also gewissermaßen den Konsensus der Energieexperten über den wahrscheinlichen Anstieg der CO₂-Emissionen auf. Szenarien, die etwa am IASA (ECS'92, cf. Nakicenovic et al., 1993) oder im Rahmen des World Energy Council (WEC, 1992) entwickelt wurden oder aus einer Reihe nationaler Energie- und CO₂-Minderungsmodellrechnungen im Rahmen des CHALLENGE Projektes (Manne und Schrattenholzer, 1993) am IASA abgeleitet wurden, bewegen sich ebenfalls im Bereich des IEW Medians von rund 8-9 Gt im Jahre 2020.

Alle Szenarien sind sich also einig, daß, wenn keine gravierenden Maßnahmen zur CO₂-Minderung ergriffen werden, die Kohlenstoffemissionen aus dem Energiesektor weiterhin steigen werden. Allerdings ist es wichtig festzuhalten, daß die im Zuge der CO₂-Modellierung erstellten "business-as-usual"-Szenarien des IPCC eher zu hoch gegriffen erscheinen: sie stellen keine Szenarien der Fortschreibung historischer Trends sondern eher Szenarien der Stagnation (fast keine Verbesserungen der Energieeffizienz) und des völligen Außerachtlassens ökologischer Gesichtspunkte dar. Im Gegensatz dazu basieren Szenarien wie etwa ECS'92 oder des WEC auf der Idee des "dynamics-as-usual", d.h. es wird angenommen, daß langfristige Trends in der Verbesserung der Energieeffizienz und des Strukturwandels in der Wirtschaft und des Energieversorgungsystems weitergehen werden. Nicht unbedingt rascher, aber auch nicht langsamer als in der Vergangenheit. Obwohl niedriger als vergleichbare IPCC-Szenarien, ergeben auch diese Szenarien - die im Referenzfall (Abbildung 3) keine massiven Eingriffe zur Klimavorsorge unterstellen - einen Anstieg der Emissionen und damit der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.

Die Forschungstätigkeit einer Reihe von nationalen und internationalen Gruppen beschäftigt sich daher mit den Möglichkeiten, die Wachstumsraten der Emissionen zu reduzieren, bzw. die Realisierbarkeit und Kosten einer langfristigen Stabilisierung, bzw. absoluten Reduktion der globalen Emissionen zu untersuchen.

Szenarien und Kriterien zur Emissionsminderung

Diskussionen über Strategien zur Emissionsminderung, bzw. der Verteilung der daraus resultierenden Lasten (Emissionsreduktionen und/oder Kosten) beginnen oft mit normativen Ansätzen: wer darf wann wieviel emittieren? Daraus ergeben sich Szenarien für die regionale und länderspezifische Aufteilung der (Reduktion von) CO₂-Emissionen bzw. des noch erlaubten Zuwachses. Ein zweiter Ansatz basiert nicht auf dieser normativen Grundlage sondern auf konventionellen Energieszenarien, aus deren Ergebnissen abgeleitet wird, in welchen Ländern die energiebedingten CO₂-Emissionen voraussichtlich bis auf welche Höhe anwachsen werden, bzw. unter welchen Bedingungen und zu welchen Kosten Emissionen gemindert werden können. Solche Abschätzungen beruhen auf einer Reihe von Szenarioannahmen, etwa über die Verfügbarkeit von Technologien zur Emissionsminderung. Dabei wird nach einem globalen Kostenminimum gesucht, damit vorgegebene Grenzwerte der globalen CO₂-Emissionen, bzw. der Emissionsreduktion mit den kostengünstigsten Technologien in den am besten geeigneten Ländern erreicht werden. Vielfach wird auch eine Kombination mit normativen Szenarien untersucht, etwa wenn man unterstellt, daß nach einem vorgegebenen Verteilungsschlüssel Ländern Emissionsrechte zugestanden werden, die dann frei gehandelt werden können, um ein gegebenes Reduktionsziel (ausgedrückt in einer beschränkten Ausgabe von Emissionsrechten) auf kostengünstigste Weise zu erreichen.

In allen Untersuchungen zur Emissionsminderung stehen vor allem die weitere Steigerung der Energieeffizienz sowie die Verringerung der Kohlenstoffintensität des Energiesystems ("Entkarbonisierung") im Mittelpunkt. Hierbei sind insbesondere die Möglichkeiten und Beschränkungen der Diffusion (Ausbreitung) von neuen Technologien, die zu dieser Effizienzsteigerung bzw. zur Verringerung der Kohlenstoffintensität des Energiesektors beitragen können, näher zu untersuchen. Diesbezüglich können vor allem frühere Arbeiten des Technology Economy Society Programm des IASA zur Technologiediffusion (Nakicenovic und Grübler, 1991) herangezogen werden. Dabei wird immer deutlicher, daß es nicht die technologischen Aspekte sind, die in Zukunft die größten Schwierigkeiten bei der Verringerung der CO₂-Emissionen bringen werden, sondern soziale/gesellschaftliche Strukturen und Prozesse. Denn soziales Verhalten bestimmt Akzeptanz (oder Ablehnung) neuer Technologien und die Art der Nutzung von Technologien und damit den Grad der Realisierung theoretisch vorhandener Energiesparpotentiale, bzw. Durchsetzbarkeit und Effektivität politischer und ökonomischer Lenkungsinstrumente.

Speziell in den Industrieländern bestimmt in einem immer größer werdenden Ausmaß die Art und Weise der Nutzung von Technologien über die Höhe der Emissionen, nicht aber die Technik selbst. Dazu zwei Beispiele: Ein Auto kann durch technische Verbesserungen energieeffizienter werden, also weniger Kraftstoff bezogen auf eine zurückgelegte Strecke und ein transportiertes Gewicht verbrauchen. Aber wenn immer weniger Passagiere in einem Auto sitzen, weil jeder sein eigenes Fahrzeug fährt, und somit pro Passagierkilometer mehr Fahrzeugkilometer zurückgelegt werden, gehen die Emissionen nicht zurück, sondern sie nehmen zu. Das technische Einsparpotential ist durch Verhaltensänderung aufgezehrt. Würden die Menschen wieder mehr gemeinsam fahren, verschöbe sich das Bild zum Positiven. Dem stehen aber oft objektive und subjektive Hindernisse im Wege.

Es ist auch bekannt, daß der Energiewirkungsgrad vieler Technologien in den ehemaligen Planwirtschaften deutlich geringer als in Westeuropa ist: so brauchen Autos und Busse deutlich mehr Kraftstoff als vergleichbare Modelle z.B. in Deutschland. Trotzdem ist aber der energetische Gesamtwirkungsgrad zur Bereitstellung von Dienstleistungen (wie Personentransport) höher. Dieses "Paradoxon" erklärt sich daraus, daß in den ehemaligen Planwirtschaften kollektive Formen der Technologienutzung (wie etwa Fernwärme oder öffentliche Verkehrsmittel) überwiegen, die die geringere Effizienz von Einzeltechnologien mehr als ausgleichen. Plakativ ausgedrückt: auch ein noch so ineffizienter Bus in Moskau ist ein energieeffizienteres Personentransportmittel als ein sparsamer PKW in Frankfurt. Für die Zukunft ist eine Erosion der kollektiven Formen der Technologienutzung und Dienstleistungsbereitstellung in Zentral- und Osteuropa zu erwarten. Auch wenn deutlich energieeffizientere Technologien zur Anwendung gelangen, könnte doch eine Änderung von der kollektiven hin zur individuellen Form der Technologienutzung zu einer deutlichen Steigerung der Energienachfrage und damit der CO₂-Emissionen, speziell im Transportsektor, führen.

Ein weiterer Aspekt bei der Untersuchung der künftigen Kohlenstoffemissionen sind ihre Veränderungsrate, also der Zuwachs an CO₂-Ausstoß bezogen auf einen Zeitraum. Gegenstand dieser Untersuchungen ist es zum Beispiel, herauszufinden, wie stark die Veränderungsrate im Energiesektor und bei den Emissionen in verschiedenen Szenarien sind, und wie sich diese mit langfristigen historischen Trends vergleichen, um festzustellen, ob und wie weit z.B. normative Vorstellungen zur Emissionsreduktion von den langfristig beobachteten Trends abweichen. Daraus lassen sich zumindest indirekte Hinweise auf die Schwierigkeiten bzw. auf die notwendigen Maßnahmenbündel in der Energiepolitik ableiten, die auftreten bzw. die eingesetzt werden müssen, um etwa ein vorgegebenes Emissionsreduktionsziel vielleicht doch noch zu

erreichen. Wir bekommen also Hinweise auf die erforderliche Breite, Tiefe und Dauer politischer, wirtschaftlicher und technischer Maßnahmen.

Emissionsminderung aus der Nord-Süd-Perspektive

Der Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen sind in der Welt sehr unterschiedlich. Deshalb ist auch der Beitrag einzelner Regionen und Länder zu möglichen Klimaveränderungen sehr verschieden. Das gilt nicht nur für die Gegenwart, sondern insbesondere auch für die Vergangenheit. Entsprechende Berechnungen (Grübler und Nakicenovic, 1992) zeigen, daß die entwickelten Länder (aus Ost und West) seit dem Jahre 1800 etwa 84 Prozent der energiebedingten CO₂-Emissionen freigesetzt haben, während auf die heutigen Entwicklungsländer nur 14 Prozent entfallen. Im krassen Gegensatz dazu stehen deren respektiven Anteile an der Weltbevölkerung: Kumuliert man die Bevölkerungszahlen seit 1800, so lebten und leben in den Industriestaaten 30 Prozent und in den Entwicklungsländern 70 Prozent aller Menschen. Würden die Entwicklungsländer dem historischen Emissionspfad der Industrieländer folgen und im Zuge ihrer wirtschaftlichen Entwicklung ähnliche Mengen CO₂ in die Atmosphäre abgeben, wäre das resultierende Emissionsszenario aus ökologischer Sicht wohl untragbar. Andererseits verweisen die Entwicklungsländer zu Recht auf die Tatsache, daß es in erster Linie die Industrieländer sind, die im Zuge ihrer wirtschaftlichen Entwicklung einen Großteil der Emissionen verursacht haben und somit sowohl finanziell wie technologisch in ungleich besserer Lage sind, Maßnahmen zur Emissionsreduktion zu setzen.

Nach welchen Kriterien sollen nun zukünftige Emissionsrechte, bzw. Reduktionsmaßnahmen auf Staaten und/oder Menschen verteilt werden? Dazu gibt es eine Reihe von Vorschlägen (Subak und Clark, 1990, Epstein und Gupta, 1990, Grübler und Fujii, 1991, Grubb et al., 1992, Simonis, 1992): Ein erster lautet, daß jeder Mensch ein gleiches Recht auf Emissionen hat. Daraus folgt, daß die Menschen aus dem Norden einen großen Teil ihrer Emissionsrechte an den Süden abtreten müßten. Der zweite Vorschlag bindet das Kriterium für die Emissionsminderung an die historische Verantwortung, also den Beitrag zur Konzentrationserhöhung (z.B. seit dem Jahre 1800). Auch in diesem Fall entfielen der größte Teil der Reduktionsbürde auf die Industrieländer. Eine dritte Möglichkeit bestünde darin, vom Status quo auszugehen, also bestehende "Rechte" unangetastet zu lassen und die Staaten zu proportionalen Reduktionen bezogen auf ein Jahr zu verpflichten. Natürlich wird dieses Kriterium bei den Entwicklungsländern keine Zustimmung finden, da es "Ungerechtigkeiten in alle Ewigkeit fortschreibt". Welches dieser Kriterien, das der globalen Egalität, der histori-

schen Verantwortung oder des gewachsenen Status Quo, ausgewählt werden sollte, kann und soll die Natur- oder Wirtschaftswissenschaft nicht entscheiden. Hier ist eine politische, ethische und philosophische Diskussion im Rahmen des nationalen und des internationalen Entscheidungsfindungsprozesses zu führen. Der Beitrag der Wissenschaft kann aber darin bestehen, die Voraussetzungen und Implikationen verschiedener Kriterien offenzulegen. Mit Hilfe eines "Parametric Framework", also einer Software, die mit vielfältigen Datensätzen und verschiedenen Modellannahmen arbeitet, wurden die Implikationen verschiedener Kriterien quantitativ untersucht (Grübler und Nakicenovic, 1992). Einiger dieser Ergebnisse sind in der Abbildung 4 zusammengefaßt, wobei die Situation der OECD und der Entwicklungsländer (d.h. unter Ausschluß der ehemaligen Planwirtschaften Mittel- und Osteuropas) illustriert wird. Ausgehend von den Emissionen des Jahres 1990, wird zuerst ein Referenzszenario bis zum Jahr 2020 entwickelt. Wie ersichtlich, unterstellt dieses ECS'92 genanntes Szenario (Nakicenovic et al., 1993) nur geringes Wachstum der energiebedingten CO₂-Emissionen in den OECD-Ländern, bei gleichzeitigem rapidem Wachstum (fast einer Verdreifachung über dreißig Jahre) in den Entwicklungsländern. Global würden in einem solchen Szenario die Emissionen um ca. 35 Prozent zunehmen. Um etwa die Emissionen auf dem Stand 1990 zu stabilisieren, müßten also die Emissionen entsprechend reduziert werden. Im ersten Fall wird eine gleiche prozentuelle Reduktion der Emissionen (des Jahres 2020) in allen Regionen/Ländern unterstellt. Eine solche Reduktion wäre z.B. durch Einführung einer CO₂-Steuer von rund 170 US-Dollar/Tonne Kohlenstoff in den OECD-Ländern und dem halben Satz in den Entwicklungsländern erreichbar, wie entsprechende Modellrechnungen am IIASA gezeigt haben (Messner und Strubegger, 1991). Zum Vergleich: die vieldiskutierte kombinierte Energie- und CO₂ Steuer der Kommission der Europäischen Gemeinschaften bewegt sich ungefähr auf der Hälfte des Niveaus, das in den Modellrechnung für die OECD-Länder unterstellt wurde.

Gleichzeitig wird aber auch deutlich, daß Kriterien der historischen Verantwortung oder der Egalität zu einer Umverteilung der Emissionen führen würden, die mit herkömmlichen wirtschafts- und energiepolitischen Instrumentarien kaum, oder praktisch überhaupt nicht erreichbar wären. Dies könnte einerseits ein Hinweis dafür sein, daß solche Kriterien wohl eher kaum im Zuge einer möglichen internationalen Übereinkunft zum Tragen kommen werden, bzw. auf alle Fälle neuartige institutionelle Lösungen (wie dem globalen Handel von Emissionsrechten und Zertifikaten) erfordern würden, um politisch wie wirtschaftlich realisierbar zu sein. Solche Überlegungen belegen auch die ungeheure Komplexität (und Langwierigkeit) internationaler Verhandlungen zur Klimavorsorge. Alle maßgeblichen Größen der Gleichung sind momentan wissenschaftlich entweder unbestimmt (wie etwa ein global zulässiger Grenzwert der CO₂-Emissionen) oder nur in einem politischen Entscheidungsfindungsprozeß

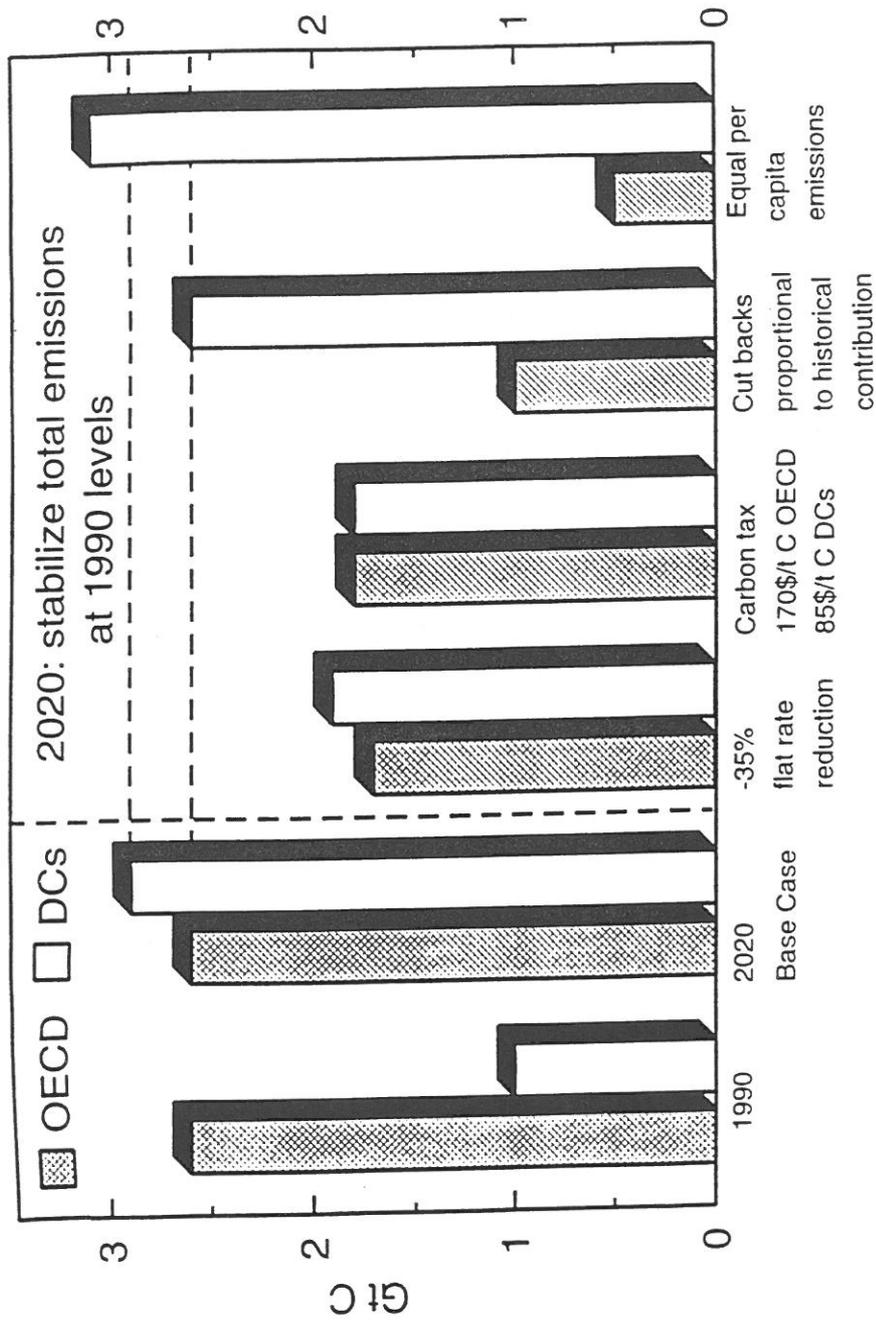


Abbildung 4. Kohlenstoffemissionen des Energiesektors 1990-2020 in den OECD- und den Entwicklungsländern, basierend auf dem ECS'92- Szenario (Nakicenovic et al., 1993), sowie Auswirkungen unterschiedlicher Emissionsallokationskriterien (Grübler und Nakicenovic, 1992) zur Stabilisierung der Emissionen im Jahr 2020 auf dem Niveau von 1990 und Vergleich zu den Auswirkungen einer Kohlenstoffsteuer von 170 \$/Tonne in der OECD und 85 \$/Tonne in den Entwicklungsländern (Messner und Strubegger, 1991).

zu entscheiden (wie etwa ein bindendes Allokationskriterium, oder Umfang und Ausmaß von technischen und wirtschaftlichen Maßnahmen zur Emissionsminderung). Gleichzeitig gibt es auch starke Wechselbeziehungen zwischen den Faktoren, den politischen und wirtschaftlichen Akteuren, aber auch der Wissenschaft (wie etwa die überraschende Erkenntnis der "Treibhausgasneutralität" zukünftiger FCKW-Reduktionen gezeigt hat). Angesichts der Komplexität dieser Faktoren muß doch darauf hingewiesen werden, daß die in Rio unterzeichnete Klimakonvention einen überaus respektablen Erfolg darstellt und auch in Hinblick auf die Tatsache, daß der Treibhauseffekt erst kurze Zeit internationale Aufmerksamkeit erregt, wohl als einzigartiges Beispiel der (raschen) Reaktion der internationalen Staatengemeinschaft zu gelten hat.

Möglichkeiten und Grenzen der Technik

Was können Technik und Wirtschaft zur Umsetzung einer vorsorgenden Klimapolitik beitragen? Ganz generell können die Steigerung der Energieeffizienz, der verstärkte Einsatz des relativ kohlenstoffarmen Erdgases anstelle von Kohle und die Einführung von kohlenstofffreien Energieträgern wie Kernenergie oder Solarenergie die CO₂-Emissionen reduzieren (s. dazu Nakicenovic et al., 1993). Prinzipiell könnten auch Anlagen zur Abscheidung von CO₂ zum Einsatz kommen, ähnlich wie das heute bei Schwefel und z.T. auch mit Stickstoff in großen Kraftwerken geschieht. Es gibt schon Studien, die die technische Machbarkeit solcher Anlagen darlegen (z.B. Hendriks und Blok, 1992), allerdings auch auf den großen Energieaufwand zur Abscheidung von Kohlenstoff und die hohen Kosten hinweisen. Schließlich könnte die Entwaldung gestoppt und die globale Kohlenstoffsenke, z.B. durch Aufforstung oder andere Eingriffe in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf, vergrößert werden. Schließlich gibt es auch so futuristische Konzepte wie "venezianische Spiegel", das sind Verschattungssatelliten, die zwischen der Erde und der Sonne stationiert werden, um einen Teil der Sonneneinstrahlung zu reflektieren, damit die steigenden Temperaturen durch den Treibhauseffekt kompensiert werden. Ähnlichen Charakter tragen Vorschläge, Sulfat-Aerosole in die Stratosphäre zu streuen und dadurch mehr Sonneneinstrahlung zu reflektieren (zu diesen "Geoengineering" Maßnahmen s. etwa COSEPUP, 1992). Es bedarf keiner näheren Erläuterung, daß die wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen solcher Projekte völlig unbekannt sind, so daß sich die Forschung in den nächsten Jahren doch auf die eher weniger technologisch aufregenden Strategien der Verbesserung der Energieeffizienz bzw. der Verringerung der Kohlenstoffintensität des Energiesystems konzentrieren sollte.

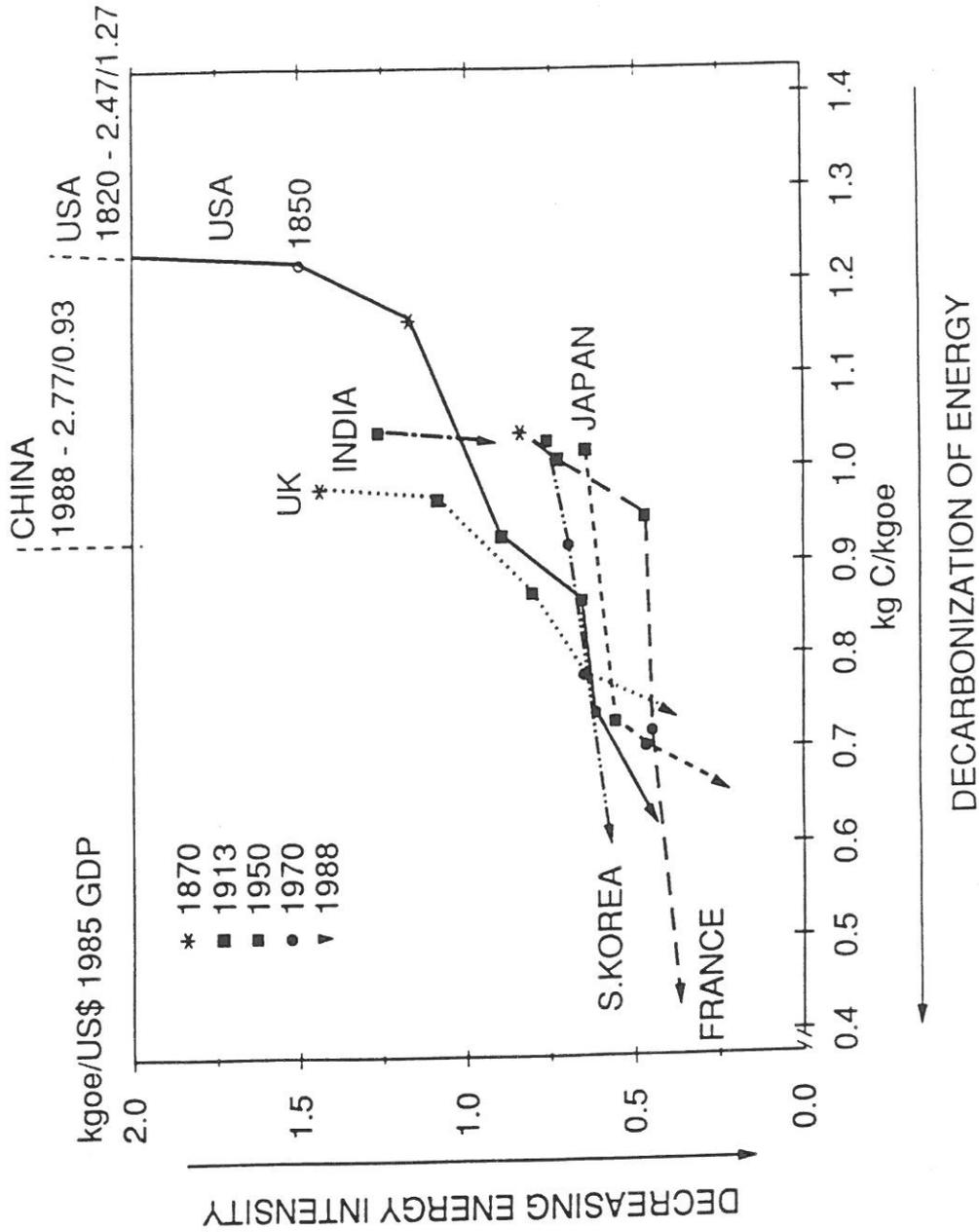


Abbildung 5. Langfristige Energie- und Kohlenstoffintensität ausgewählter Länder. In kg Öläquivalent Primärenergie pro (1985) US \$ BSP und kg Kohlenstoff per kg Öläquivalent Primärenergie. Quelle: Grübler, 1991.

Wie verlaufen die Entwicklungen den beiden zuletzt genannten Bereichen? Untersuchungen langfristiger Trends belegen, daß die Energieeffizienz schon lange steigt und die Kohlenstoffintensität des Energiesystems recht kontinuierlich abnimmt, die Menschheit also auf dem richtigen Weg ist, leider aber nicht schnell genug. Abbildung 5 zeigt für ausgewählte Länder die Kohlenstoffintensität des Primärenergieeinsatzes, d.h. der Menge an Kohlenstoff (in Kilogramm), die pro Einheit Primärenergie (Kilogramm Erdöleinheiten) abgegeben wird, sowie die Energieintensität, d.h. die Menge an Primärenergie, die benötigt wird, um eine Einheit des Bruttozialproduktes (BSP) zu produzieren. Die historische Perspektive zeigt die Tendenz der Energiesysteme in Richtung Energiesparen und Kohlenstoffarmut, allerdings auf verschiedenen Pfaden. Vergleicht man z.B. die Entwicklung Japans und Frankreichs in dem Zeitraum von 1950 bis zur Gegenwart, so verfolgte Japan hauptsächlich den Pfad der weiteren Verbesserung der Energieintensität (geringerer Energieeinsatz pro Einheit Bruttozialprodukt), beschränkt also einen Energiesparpfad, der auch die CO₂-Emissionen reduzierte. Frankreich verbesserte seine Energieintensität nicht so stark, sondern ging durch den Ausbau der Kernenergie in Richtung auf eine massive Entkarbonisierung des Energiesystems (weniger Kohlenstoff pro Einheit Primärenergieverbrauch). Dies illustriert, daß Kernenergie doch einen großen Unterschied bei den CO₂-Emissionen macht, auch wenn diese Einsicht heute nicht sehr populär ist.

Wie schnell können wir bei der Verbesserung der Energieeffizienz und der Entkarbonisierung voranschreiten? Auch hier kann die Geschichte einige Hinweise geben. Abbildung 6 zeigt, daß die Energieintensität seit Beginn der industriellen Revolution sinkt. Ursache ist die Erhöhung der Produktivität, eine Folge der Einführung neuer Technologien. Natürlich gibt es zeitweise Brüche in diesem Trend, etwa in Perioden, in denen sich die Intensität durch den massiven Aufbau neuer Infrastrukturen vorübergehend erhöht. Was die Geschwindigkeiten betrifft, so können wir für die USA eine langfristige historische Verbesserungsrate der Energieintensität von einem Prozent pro Jahr berechnen. Die Situation in anderen Ländern ist ähnlich. Erkennbar ist auch, daß sich die Raten seit der Energiekrise von 1973 mit zwei bis drei Prozent pro Jahr deutlich erhöht haben. Insgesamt aber stecken diese Veränderungsraten den Rahmen ab, in dem wir uns in einer historischen Perspektive bewegen haben und im Rahmen eines "dynamics as usual"-Szenarios bewegen werden. Die Abbildung enthüllt auch ein sehr charakteristisches Merkmal der Effizienzentwicklung, nämlich ihre Pfadabhängigkeit. Damit ist gemeint, daß der Ist-Zustand in einem Land, d.h. die Effizienz oder Ineffizienz, vom Ausgangspunkt des Landes, strukturellen Gegebenheiten und der Wahl des Entwicklungspfades abhängt. Die Tatsache, daß die USA doppelt so viel Energie pro Einheit Bruttozialprodukt konsumieren wie Japan, bedeutet

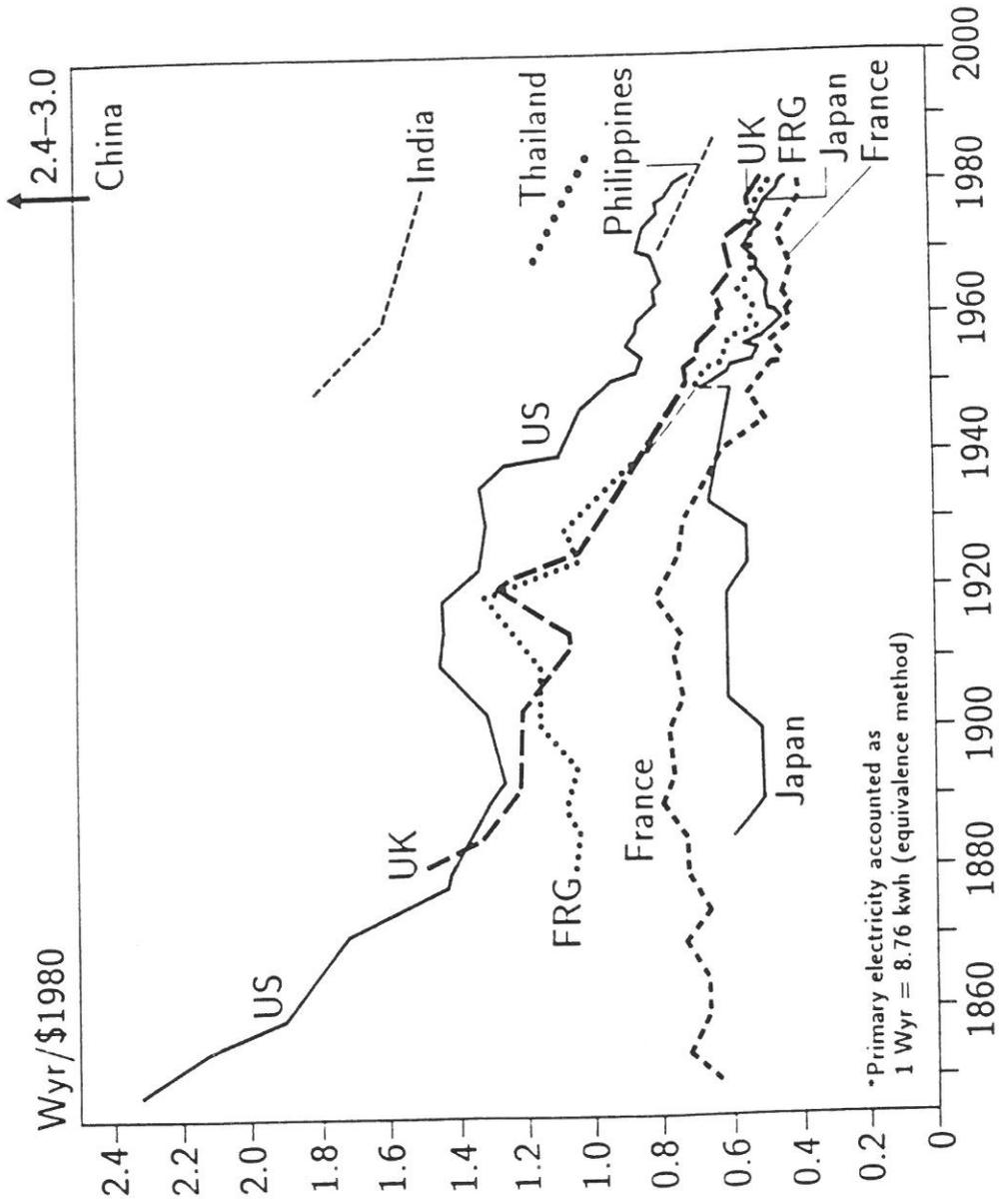


Abbildung 6. Primärenergieintensität (unter Einschluß von Brennholz) verschiedener Länder 1850-1980. In Watt-Jahren pro (1980) US \$ BSP. Quelle: Nakicenovic et al., 1993.

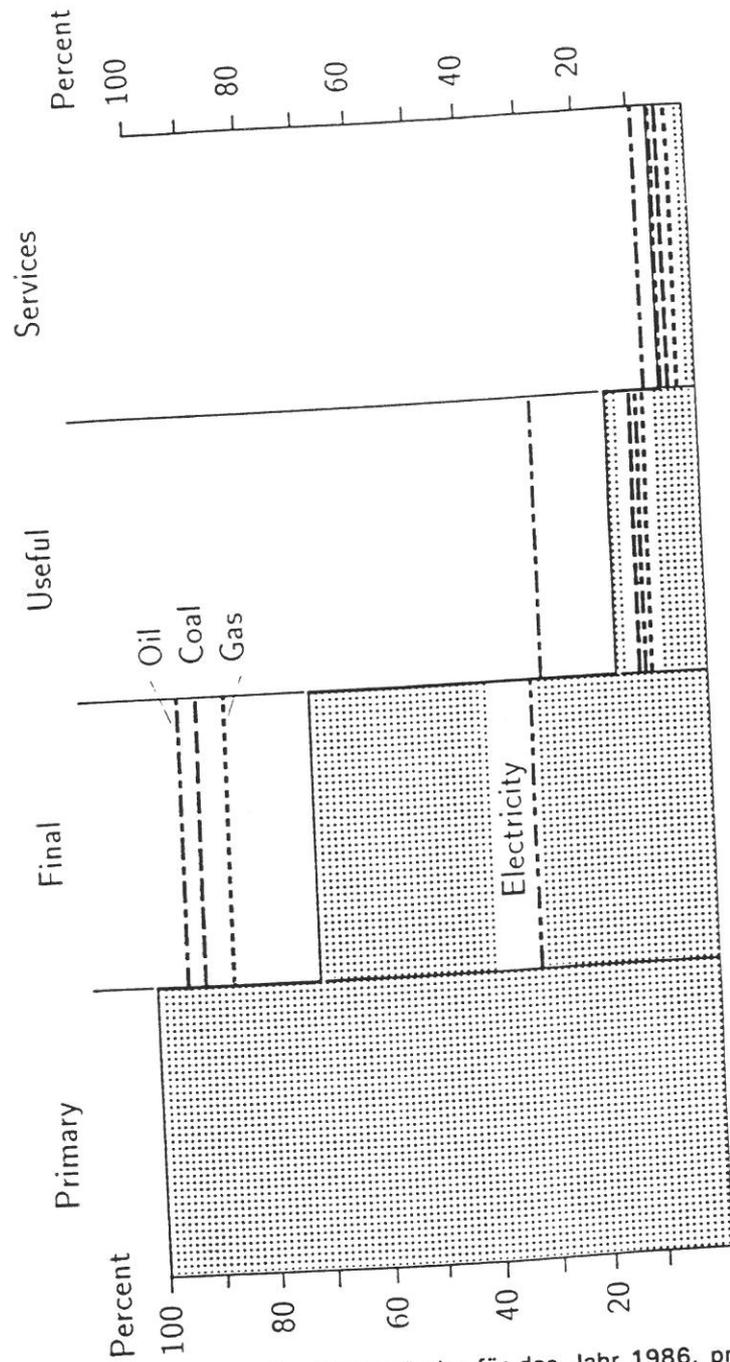


Abbildung 7. Exergiebilanz der OECD Länder für das Jahr 1986, pro Brennstoff und Durchschnitt des Energiesystems (Schraffur). In Prozent der Primärenergie, die als End- und Nutzenergie, bzw. als Dienstleistung genutzt wird. Wirkungsgrade wurden im Vergleich zum thermodynamisch erreichbaren Maximum und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen exergetischen Qualität der Brennstoffe berechnet. Quelle: Gilli et al., 1990.

nicht notwendigerweise, daß Einsparungen in den USA leichter realisiert werden können. In der Tat können wir feststellen, daß Japan bereits 1973 eines der Länder mit der effizientesten Energiestruktur war, also die niedrigste Energieintensität aufwies und trotzdem die höchsten Verbesserungsraten hatte, nämlich 3,5 Prozent pro Jahr. Für die Realisierung solcher Raten spielen die Geschichte, die räumliche und wirtschaftliche Struktur, die Konsumgewohnheiten der Bevölkerung, etc., eine maßgebliche Rolle.

Insgesamt aber stecken die Veränderungsraten von einem Prozent pro Jahr über sehr lange Zeitperioden oder von etwa zwei bis drei Prozent über kürzere Zeitperioden von etwa 20 Jahren den Bereich ab, in dem auch künftig Energieeinsparungen oder Effizienzsteigerungen liegen dürften. Dies ist inzwischen auch mehr oder weniger Konsensus in der Gemeinde der Energieexperten, wie aus den Ergebnissen des International Energy Workshop zu entnehmen ist (Manne und Schratzenholzer, 1991). Der Median der Prognosen, die im IEW untersucht wurden, bewegt sich ungefähr in der Richtung von 1 bis 1,5 Prozent jährlicher Verbesserung der Energieintensität. Die Experten erwarten also für die Zukunft etwas, was wir bei der IIASA "dynamics as usual" nennen, d.h., keine größeren Verbesserungsraten als in der langfristigen historischen Vergangenheit, aber auch keine geringeren. Wenn man dann unterstellt, daß das Bruttosozialprodukt um real zwei Prozent pro Jahr steigt, werden die CO₂-Emissionen weiterhin leicht steigen, bestenfalls stagnieren, aber sicher nicht bemerkenswert zurückgehen. Um die CO₂-Emissionen drastisch zu reduzieren, kann man sich also nicht nur auf die interne Dynamik und die autonome Verbesserung der Energieeffizienz verlassen, sondern muß gezielte Strategien in Angriff nehmen. Es ist interessant, zu untersuchen, wie weit man mit Effizienzsteigerungen theoretisch gehen könnte. Abbildung 7 gibt ein Ergebnis einer IIASA-Studie wieder (Gilli et al., 1990), in der detaillierte Energie- und Exergiebilanzen für die Länder der Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) berechnet wurden, um festzustellen, wieviel Prozent der Primärenergie genutzt werden und wieviel bei welchen Stufen der Energieumwandlung verlorengehen. In den OECD-Ländern enden 70 Prozent der Primärenergie als Endenergie, 30 Prozent gehen als Umwandlungsverluste verloren. Bei der Übergang von der End- zur Nutzenergie haben wir dann nochmals signifikante Umwandlungsverluste. Aber Energie soll ja eine Nachfrage nach Energiedienstleistungen befriedigen. Deshalb wurde auch noch der sehr schwierige und von der Datenbasis her sehr unsichere Versuch unternommen, den letzten Umwandlungsschritt zu berechnen, nämlich den von Nutzenergie in die nachgefragte Dienstleistung. Ein einfaches Beispiel: Wir fördern Rohöl, produzieren daraus Benzin, wandeln das Benzin im Motor des PKW in Nutzenergie um, also in kinetische Energie, um das Fahrzeug zu bewegen, und bei jedem Umwandlungsschritt verlieren

wir nutzbare Energie. Im letzten Umwandlungsschritt wird nun nicht mehr der energetische Umwandlungswirkungsgrad berechnet, sondern die Effizienz der Nutzung der Nutzenergie zur Bereitstellung einer nachgefragten Dienstleistung, z.B. eines Personenkilometers, bezogen auf ein unter idealen Bedingungen erreichbares Minimum (etwa ein vollbesetztes Auto, das im Vollastbereich und ohne Staus unterwegs ist).

Die in Abbildung 7 wiedergegebene Exergiebilanz zeigt, daß das Energiesystem der OECD insgesamt nur einen Effizienzgrad von fünf bis sechs Prozent hat. Das ist ein theoretischer Wert, der immer im Vergleich zum theoretisch thermodynamisch Möglichen berechnet wird. Aber trotzdem gilt, daß wir von der Thermodynamik her nur etwa ein Zwanzigstel der Primärenergie zur Bereitstellung der Dienstleistung nutzen. Der für Sozialwissenschaftler interessante Aspekt dabei ist, daß Verluste vor allem in dem Bereich zwischen End- und Nutzenergie und zwischen der Nutzenergie und der Dienstleistung am größten sind. Gerade dort verfügen wir aber über relativ wenige Daten und die Motivationsmechanismen der Menschen sind nur unzureichend verstanden: Was bringt sie z.B. dazu, ein größeres Auto zu kaufen, was bringt Menschen dazu, allein zur Arbeit zu fahren, anstatt mit einer Fahrgemeinschaft? Es sind genau diese Faktoren, die für einen Großteil der Effizienzverluste in der gesamten Energiekette verantwortlich sind.

Erdgas als Brücke zu einer Wasserstoffwirtschaft

Langfristig unterliegt das globale Energiesystem einem Strukturwandel in Richtung kohlenstoffärmerer Energieträger. Das heißt, daß die Menge an Kohlenstoff pro verbrauchter Primärenergie zurückgeht (Abbildung 8). Wir bezeichnen diesen Trend als "Entkarbonisierung" und aus der Abbildung errechnet sich eine langfristige Verbesserungsrate von 0,3 Prozent pro Jahr. Ein Hauptgrund für diesen Trend ist, daß das Verhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff zugunsten des Wasserstoffs verschoben wird, ein Trend auf den auch Marchetti (1982, 1991) immer wieder hingewiesen hat. Dieser Trend würde auf eine reine Wasserstoffzukunft hinweisen, wobei aber gleichzeitig betont werden muß, daß wir diese Zukunft durch direkte Nutzung der uns bekannten fossilen Energieträger nicht mehr gestalten können. Denn auch der Energieträger mit dem günstigsten Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff, Erdgas, enthält pro Molekül noch ein Kohlenstoffatom. Es kann nur die Brücke in eine völlig kohlenstofffreie Energiezukunft sein. Wollten wir eine Wasserstoffwirtschaft erreichen, müßte nichtfossiler Wasserstoff in das Energiesystem eingeführt werden, der langfristig nur mit Kernkraft, Fusions-, Solarenergie oder anderen CO₂-freien Energieträgern bereitgestellt werden kann.

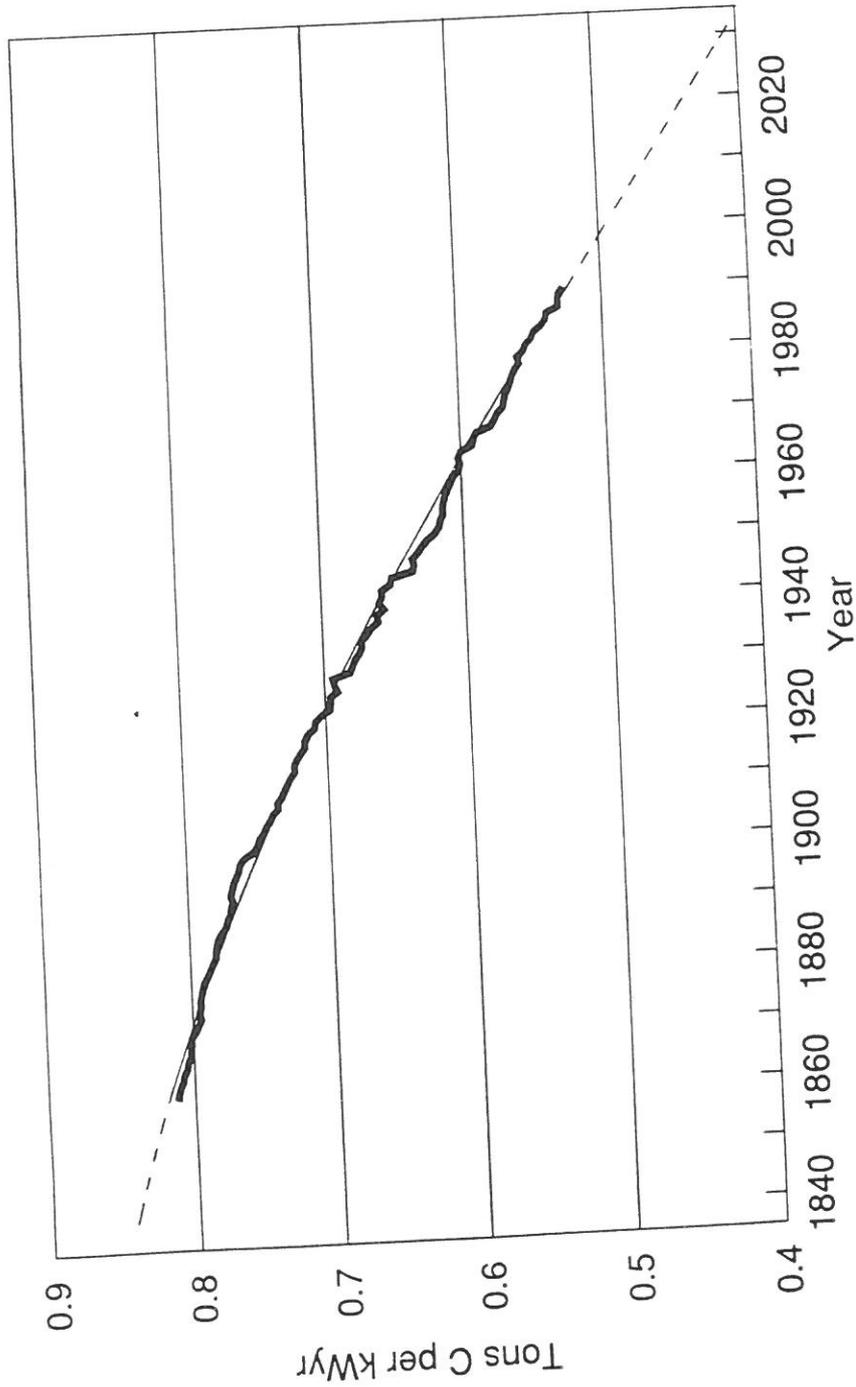


Abbildung 8. Kohlenstoffintensität der Welt-Primärenergieversorgung 1860-1990. In Tonnen Kohlenstoff pro Kilowatt-Jahren; die Trendfunktion entspricht einer Verbesserung um 0,3 Prozent pro Jahr. Quelle: Nakicenovic et al., 1993.

Angesichts dieses historischen Trends in Richtung "Entkarbonisierung" ist es interessant festzuhalten, daß die meisten globalen Referenz- Energie- und Emissionsszenarien, insbesondere auch die innerhalb des IPCC entwickelten, diesem Trend nicht Rechnung tragen, ja sogar von einer historischen Trendumkehr in Richtung kohlenstoffreicherer Energieversorgung (v.a. mehr Kohle) ausgehen: sie also nicht als "business as usual" sondern eher als "dirtier than usual"-Szenarien zu bezeichnen sind.

Oft wird die mögliche Brückenfunktion des Erdgases in eine nach-fossile Energiezukunft und damit die Möglichkeit der Substitution von Kohle und Öl durch Erdgas unterschätzt. In Ausubel et al., 1988, wurde ein Szenario entwickelt, in dem Erdgas bis zur breiten Einführung von Wasserstoff eine solche Brückenfunktion übernimmt und zum dominierenden Energieträger der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts wird. Die unterstellten Marktdurchdringungsraten für Erdgas und später von kohlenstofffreien Energieträgern lehnen sich an historisch beobachteten Veränderungsraten (Marchetti und Nakicenovic, 1979) an. Es zeigte sich, daß die atmosphärische CO₂-Konzentration auch bei einer Verdoppelung der Welt-Energienachfrage 450 ppm nicht überschreitet und auch bei einer Verzehnfachung der Energienachfrage bis zum Jahr 2100 deutlich unter 700 ppm bleibt. Dies illustriert deutlich das doch beträchtliche Potential der Strukturveränderungen unseres Energiesystems. Eine Veränderung, die, wie bereits ausgeführt, aus historischer Perspektive keineswegs eine Diskontinuität darstellt, und somit wert erscheint, näher untersucht zu werden. Die in bezug auf CO₂ positive Schlußfolgerung eines solchen Erdgas-"Brückenszenarios" wird auch davon nicht berührt, daß Methan selbst ein Treibhausgas ist. Entsprechende Sensitivitätsanalysen (Victor, 1990), die eine Leckagerate von bis zu 4 (Mittelwert: 2,5) Prozent unterstellen, belegen dies. Es gibt also durchaus ein großes Potential für die Substitution von Kohle und Erdöl durch Erdgas, das in ein kohlenstoffreies Energiesystem überleiten könnte.

Die gesellschaftliche Konditionierung der Strategien

Die große, kritische Frage ist nur, wie schnell alle diese wünschenswerten Veränderungen in Richtung verbesserter Energieeffizienz und "Entkarbonisierung" des Energiesystems durchgeführt werden können. Die mögliche Geschwindigkeit läßt sich wieder mit Hilfe eines historischen Beispiels abschätzen, nämlich der Durchdringung der Automobilflotte in den USA mit Katalysatoren (Abbildung 9). Wir sehen, daß es typischerweise zwei Dekaden dauert, um die Automobilflotte eines Landes zu ersetzen. Ähnliches beobachten wir bei vielen anderen Prozessen, ob es sich um die Lokomotivflotte der Sowjetunion oder Chinas handelt oder um Industrieprozesse.

Analysen der Altersstruktur des Kapitalstocks weisen darauf hin, daß es möglich ist, innerhalb der nächsten zwei bis drei Jahrzehnte den gesamten Kapitalstock der Industrie zu erneuern und damit effizienten Technologien im Industriebereich zum Einsatz zu verhelfen. Aber es gibt auch Veränderungsprozesse, vor allem in der Gebäudestruktur und in der Infrastruktur des Energie- und Transportsystems, die deutlich langsamere Veränderungen aufweisen. Hier sind Umschlagzeiten in der Größenordnung von 50 bis 100 Jahren typisch. Deshalb wird sich unsere Aufmerksamkeit nicht auf den Ersatz, sondern auf die möglichst effiziente Nutzung dieser bestehenden Infrastruktur konzentrieren müssen.

Aber es ist keineswegs so, daß neue Technologien immer in Richtung Einsparen, Effizienz und weniger Kohlenstoffemissionen gehen müssen, auch das Gegenteil kann der Fall sein. Falls neue Bedürfnisse in der Gesellschaft erwachsen sollten, falls neue Dienstleistungen nachgefragt werden, etwa eine Flugzeit von Tokyo nach New York innerhalb von nur zwei Stunden, und man deshalb sehr schnelle Flugzeuge einführen würde, könnten die CO₂ Emissionen durchaus signifikant ansteigen.

Energie- oder Kohlenstoffeffizienz ist für unsere Gesellschaften vielleicht nicht das wichtigste Ziel, weil Individuen und Kollektive nach anderen Kriterien entscheiden und ihr Verhalten optimieren. Die Effizienz, mit der wir Kapital, Materialien, aber auch unsere Zeit einsetzen müssen in Szenarien auch berücksichtigt werden. Ich möchte das an dem Beispiel der Freizeit und ihren Folgen illustrieren (Abbildung 10): Festzustellen sind zwei miteinander verwobene, nahezu universelle Trends, nämlich einer von unbezahlter (Hausfrau) zu bezahlter Arbeit (höhere Frauenerwerbstätigkeit) und, zweitens, ein die Geschlechter übergreifender Trend von der bezahlten Arbeit zur Freizeit. Immer mehr Zeit wird als Freizeit verbracht. Der alte Traum der Menschen, "working less and living longer" (Ausubel und Grübler, 1990), scheint sich zu verwirklichen. Zur Illustration das Beispiel eines englischen Fabrikarbeiters. Um 1850 war die durchschnittliche Lebenserwartung eines Arbeiters, wenn er zehn Jahre alt war, also die schwierige Kindheit mit der hohen Kindersterblichkeit überlebt hatte, 42 Jahre. Mit einer durchschnittlichen Lebenszeit von 52 Jahren braucht man natürlich auch kein Pensionssystem. Zieht man die Zeit des Schlafs ab, hat dieser Arbeiter ca. 75 Prozent seiner Lebenszeit am Arbeitsplatz verbracht, und nur ca. 25 Prozent zu Hause mit der Familie, mit den Kindern, oder in der spärlich bemessenen Freizeit. Heute ist die Lebenserwartung drastisch gestiegen, die Bewohner der Industriestaaten werden durchschnittlich über 70 Jahre alt und verbringen nur etwa 20 Prozent ihrer verfügbaren Lebenszeit am Arbeitsplatz, aber 80 Prozent außerhalb. Nun stellt sich die Frage, was wir außerhalb des Arbeitsplatzes mit der Freizeit anstellen.

Die Antwort darauf ist einfach: Wir nutzen sie, um u.a. auch eine Unmenge von Ener-

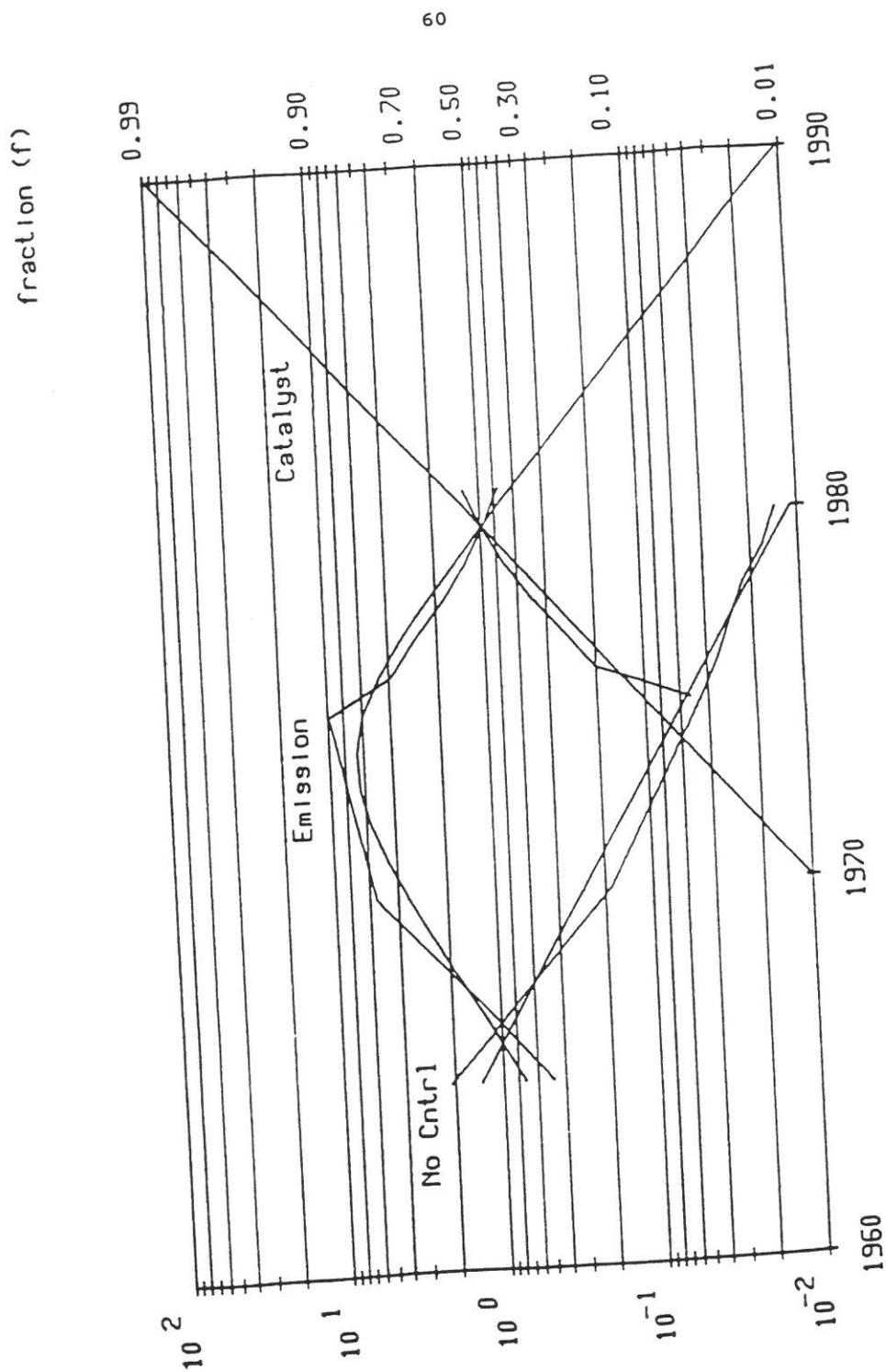


Abbildung 9. Diffusion von Autos mit ersten Emissionsschutzmaßnahmen und von Katalysatorautos in den USA. In Marktanteilen (F) an der gesamten Flotte, logit-Transformation, d.h. $\log(F/(1-F))$. Quelle: Nakicenovic, 1986.

U
A
B
b
C
C
D
F

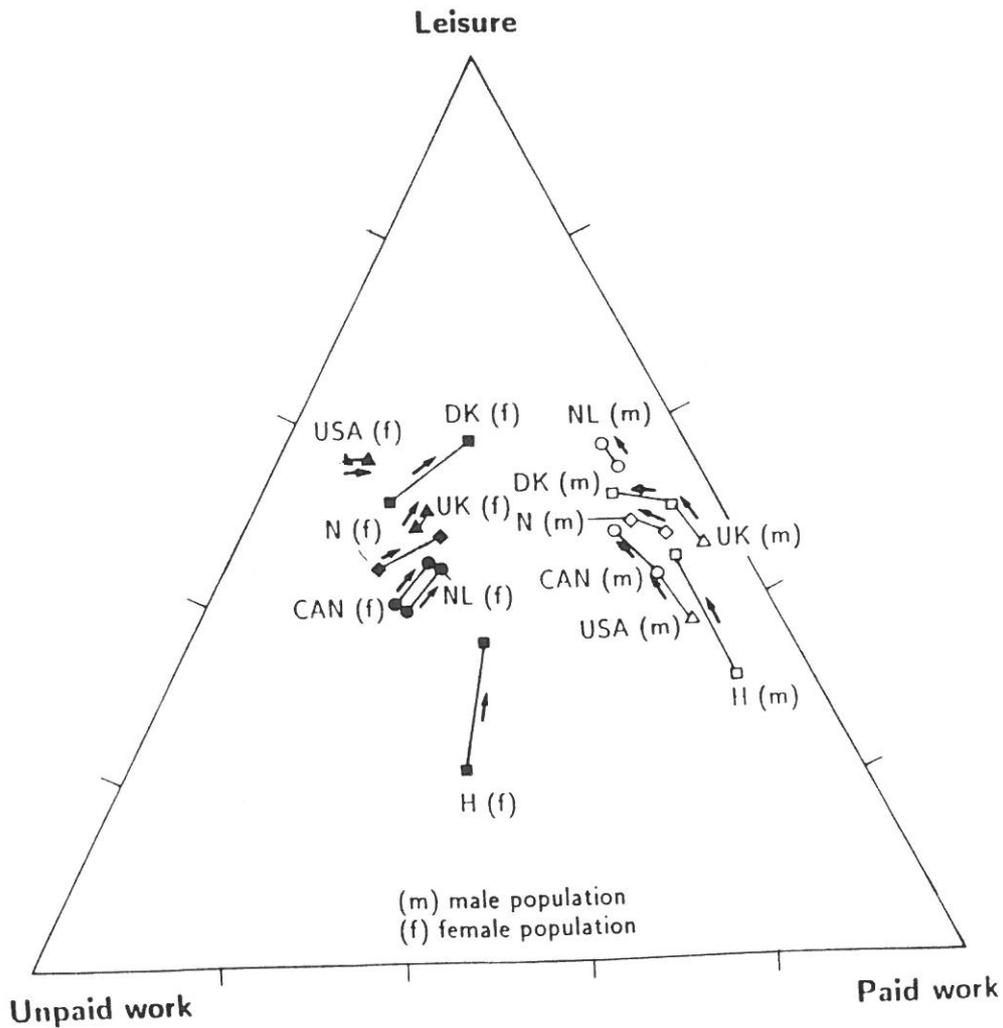


Abbildung 10. Veränderungen der Zeitbudgets der männlichen und weiblichen Bevölkerung in 7 Ländern seit den 60er Jahren. In relativen Anteilen der Zeit, die bei bezahlter, und unbezahlter (z.B. Haushalt) Arbeit, sowie als Freizeit verbracht wird. Quelle: Gershuny, 1991.

gie zu verbrauchen. Dazu ein Beispiel aus der alten Bundesrepublik (Abbildung 11): Der Endenergieverbrauch ist auf die drei Sphären unserer Gesellschaft, also die Produktionssphäre (Industrie), die Dienstleistungen bzw. Administration, und den

Privatbereich aufgeteilt. Die signifikante Verlagerung unserer Zeitbudgets aus dem Produktions- in den Privatbereich und den Konsum spiegelt sich deutlich im Energieverbrauch wieder, denn bereits 60 Prozent gehen in den privaten Endverbrauch. Dort herrschen ganz andere Entscheidungskriterien als in der Industrie und dort wären wohl auch ganz andere Lenkungsmechanismen erforderlich, wollte man den Energiekonsum und damit die CO₂-Emissionen reduzieren.

Leider fehlt uns gerade das Wissen darüber, was Menschen eigentlich dazu bringt, z.B. nach immer größerer räumlicher Mobilität zu streben. Abbildung 12 zeigt die durchschnittliche tägliche Reiseweite der französischen Bevölkerung. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts betragen sie pro Tag und pro Kopf bescheidene 20-30 Meter, heute aber sind es über 30.000 Meter. Die Streuung zwischen Ländern ist zwar beträchtlich, aber im allgemeinen Durchschnitt der Industrieländer reist ein Mensch zwischen 20 und 50 Kilometern pro Tag, also um einen Faktor 1000 mehr als vor knapp 200 Jahren. Dieser räumliche Mobilitätswachstum wurde durch immer schnellere Verkehrssysteme befriedigt, da ein knappes Zeitbudget bei Konsumenten ein sehr wichtiges Entscheidungskriterium ist. Dies treibt dann die Einführung immer neuer, schnellerer Transportmittel voran, die wiederum mehr Mobilität ermöglichen. Dieser Trend zu mehr Mobilität und damit zu höherem Energieverbrauch im Verkehrssektor ist schon deswegen wichtig, weil Verkehr, gemessen an der Zeit, die wir mit dieser Aktivität verbringen, die kohlenstoffintensivste Tätigkeit ist. So werden z.B. pro Stunde und pro Person in den USA 2,5 Kilogramm Öläquivalent im Transport verbraucht, das entspricht ungefähr einem Kilogramm Kohlenstoff, der in die Atmosphäre abgegeben wird. Natürlich steigt dieser Wert, wenn die Fahrzeuge größer und schwerer werden. Eine einfache Faustregel besagt, daß jedes Auto ungefähr sein eigenes Gewicht pro Jahr an Kohlenstoff freisetzt. Der Betrieb eines neuen Mercedes der S-Klasse oder eines vergleichbaren Autos der BMW-Serie setzt größenordnungsmäßig 2,5 Tonnen Kohlenstoff pro Jahr frei. Dies ist mehr als das Zehnfache der durchschnittlichen Pro-Kopf-Kohlenstoffemission der indischen Bevölkerung.

Ein weiteres Problem ist die Verstädterung, die wegen der räumlichen Konzentration und Dichte des Energieverbrauchs besondere Anforderungen an die Qualität der Energieversorgung stellt. Die Luftgüte in Peking oder im London der Jahrhundertwende mögen als Beispiele genügen. Abbildung 13 zeigt das Verhältnis der städtischen zur ländlichen Bevölkerung in verschiedenen Ländern aus Nord und Süd. Zwar gibt es noch Länder wie Indien und China, wo noch ca. 70 Prozent der Bevölkerung auf dem Land leben. Aber der langfristige Trend geht überall eindeutig in Richtung auf Verstädterung und dürfte in der Mitte des nächsten Jahrhunderts bei einem Zustand konvergieren, wo in dem meisten Regionen der Welt 80-90 Prozent

Ab
Bur
Sel

der
sch

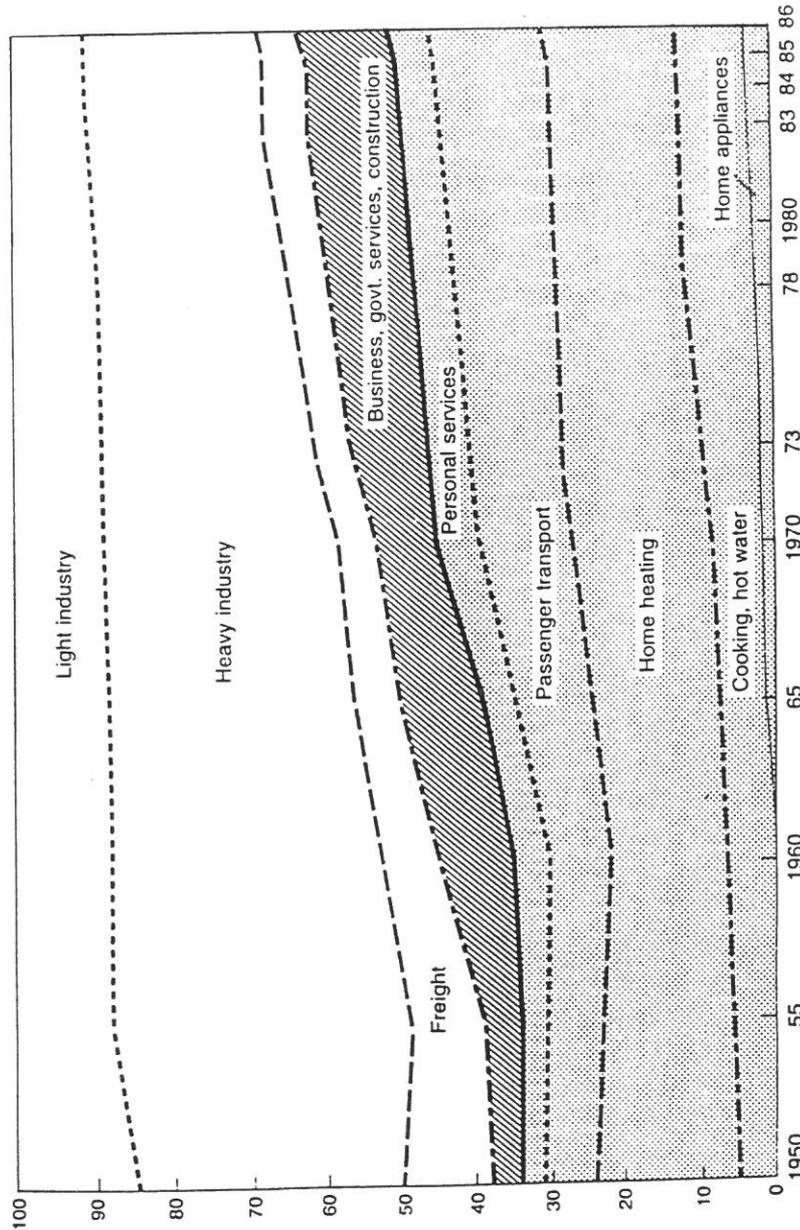


Abbildung 11. Veränderungen der Struktur der Endenergienachfrage der (alten) Bundesrepublik. In Prozent-Anteilen der Endenergienachfrage, aufgeteilt nach Sektoren und Verwendungszweck. Quelle: Schipper, 1989.

der Menschen in städtischen Gebieten leben. Die Energieversorgung solcher gigantischer Metropolen wie sie dann z. B. Mexiko City sein werden, die drei dutzend Mil-

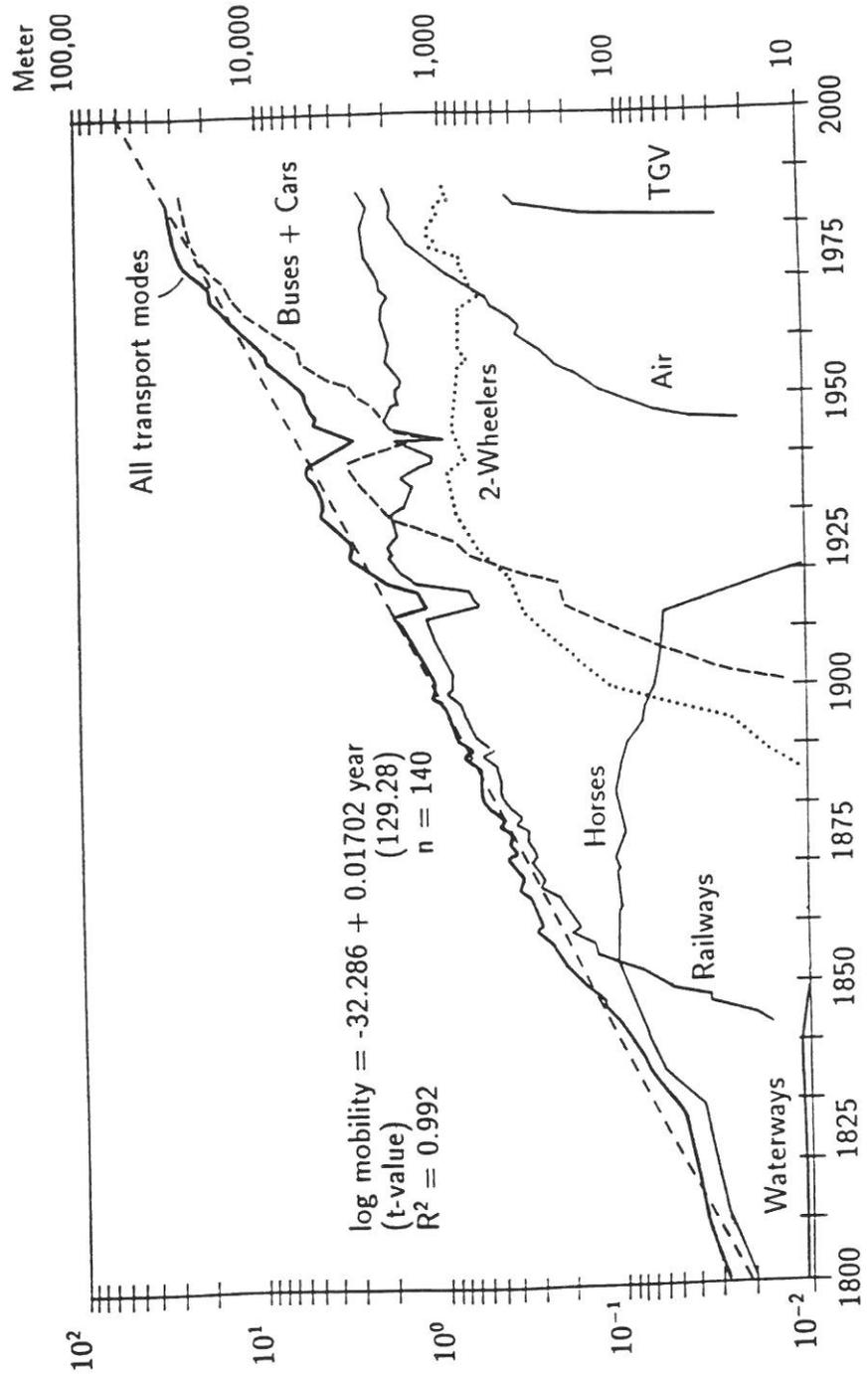


Abbildung 12. Entwicklung der individuellen Mobilität in Frankreich seit 1800. Zurückgelegte Kilometer pro Tag und Kopf der Bevölkerung, aufgeteilt nach Transportmitteln und insgesamt (unter Ausschluß fußläufigen Verkehrs). Quelle: Grübler, 1990.

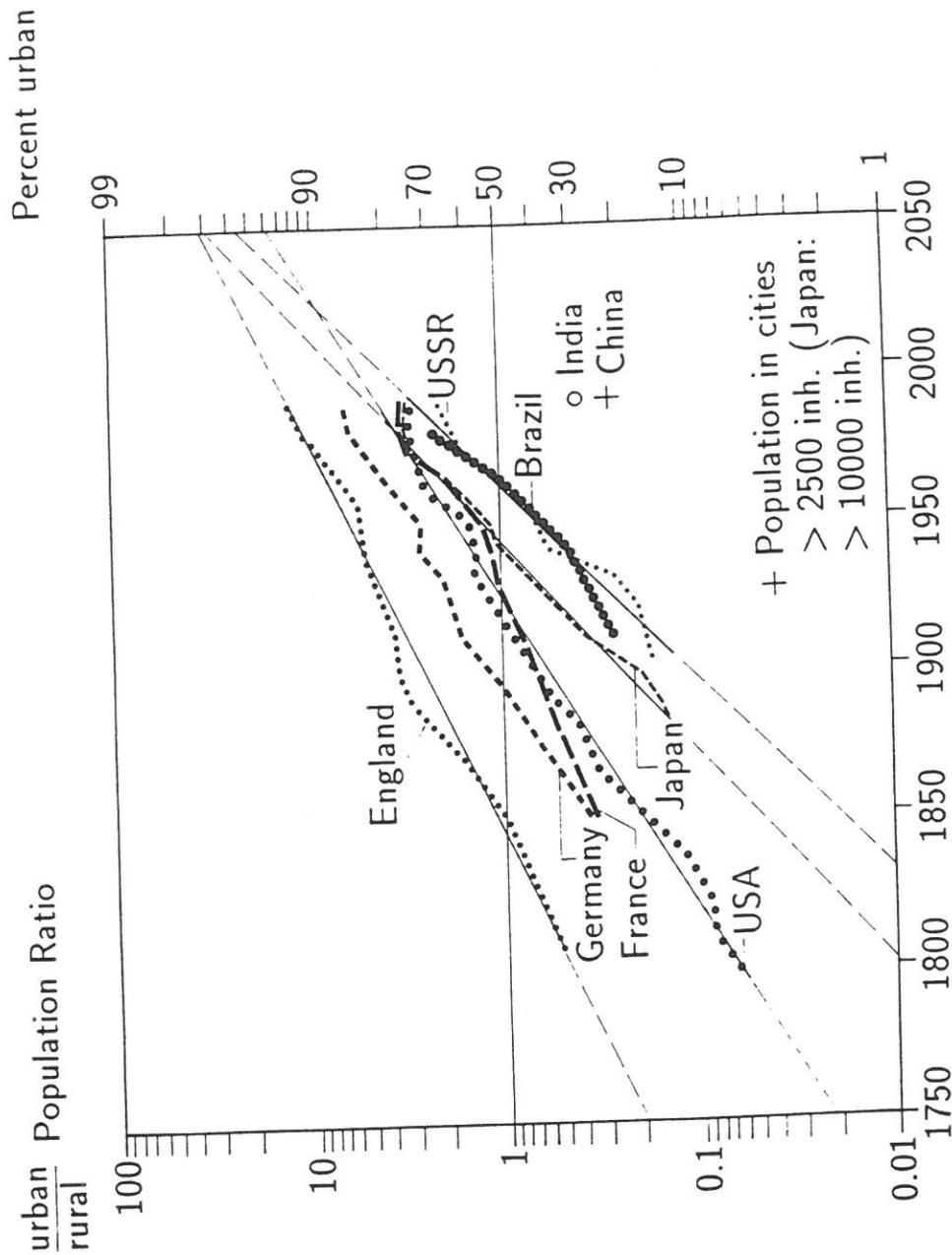


Abbildung 13. Verstädterungstrends. Verhältnis städtischer- zu ländlicher Bevölkerung in logarithmischen Maßstab. Quelle: Grübler, 1992.

tionen oder mehr Einwohner haben werden, läßt sich sicher nicht mit Brennholz, Kohle, oder dezentralen, erneuerbaren Energieträgern sichern, sondern erfordert

leitungsgebundene und in der Endanwendung saubere Energieträger wie Wasserstoff oder Elektrizität.

Ein Trend mit großer Bedeutung für den Energieverbrauch und für Emissionen ist die zunehmende weltweite Homogenisierung der Lebensstile. Abbildung 14 zeigt die Veränderungen des Ausstattungsgrades mit Haushaltsgeräten in einer Reihe von Ländern. Sie waren in den europäischen Ländern relativ gering, weil dort die Haushalte bereits weitgehend gesättigt sind. In Entwicklungsländern aber sind sehr hohe Wachstumsraten zu verzeichnen. Zu postulieren, daß die Entwicklungsländer ein anderes Konsummuster als die Industriestaaten aufweisen werden, ist angesichts solcher empirischer Hinweise kühn und bedarf einer eigenen Theorie, die ich bislang noch nicht kenne. Unsere Überlegungen sollten stattdessen auf der Hypothese der Konvergenz der Lebensstile aufbauen. Es gibt noch einen weiteren Trend, der auch von der Sozialwissenschaft noch nicht voll berücksichtigt wird: nämlich die zunehmende Konvergenz geschlechterspezifischer Konsummuster. Lange Zeit war z.B. in der (alten) Bundesrepublik der Autobesitz eine männliche Domäne (Abbildung 15). Das geht sogar soweit, daß die heute fünfzigjährigen Männer statistisch gesehen pro Kopf mehr als ein Auto besitzen. Diese Struktur ist aber dadurch in Bewegung geraten, daß der Autobesitz in der jüngeren weiblichen Bevölkerungsgruppe rasch steigt. Die Implikationen einer solchen Konvergenz des Verhaltens zwischen Männern und Frauen sind nicht unerheblich. Dann kommen auch sehr konservative demographische Prognosen auf einen Anstieg der PKW-Zahlen von heute 31 auf 45 Millionen in den nächsten Dekaden nur für das Gebiet der alten Bundesrepublik.

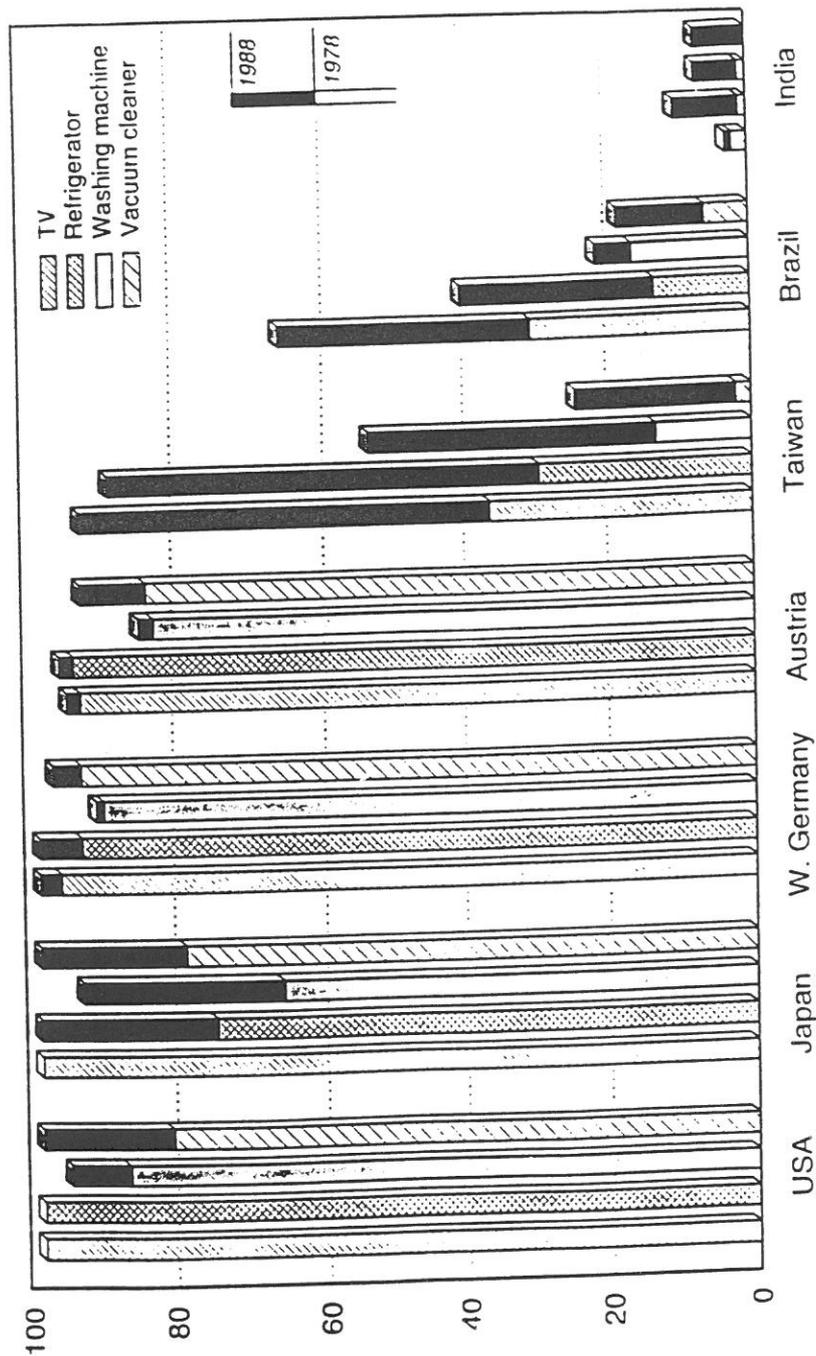


Abbildung 14. Ausstattungsgrad der Haushalte mit verschiedenen Geräten (Fernseher, Kühlschrank, Waschmaschine und Staubsauger) 1978 und 1985 in ausgewählten Ländern; der schraffierte Bereich gibt die Veränderung zwischen 1978 und 1985 an. In Prozent der Haushalte, die zumindest ein Gerät der Kategorie besitzen. Quelle: Gilli et al., 1990.

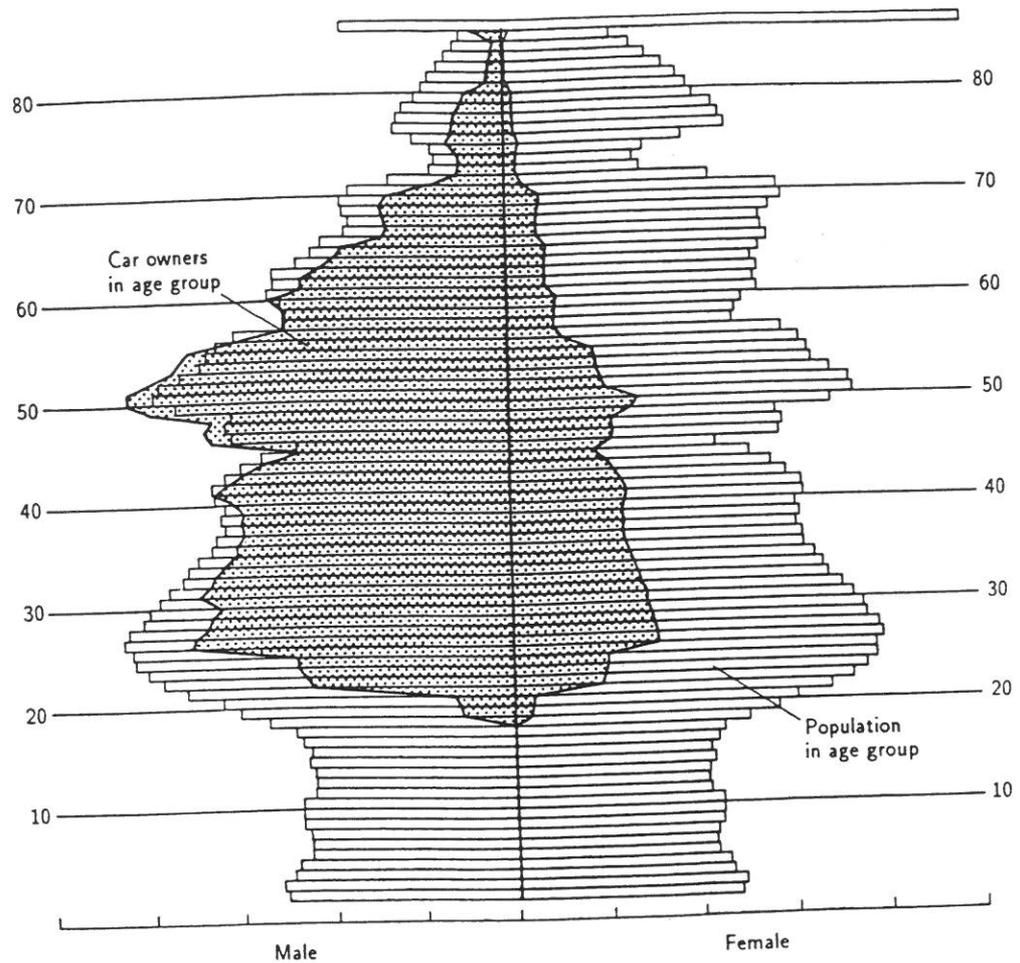


Abbildung 15. Bevölkerungspyramide und Pyramide der Autobesitzer(innen) für das Gebiet der alten Bundesrepublik im Jahre 1989. In Anzahl der Automobile, zugelassen auf verschiedene Altersgruppen und Geschlechter. Quelle: Büttner und Grübler, 1991, basierend auf ISP (Hannover) Daten.

Literatur

Ausubel, J.H., Grübler, A., Nakicenovic, N., 1988, Carbon Dioxide Emissions in a Methane Economy, *Climatic Change* 12:245-263.

Ausubel, J.H., Grübler, A., 1990, Working Less and Living Longer, mimeo, IIASA, Laxenburg, Austria.

Büttner, T., Grübler, A., 1991, The Birth of a Green Generation?, mimeo, IIASA, Laxenburg, Austria.

Committee on Science, Engineering, and Public Policy (COSEPUP) National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, 1992, Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation and the Science Base, National Academy Press, Washington, D.C.

Environmental Protection Agency (EPA), Policy Options for Stabilizing Global Climate, EPA, Washington, D.C.

Epstein, J.M., Gupta, J., 1990, Controlling the Greenhouse Effect: Five Global Regimes Compared, The Brookings Institution, Washington, D.C.

Esser, G., 1989, Global Land-use Changes from 1860 to 1980 and Future Projections to 2500, Ecological Modelling 44(1989):307-316.

Gershuny, J., 1991, Time Budget Research, paper presented at the Workshop on Social Behavior, Lifestyles and Energy Use, IIASA, Laxenburg, Austria.

Gilli, P.V., Nakicenovic, N., Grübler, A., Bodda, L., 1990, Technischer Fortschritt, Strukturwandel und Effizienz der Energieanwendung, Verbundgesellschaft, Wien.

Grubb, M., Sebenius, J., Magalhaes, A., Subak, S., 1992, Sharing the Burden, in: I.M. Mintzer (Ed.), Confronting Climate Change: Risks, Implications and Responses, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Grübler, A., 1990, The Rise and Fall of Infrastructures, Physica Verlag, Heidelberg, Germany.

Grübler, A., 1991, Energy in the 21st Century: From Resource to Environmental and Lifestyle Constraints, Entropie 164/165:29-34.

Grübler, A., 1992, Technology and Global Change: Land-use, Past and Present, WP-92-2, IIASA, Laxenburg, Austria.

Grübler, A., Fujii, Y., 1991, Inter-generational and Spatial Equity Issues of Carbon Accounts, Energy - The International Journal 16(11/12):1397-1416.

Grübler, A., Nakicenovic, N., 1992, International Burden Sharing in Greenhouse Gas Reduction, Working Paper No. 55, Environment Department, The World Bank, Washington, D.C.

Häfele, W. (Project Leader), 1981, Energy in a Finite World, a Global Systems Analysis, Ballinger, Cambridge, USA.

Hendriks, C.A., Blok, K., 1992, Carbon Dioxide Recovery Using a Dual Gas Turbine IGCC Plant, Energy Conversion and Management, Vol. 33, No. 5-8:387-396.

Houghton, R.A., Skole, D.L., 1990, Carbon, in: B.L. Turner, W.C. Clark, R.W. Kates, J.F. Richards, J.T. Mathews, W.B. Meyer (Eds.), The Earth as Transformed by Human Action, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 1991, Biosphere Dynamics, Annual Report 1990:4, IIASA, Laxenburg, Austria.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1990, *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1992, *1992 IPCC Supplement*, 7th Session, IPCC, Geneva.
- Katscher, W., 1992, *IKARUS: Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien*, Zwischenbericht für die Projektphase 2, Programmgruppe Technologiefolgenforschung, Forschungszentrum Jülich.
- Kaya, Y., Nakicenovic, N., Nordhaus, W.D., Toth, F.L. (Eds.), 1993, *Costs, Impacts, and Benefits of CO₂ Mitigation*, CP-93-2, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Manne, A., Schrattenholzer, L., with Marchant, K., 1991, *The 1991 International Energy Workshop: The Poll Results and a Review of Papers*, OPEC Review, Winter 1991 Vol.XV No.4:389-412.
- Manne, A., Schrattenholzer, L., 1993, *Global Scenarios for Carbon Dioxide Emissions*, Energy - The International Journal 1993 (forthcoming).
- Marchetti, C., 1982, *When Will Hydrogen Come?* WP-82-123, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Marchetti, C., 1991, *How to Solve the CO₂ Problem Without Tears*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 8:493-506.
- Marchetti, C., Nakicenovic, N., 1979, *The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model*, RR-79-13, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W., 1972, *The Limits to Growth*, Universe Books, New York.
- Messner, S., Strubegger, M., 1991, *Potential Effects of Emission Taxes on CO₂ Emissions in the OECD and LDCs*, Energy - The International Journal 16(11/12):1379-1395.
- Nakicenovic, N., 1986, *The Automobile Road to Technological Change*, Technological Forecasting and Social Change 29:309-340.
- Nakicenovic, N., 1992, *Decarbonizing Global Energy*, Options, Sept'92:4-11, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Nakicenovic, N., Grübler, A., 1991, *Diffusion of Technologies and Social Behavior*, Springer Verlag, Berlin.
- Nakicenovic, N. u.a., 1993, *Long-term Strategies for Mitigating Global Warming*, Energy - The International Journal, Special Issue 18(5):401-609.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 1992, *Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks*, Final Report prepared for IPCC, Revised August 1991, OECD, Paris.
- Reddy, A.K.N., Goldemberg, J., 1990, *Energy for the Developing World*, Scientific American, September 1990:110-119.
- Rogner, H.H., Nakicenovic, N., Grübler, A., 1993, *Second- and Third- Generation Energy Technologies*, Energy - The International Journal 18(5):461-484.
- Schelling, T., 1993, *Technology and Environment: Some Reflections*, mimeo, IIASA, Laxenburg, Austria.

Schipper, L., Bartlett, S., Hawk, D., Vine, E., 1989, Linking Life-styles and Energy Use: A Matter of Time? Annual Review of Energy, Vol. 14:273-320.

Simonis, U.E., 1992, Globale Klimakonvention: Konflikt oder Kooperation zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, FS II 91-404, Wissenschaftszentrum, Berlin.

Subak, S., Clark, W.C., 1990, Accounts for Greenhouse Gases: Towards the Design of Fair Assessments, in: W.C. Clark (Ed.), Usable Knowledge for Managing Global Climatic Change, SEI, Stockholm.

Victor, D., 1990, Greenhouse Gas Emissions from High Demand, Natural Gas-intensive Energy Scenarios, WP-90-01, IIASA, Laxenburg, Austria.

World Energy Council (WEC), 1992, WEC Commission Energy for Tomorrow's World, Draft Summary Global Report, 15th WEC Congress, Madrid.

IPCC
ment,
gien,
nfor-
acts,
ional
inter
mis-
urg,
onal
Lo-
to
O₂
nal
gi-
A,
r,
n-
n
d
c
r