

# Von der Lagerstätte zum Konsumenten: Langfristige Energieperspektiven

A. Grübler

Der Beitrag ist eine Kurzfassung einer gemeinsamen Studie des Weltenergieerates (WEC) und des Internationalen Instituts für Angewandte Systemanalyse (IIASA) über langfristige (2050 und danach) Energieperspektiven. Kernaussage der Studie ist, daß zukünftig Konsumenten verstärkt saubere, hochqualitative, leitungsgebundene Energieträger nachfragen werden, diese jedoch mittels unterschiedlicher unternehmerischer und technologischer Strategien und unter Heranziehung unterschiedlicher Lagerstätten bereitgestellt werden können. Die kurz- bis mittelfristig getätigten F & E-Aufwendungen, Anlagen- und Infrastrukturinvestitionen werden bedingen, welche Lagerstätten herangezogen werden, um dem Konsumentenwunsch nach sauberen Energieformen entsprechen zu können.

*From Well or Mine to the Consumer: Long-term Energy Perspectives.* The paper summarizes a joint study conducted by the World Energy Council (WEC) and International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) on long-term (2050 and beyond) energy perspectives. Key message of the study is that future consumers will place increased emphasis on clean, flexible and grid dependent energy forms. In turn these can be supplied by alternative scenarios that unfold as a function of different entrepreneurial, technological and investment strategies. Near- to medium-term investments into R & D, plant and equipment, as well as infrastructures will determine which alternative energy systems will evolve over the long-term and which fuels and which energy deposits will be tapped in meeting the growing consumer needs for clean, flexible and convenient energy forms.

## 1. Einleitung

Dieser Beitrag ist eine Kurzfassung einer Studie über langfristige Energieperspektiven, die in Zusammenarbeit zwischen dem Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) und dem Weltenergieerat (World Energy Council, WEC, London) durchgeführt wurde. Der erste Studienbericht „Globale Energieperspektiven bis 2050 und darüber hinaus“<sup>1</sup> wurde anlässlich des 16. Weltenergiekongresses 1995 in Tokyo präsentiert. Die Endfassung der Studie wurde anlässlich des 17. Weltenergiekongresses 1998 in Houston, Texas, veröffentlicht<sup>18</sup>.

Die Studie beruht auf der Formulierung alternativer Szenarien, die mit Hilfe eines integrierten Systems von Energie- und Umweltmodellen näher untersucht wurden. Im Sinne der Studie sind Szenarien keine Prognosen zukünftiger Entwicklung, sondern lediglich in sich konsistente Abbildungen möglicher Entwicklungspfade, die sich aus einer Reihe von Szenarienannahmen mit Hilfe von Modellrechnungen ergeben. Eine notwendigerweise subjektive Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit verschiedener Szenarien war nicht Gegenstand der Studie. Die erstellten Szenarien beabsichtigen, eine große Bandbreite unterschiedlicher Entwicklungen zu untersuchen. Daraus sollen Schlußfolgerungen über – trotz aller

Verschiedenheit – robuste Trends einerseits sowie über langfristige Auswirkungen kurz- bis mittelfristiger Entscheidungen der Energiepolitik andererseits ermöglicht werden.

## 2. Die Fälle/Szenarien

Es wurden drei alternative Fälle langfristiger Wirtschafts- und Energieentwicklung untersucht. Die Fälle wurden mit A (hohes Wachstum), B (Mittelkurs) und C (ökologisch ausgerichtet) bezeichnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wesentlichsten qualitativen und quantitativen Merkmale der drei Fälle. Die drei Fälle, und die aus ihnen abgeleiteten sechs Szenarien, unterscheiden sich durch folgende drei Hauptmerkmale: 1. Wirtschaftswachstum, 2. technischer Fortschritt und 3. Ausmaß der internationalen Zusammenarbeit u. a. im Bereich der Umweltpolitik. Die konsistente Gestaltung der Szenarioannahmen ist ein wesentliches Merkmal der Studie. So sind zum Beispiel in Szenarien mit hohem Wirtschaftswachstum *ceteris paribus* auch die Rate des technischen Fortschritts und (durch schnelleren Umschlag des Kapitalstocks auch) die Verbesserung der Energieintensitäten höher als in Fällen mit niedrigerem Wirtschaftswachstum.

Es wurde jedoch ersichtlich, daß es notwendig war, über die Formulierung der drei Fälle hinauszugehen, und so wurden diese zu insgesamt sechs Szenarien alternativer Energieversorgung erweitert. Drei Varianten von Fall A (Szenarien A1, A2 und A3), eine von Fall B und zwei Varianten von Fall C (Szenarien C1 und C2) wurden entwickelt.

Dipl.-Ing. Dr. Arnulf Grübler, IIASA, A-2361 Laxenburg/Österreich.

Nach einem Vortrag, gehalten am 13. Mai 1998 beim Österreichischen Bergbautag 1998 in Leoben.

Tabelle 1. Übersicht über die drei Fälle in den Jahren 2050 und 2100

	Case		
	A Hohes Wachstum	B Mittelkurs	C Ökologisch ausgerichtet
Weltbevölkerung (10 <sup>9</sup> )			
2050	10,1	10,1	10,1
2100	11,7	11,7	11,7
Welt-BSP (10 <sup>12</sup> \$)			
2050	100	75	75
2100	300	200	220
Energieintensitätsver- besserung (%/Jahr)			
Welt (1990–2050)	mittel	gering	hoch
Welt (1990–2100)	-1,0	-0,7	-1,4
Welt (1990–2100)	-1,0	-0,8	-1,5
Primärenergiebedarf (Gtoe)			
2050	25	20	14
2100	45	35	21
Ressourcenverfügbarkeit			
Fossile	hoch	mittel	gering
Nicht-fossile	hoch	mittel	hoch
Technologiekosten			
Fossile	gering	mittel	hoch
Nicht-fossile	gering	mittel	gering
Technologiedynamik			
Fossile	hoch	mittel	mittel
Nicht-fossile	hoch	mittel	hoch
Emissionsbeschrän- kungen für CO <sub>2</sub>	nein	nein	ja
Kohlenstoffemissionen (GtC)			
2050	9–15	10	5
2100	7–20	11	2
Umweltsteuern	nein	nein	ja
Anzahl der Szenarien	3	1	2

### 3. Die wesentlichen Elemente der Studie

Diese Zusammenfassung kann nicht alle Details der gesamten Studie<sup>1, 18</sup> wiedergeben, doch sollen hier fünf ihrer wesentlichen Elemente angeführt werden: Bevöl-

kerungsaussichten, Wirtschaftswachstum, Energieintensität, technologischer Fortschritt und Ressourcenverfügbarkeit. Primär- und Endenergie, Infrastrukturbedarf sowie finanzielle und ökologische Auswirkungen der Szenarien sollen hier ebenfalls kurz vorgestellt werden.

#### 3.1 Bevölkerungsaussichten

Die Weltbevölkerung wächst gemäß den mittleren Prognosen der Weltbank<sup>3</sup>, der Vereinten Nationen und des IIASA bis zu rund 10 Milliarden Menschen im Jahr 2050 an und stabilisiert sich zu Ende des 21. Jahrhunderts. Der wesentliche Anteil des Bevölkerungswachstums wird in den heutigen Entwicklungsländern, dem sogenannten „Süden“, erfolgen. Es wurde nur ein (mittleres) demographisches Szenario zu Grunde gelegt, um nicht vom wesentlichen, energiebezogenen Inhalt der Studie abzulenken.

Die Urbanisierung wird rascher vor sich gehen als das Bevölkerungswachstum insgesamt<sup>4,5</sup>, wobei die meisten der größten Städte der Welt im Süden liegen. In der Regel haben städtische Bevölkerungen einen relativ hohen Pro-Kopf-Energieverbrauch (als Folge ihres höheren Einkommens). Gleichzeitig werden ökologische Beschränkungen speziell in den Ballungsgebieten der „Megastädte“ der Entwicklungsländer weit über ein bisher unbekanntes Ausmaß ansteigen. Im ökologisch ausgerichteten Fall C wird angenommen, daß die Urbanisierung etwas langsamer fortschreitet als in den anderen zwei Fällen.

#### 3.2 Wirtschaftswachstum und Energieintensität

Allen Szenarien unterliegt die normative Grundannahme, daß die gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung fortschreitet, besonders im „Süden“. Eine Grundhypothese der Szenarien, die sich aus ihrem langfristigen Zeithorizont ergibt, ist, daß die gegenwärtige Unterscheidung zwischen „Entwicklungs-“ und „entwik-

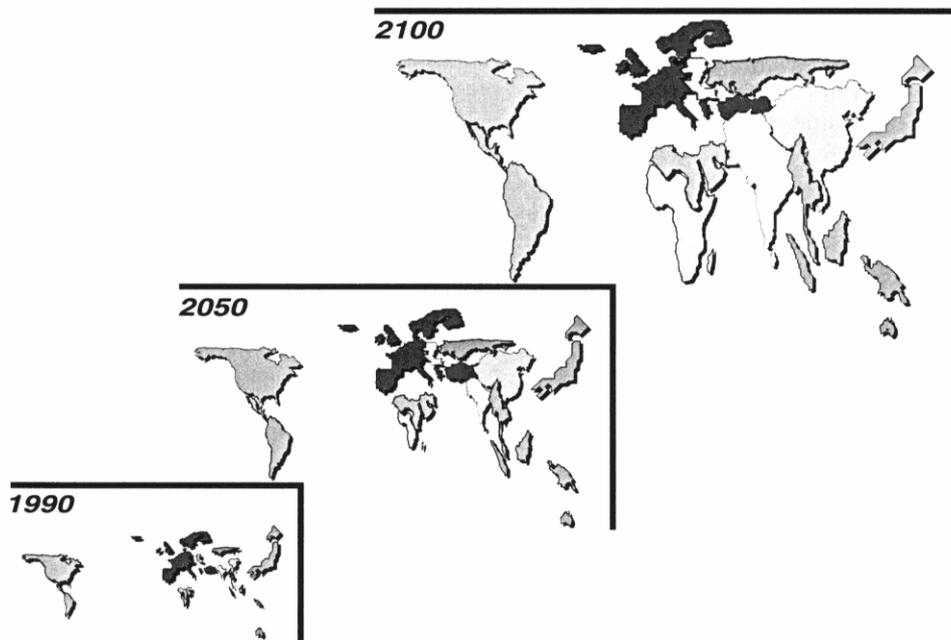


Abb. 1. „Wirtschaftslandkarte“ der Welt 1990, 2050, 2100 für Fall B. Größe einzelner Weltregionen sind proportional zu ihrem BSP (zu offiziellen Wechselkursen) im Jahre 1990. Quelle: <sup>1,18</sup>

kelten“ Ländern angesichts der Verbreitung wirtschaftlichen Wohlstandes während des nächsten Jahrhunderts zunehmend nicht mehr angebracht sein dürfte.

Abbildung 1 veranschaulicht dieses Grundmerkmal der Szenarien in einer etwas ungewohnten Darstellungsweise. Die Größe einzelner Regionen, die in der Studie untersucht wurden, sind proportional zu ihrem Bruttoinlandsprodukt (BSP, zu offiziellen Wechselkursen) im Jahr 1990, dem Basisjahr der Studie, dargestellt. Die gegenwärtigen Ungleichgewichte in der wirtschaftlichen Entwicklung werden so deutlich sichtbar. Die Wirtschaftslandkarte der Welt in den Jahren 1990, 2050 und 2100, die in Abb. 1 dargestellt wird, entspricht den Projektionen des Falles B, der für die Entwicklungsländer die vorsichtigsten Annahmen betreffend ihres wirtschaftlichen Aufholprozesses annimmt. Nichtsdestoweniger reduzieren sich die gegenwärtigen Unterschiede zwischen „arm“ und „reich“. Nicht nur werden durch wirtschaftliche Entwicklung einzelne Regionen langfristig auf der Wirtschaftslandkarte größer, sondern auch Disparitäten werden kleiner. Die Wirtschaftslandkarte des 21. Jahrhunderts beginnt sich der geographischen Karte anzugleichen. Dieser Aufholprozeß des „Südens“ geht im Fall A durch generell höhere Wachstumsraten, und im Fall C als Ergebnis einer angenommenen verstärkten wirtschaftlichen und ökologischen Zusammenarbeit zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, schneller vor sich als im Fall B, der in Abb. 1 dargestellt ist.

Die Energieintensität ist ein aggregierter Maßwert, der den Energieverbrauch zur Wirtschaftsaktivität in Beziehung setzt. Abbildung 2 illustriert die historischen Veränderungen der Primärenergieintensität für den gesamten Energieverbrauch (durchgehende Linien) und für ausschließlich kommerzielle Energie (strichlierte Linien). Für Entwicklungs- und Reformländer werden beide Maßstäbe zur Bewertung der Wirtschaftsleistung (BSP zu offiziellen Wechselkursen und zu Kaufkraftparitäten) angegeben.

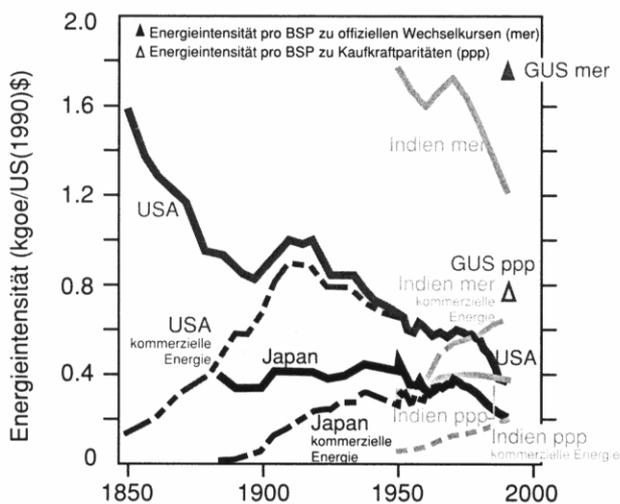


Abb. 2. Primärenergieintensität für ausgewählte Länder, gesamte und kommerzielle (strichliert) Energie in Kilogramm Erdöleinheiten (kgoe) pro US\$ (1990) für das BSP zu offiziellen Wechselkursen (mer) und das BSP zu Kaufkraftparitäten (ppp).  
Quelle: 6, 7, 8, 9, 10

Es wird in der Studie angenommen, daß die aggregierten Energieintensitäten im allgemeinen im Laufe der Zeit eine Verbesserung erfahren. Jedoch wird der Auswirkung der Substitution traditioneller Energieträger

durch kommerzielle Energieformen und Technologien Rechnung getragen. Die Verbesserungsrate für die globale Energieintensität (Gesamtenergieverbrauch pro Einheit des BSP zu offiziellen Wechselkursen) sind 1,0 % pro Jahr für das hohe Wachstumsszenario Fall A, 0,8 % pro Jahr für den Mittelkurs Fall B und 1,4 % pro Jahr für den ökologisch ausgerichteten Fall C. Verbesserungsrate sind in der Regel mit den Wirtschaftswachstumsraten gekoppelt, d.h. je schneller das Wachstum einer Volkswirtschaft, je rascher der wirtschaftliche Strukturwandel und der Umschlag des Kapitalstocks, desto schneller verbessert sich *ceteris paribus* die Energieintensität.

### 3.3 Technologischer Fortschritt

Die Studie<sup>1, 18</sup> widmet – unter Bezugnahme auf die 1400 Technologien umfassende Technologiedatenbank des IIASA – der Diskussion der Dynamik technologischer Veränderungen sowie der Technologieausbreitung (Diffusion) breiteren Raum. Technologischer Fortschritt ist (neben Strukturwandel) ein wesentlicher Faktor für Verbesserungen der Energieintensität. Ebenso bedeutsam ist sein Einfluß auf die zukünftige Entwicklung der Kosten der Energiebereitstellung sowie der Verfügbarkeit von Ressourcen.

In den Szenarien wird angenommen, daß sich die technische Entwicklung je nach Höhe der Anreize, nach Zielrichtung der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, Ausmaß energiepolitischer und ökologischer Zielrichtungen sowie Ausmaß der Anwendungen in (graduell expandierenden) Nischenmärkten dynamisch entwickeln. Dieses Modell der Technologieentwicklung fand in der vorliegenden Studie Anwendung. Verbesserungsrate bzw. Technologien, die von diesen profitieren, sind szenarioabhängig.

Im Fall A (hohes Wachstum) wird ein grundlegender Fortschritt bei allen neuen Energiegewinnungs-, Umwandlungs- und Endverbrauchstechnologien angenommen: bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen; bei der nuklearen Elektrizitätserzeugung; bei erneuerbaren Energien sowie bei den Umwandlungstechnologien beim Endenergieverbrauch. Im Fall B (Mittelkurs) ist der Fortschritt nicht so massiv wie im Fall A; er konzentriert sich hauptsächlich auf graduelle Verbesserungen bereits etablierter Technologien. Im Fall C (ökologisch ausgerichtet) führen energie- und umweltpolitische Maßnahmen zu einem forcierten Übergang in Richtung nicht-fossiler Energieversorgung sowie zu hoher Effizienz der Endverbrauchstechnologien. Technologien in diesen Bereichen weisen ähnliche Verbesserungsrate wie im Fall A auf. Die Technologieentwicklung der anderen Energiesektoren geht hingegen langsamer vor sich, wie z. B. im Fall B.

### 3.4 Die Ressourcenbasis der Energiesysteme

Die Verfügbarkeit der Ressourcen an fossilen Brennstoffen und Uran ist je nach Fall und Szenario unterschiedlich. Sie erstreckt sich von optimistischen Annahmen im Fall A (Szenario A1 und A3) über vorsichtige Annahmen (Szenario A2 und Fall B) bis hin zum konservativen Fall C. Abbildung 3 gibt eine Übersicht über den kumulativen Ressourcenverbrauch bis zum Jahr 2050 der Szenarien. In keinem der Szenarien wird die zukünftige Verfügbarkeit exotischer Vorkommen (wie etwa von Methanhydraten) unterstellt, doch werden die (enormen)

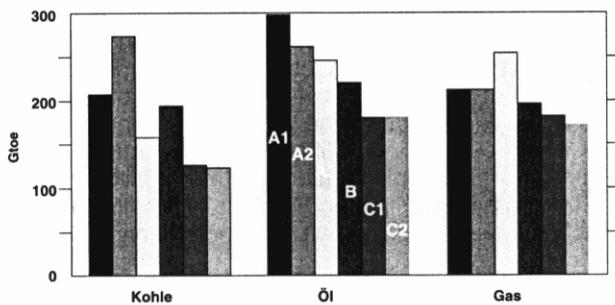


Abb. 3. Kumulativer fossiler Ressourcenbedarf der Szenarien, 1990–2050, in Gigatonnen Erdöleinheiten (Gtoe). Quelle: <sup>1</sup>

geologischen Vorkommen dieser Mengen in der Studie näher diskutiert.

Aus Sicht der Szenarien sind fossile Brennstoffressourcen sicherlich für mehr als 100 Jahre ausreichend, und zwar auch im höchsten Wachstumsszenario von Fall A, was aber nicht bedeutet, daß eine zeitweilige oder strukturelle Energieverknappung ausgeschlossen ist. Es bestehen wahrscheinlich andere Beschränkungen als die der Geologie für die Verwendung unbegrenzt großer Mengen fossiler Energie: nämlich technische, finanzielle und langfristig vor allem umweltpolitische Beschränkungen.

Gemeinsam ist allen sechs Szenarien, daß der Höhepunkt des fossilen Zeitalters (gemessen am Anteil der Primärenergieversorgung) überschritten ist. Dennoch deuten die Szenarien auch darauf hin, daß die Welt zum gegenwärtigen Zeitpunkt vielleicht erst ein Drittel des Zeitalters des Erdöls hinter sich hat, und möglicherweise erst ein Fünftel des Zeitalters des Erdgases. Von allen fossilen Ressourcen hat Erdgas das größte Wachstumspotential sowohl auf Grund seiner hohen Verfügbarkeit als auch auf Grund seiner Umweltverträglichkeit. In dem erfordert die Realisierung dieses Wachstumspotentials vor allem Investitionen in Infrastruktur, die in den Hauptwachstumsmärkten (v. a. in Asien) noch völlig ungenügend entwickelt ist. Demgegenüber ist die Bandbreite der Zukunftsaussichten von Kohle extrem breit: von Stagnation bis zu hohem Wachstum im Falle, daß ungenügende Anstrengungen unternommen werden, das geologische Potential von Erdöl und Erdgas in gewinnbare Vorräte umzusetzen. Dessenungeachtet sind die abzubauenen Mengen gigantisch. Sogar in den ökologisch ausgerichteten Szenarien im Fall C, mit dem relativ niedrigsten Einsatz von Kohle, wird zwischen 1990 und 2050 genausoviel Kohle abgebaut wie zwischen 1850 und 1990.

Die zukünftige Verwendung von Uran wird teilweise von der Bewältigung der gegenwärtigen Kontroversen um Betriebssicherheit, Abfallentsorgung und Verbreitung von Spaltstoffen sowie teilweise auch von der erfolgreichen Entwicklung neuer Technologien abhängen. Diese Unsicherheiten werden in der Studie durch Bandbreiten möglicher Entwicklung der Kernenergie abgedeckt, die von forciertem Wachstum bis zum völligen Ausstieg reichen.

Erneuerbare Energieressourcen sind nicht durch die Quantität ihres Energieflusses (der in jedem Fall enorm ist) limitiert, sondern dadurch, wie und zu welchen Kosten diese gewonnen und in Brennstoffe umgewandelt werden können. Die Berichte des Weltenergieates schätzen das Potential erneuerbarer Energiequellen bis zum Jahr 2100 auf bis zu 13 Gtoe, wovon 10 Gtoe von

den „neuen“ erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden könnten.

Ein Fortschritt in Richtung dieses längerfristigen Potentials wird sich jedoch voraussichtlich langsam entwickeln. Insbesondere bis zum Jahr 2020 kommt die Studie durch die gute Verfügbarkeit fossiler Ressourcen und relative geringe Preissteigerungstendenzen zu einer – im Vergleich zu anderen Studien – vorsichtigeren Abschätzung der kurz- bis mittelfristigen Wachstumschancen. Längerfristig ist das Potential für erneuerbare Energiequellen jedoch beträchtlich, wenn auch in den einzelnen Szenarien unterschiedlich.

#### 4. Die Zukunftsaussichten der Energiesysteme

Kernaussage der Studie und der in ihr beschriebenen Szenarien ist, daß langfristig die Struktur der Endenergienachfrage weltweit in Richtung qualitativ höherwertiger Energieträger konvergiert. Diese Konvergenz in der Nachfragestruktur kann aber mittels unterschiedlicher unternehmerischer und energiepolitischer Strategien verfolgt werden, was zu einer langfristigen Divergenz der Möglichkeiten der Energieversorgung führt. Eine Zeitspanne bis zum Jahr 2050 und, in der Folge, bis zum Jahr 2100 bedeutet, daß alle Energietechnologien und Vorrichtungen wahrscheinlich mindestens zweimal ersetzt werden müssen, was ein enormes Spektrum an neuen Möglichkeiten eröffnet.

##### 4.1 Primärenergie

Abbildung 4 gibt eine Darstellung der Weltprimärenergienutzung und des Weltbevölkerungswachstums von 1850 bis heute in Beziehung zu den sechs Szenarien, die in den drei Fällen A, B und C zusammengefaßt sind.

Die globale Primärenergienutzung wächst bis zum Jahre 2100 auf ein 2- bis 5faches ihres heutigen Standes. Fall A nimmt Wachstumsraten für Primärenergie an, die in etwa den langfristigen historischen Erfahrungswerten entsprechen, während Fälle B und C wesentlich niedrigere Wachstumsraten aufweisen. Besonders Fall C stellt eine radikale Änderung mit Schwerpunkt auf Energieeffizienz und Energiesparen dar. In allen Szenarien tragen die heutigen Entwicklungsländer den größten Teil zum Anstieg der globalen Primärenergieerfordernisse bei.

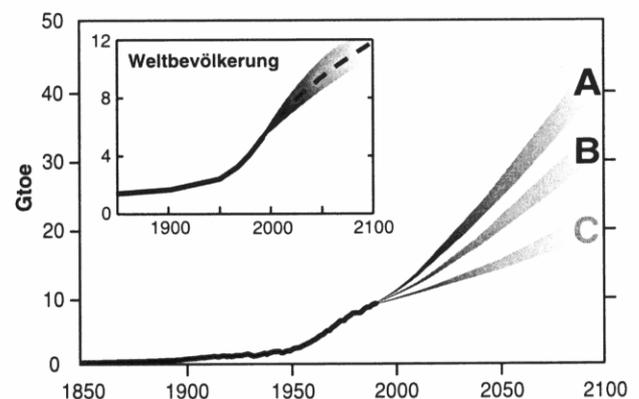


Abb. 4. Globale Primärenergie (Gigatonnen Erdöleinheiten, Gtoe), 1850 bis heute, und für die drei Fälle bis zum Jahr 2100. Das Insert zeigt das globale Bevölkerungswachstum von 1850 bis heute, und dessen Prognose <sup>3</sup> bis zum Jahr 2100 in Milliarden (10<sup>9</sup>) Menschen. Quelle: <sup>1,18</sup>

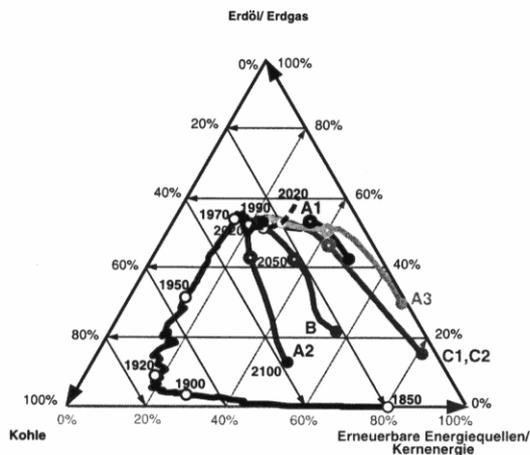


Abb. 5. Veränderung in der Primärenergiestruktur 1850 bis 1990 und der sechs Szenarien bis 2100. Prozentuelle Anteile von Erdöl und Erdgas, Kohle sowie nicht-fossiler Quellen wie erneuerbare Energien und Kernenergie. Quelle: 1, 17, 18

Abbildung 5 zeigt die divergierende Entwicklung der Struktur der Primärenergieversorgung der sechs Szenarien\*. Dargestellt ist ein Dreieck, dessen Endpunkte einen hypothetischen Fall darstellen, in dem die gesamte Primärenergie durch eine Quelle(n) bereitgestellt wird: Erdöl und Erdgas (an der Spitze), Kohle (links unten) sowie erneuerbare Energieträger und Kernenergie (rechts unten).

Bis zum Jahr 2020 ergeben sich nur geringfügige, graduelle Unterschiede zwischen den Szenarien. Zu groß ist die Trägheit der möglichen Veränderungen des Energiesystems, zu groß ist dessen kurz- bis mittelfristige Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. Nach 2020 jedoch entwickeln sich die Energiesysteme der einzelnen Szenarien auseinander, als Folge der kurz- bis mittelfristig eingeschlagenen unternehmerischen, technologie-, energie- und umweltpolitischen Zielsetzungen. Langfristig schließen sich die einzelnen Entwicklungspfade der Szenarien gegenseitig aus.

In allen Szenarien zeichnet sich eine wesentliche Ausweitung der erneuerbaren Energiequellen ab. Selbst im (konservativen) Fall B haben die erneuerbaren Energiequellen bis zum Jahr 2050 einen Anteil von 22 % (4,4 Gtoe) am globalen Primärenergieverbrauch, und ihr Anteil bis zum Jahr 2100 liegt bei 33 % (11 Gtoe). Im Fall C und im Szenario A3 erreichen die erneuerbaren Energiequellen bis zum Jahr 2100 sogar 22 Gtoe, und es wird angenommen, daß die Biomasse dabei einen Anteil von über 8 Gtoe verzeichnet.

Im Szenario A3 werden auch bis zu 75 neue Kernreaktoren pro Jahr bis 2050 erforderlich, was bedeutet, daß in diesem Szenario die Kernkraft auch allgemein ak-

\* Die sechs Szenarien sind:

- A1: Hohe Verfügbarkeit von Erdöl und Erdgas;
- A2: Rückkehr zur Kohle;
- A3: Geordneter Rückzug aus fossilen Energieträgern („bionukleares“ Szenario);
- B: Mittelkurs;
- C1: Neue erneuerbare Energieträger, Ausstieg aus der Kernenergie;
- C2: Neue erneuerbare Energieträger und neue Kernenergie.

zeptiert wird. Im Szenario C2 wächst die Kernenergie bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weltweit auf einen Marktanteil von rund 20 %, was durch neue, kleinmaßstäbliche und dezentrale Technologien ermöglicht wird. Im Falle eines mangelhaften Fortschritts auf den Gebieten der öffentlichen Akzeptanz, der Technologie und der Wirtschaftlichkeit könnte sich die Kernenergie als Übergangstechnologie erweisen, wie in Szenario C1 aufgezeigt wird.

Relativ rasche und grundlegende technologische Veränderungen werden von einem relativ hohen Wirtschaftswachstum und hoher Energienachfrage in den Szenarien von Fall A begleitet. Szenario A1 nimmt an, daß diese technologischen Veränderungen Möglichkeiten der Nutzung großer Mengen konventioneller sowie nicht-konventioneller Öl- und Gasressourcen eröffnen, sodaß fossile Brennstoffe im Jahr 2100 noch immer 50 % des Primärenergieverbrauchs ausmachen. Szenario A2 ist hinsichtlich der technologischen Veränderungen und der Ressourcenverfügbarkeit von Erdöl und Gas konservativer und ist daher stärker auf Kohle ausgerichtet. Szenario A3 ist „Technologie-intensiv“, doch hier verhilft die Kombination von neuen erneuerbaren Energiequellen und neuen Kernenergietechnologien zu einem „geordneten“ Übergang in das post-fossile Zeitalter. Bis zum Jahr 2100 machen die fossilen Brennstoffe in Szenario A3 nur mehr 30 % des globalen Weltenergieverbrauchs aus; fast die gesamte fossile Versorgung wird dabei durch den „Brückensubstrat“ des 21. Jahrhunderts, Erdgas, gewährleistet.

Szenario Fall B (Mittelkurs) ist im Hinblick auf Wirtschaftswachstum, Energieverfügbarkeit und technologische Veränderung vorsichtiger. Fossile Brennstoffe (v. a. Kohle) machen im Jahr 2100 noch 45 % des globalen Primärenergieverbrauchs aus.

Die Szenarien im (ökologisch ausgerichteten) Fall C stellen die größte Herausforderung dar, doch sie eröffnen auch die größten Möglichkeiten: zu einer Verlagerung in Richtung höhere Energieeffizienz, größtmögliche Nutzung von Sparpotentialen und Förderung neuer, dezentralisierter und umweltverträglicher Technologien. Fall C zeigt Wege zum Übergang von der gegenwärtigen Vorherrschaft fossiler Brennstoffe zur Vorherrschaft erneuerbarer Energieflüsse. Bis zum Jahr 2050 haben nicht-fossile Energiequellen einen Anteil von 40 bis 50 % am Weltenergieverbrauch, und dieser Anteil wird bis zum Jahr 2100 auf über 80 % ansteigen. Zusätzlich zu der strengen Kontrolle lokaler und regionaler Schadstoffe unterstellt Fall C ein neues globales Kontrollsystem für Treibhausgasemissionen mit dem Ziel, CO-Emissionen bis zum Jahr 2100 auf zwei Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) zu reduzieren.

#### 4.2 Endenergie

Alle Szenarien spiegeln den zu erwarteten Druck seitens der Konsumenten nach flexibleren, bequemeren und saubereren Endenergieformen wider, was zu einer Konvergenz in der Struktur der Endenergieversorgung in Richtung qualitativ hochwertiger, leitungsgebundener Energieträger führt.

Strom ist bereits ein wichtiger Energieträger, und sein Beitrag erhöht sich in allen sechs Szenarien. Methanol spielt in der Zukunft ebenfalls eine größere Rolle. Erdgas wird in allen Szenarien zum dominierenden leitungsgebundenen Endenergieträger und leitet langfristig (nach 2050) auch zu einer Wasserstoffinfrastruktur über.

### 4.3 Infrastrukturbedarf

Nicht zuletzt aus Umweltgründen erscheint der forcierte Ausbau von Energieinfrastrukturnetzen sowohl für Strom, Fernwärme als auch Erdgas dringend erforderlich. Speziell in Asien, wo die Nachfrage besonders schnell wächst und die Luftqualität städtischer Ballungsräume durch Verbrennung von Biomasse und Kohle in Haushalt und Gewerbe besorgniserregend ist. Indes ist es nicht ausreichend, nur Infrastrukturnetze in städtischen Gebieten zu betrachten. Geschätzte zwei Milliarden Menschen weltweit, vor allem in ländlichen Gebieten, haben überhaupt keinen Zugang zu den Dienstleistungen, die die Nutzung moderner Energieformen ermöglicht. Ebenso müssen auch die internationalen Verflechtungen der Energieinfrastruktur deutlich verbessert werden, vor allem in Asien, wo bislang Mangel an Infrastruktur eine verstärkte Nutzung sauberer Energieträger wie Erdgas behindert.

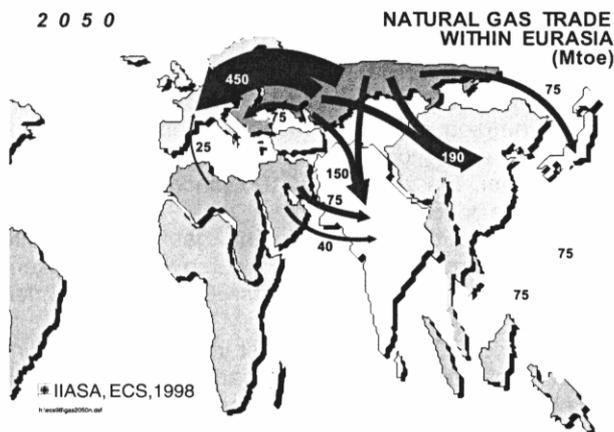


Abb. 6. Erdgashandel in Eurasien in einem illustrativen hohen Wachstumsszenario und Verfügbarkeit transkontinentaler Transportinfrastruktur im Jahre 2050. Handelströme zeigen Pipeline- (→) und LNG-Handelsrouten (---), proportional zu den gehandelten Mengen (s. auch die Zahlenangaben in Mtoe). Größe der Regionen ist proportional zu deren Primärenergiebedarf im Jahre 2050 (zur Darstellungsweise s. auch Abb. 1).  
Quelle: <sup>19</sup>

Weiterführende Studien am IIASA haben unlängst mögliche Handelsströme und den Infrastrukturbedarf für Energienetze in Asien untersucht. Ein illustratives Szenario des Gashandels in Europa und Asien für das Jahr 2050 ist in Abb. 6 dargestellt. Die Größenordnung der Handelsströme kann in einem Vergleich zum Ist-Zustand veranschaulicht werden: So betrug 1995 der Gesamtimport von Erdgas nach Westeuropa weniger als 90 Millionen Tonnen Erdäquivalent (Mtoe) im Vergleich zu 500 Mtoe (Europa) und 700 Mtoe (Asien) in dem illustrativen Szenario in Abb. 6. Die Realisierung solcher „Euro-Asiatischer“ Energieinfrastrukturen wird viele Jahrzehnte und hohe Investitionsmittel erfordern. Die Frage nach Institutionen und Modellen internationaler Zusammenarbeit, die solche transkontinentalen Leitungsnetze realisieren könnten, bedarf weiterführender Analysen.

## 5. Finanzielle und Umweltauswirkungen

### 5.1 Finanzierung

Die Finanzierungserfordernisse für die in allen Szenarien aufgezeigten Alternativen sind enorm. Die Finanzierung der Energieentwicklung ist in vielen Entwicklungs-

ländern zu einem großen Problem geworden. Die steigenden Schwierigkeiten, Finanzierungen von multilateralen Institutionen zu erhalten, sowie institutionelle Hindernisse, unangebrachte Preispolitik und schwache Investitionsgewinne geben Anlaß zur Sorge. Weltweit werden 1 bis 2 % des Bruttonationalprodukts in den Energiesektor investiert, und die Studie erwartet, daß dieser Prozentsatz ziemlich stabil bleibt. Nur in den Wirtschaftsreformsländern Osteuropas und der ehemaligen Sowjetunion liegt dieser Anteil in den Szenarien mit 5 bis 7 % höher. Die Hintergründe dafür sind ein erheblicher Nachholbedarf zur Modernisierung veralteter Energiestrukturen bzw. deren Anpassung an westliche Sicherheitsstandards einerseits, und eine nur langsame wirtschaftliche Erholung andererseits.

Die kumulativen Kapitalerfordernisse des Energiesektors (d. h. ohne Investitionen in Endverbrauchstechnologien, die traditionell als dauerhafte Konsumgüter oder kommerzielle Investitionen verrechnet werden) werden für die Szenarien für den Zeitraum 1990 bis 2020 in einen Bereich von US\$ 10 bis  $14 \times 10^{12}$  (US\$ 1990) geschätzt. Zum Vergleich: das Weltbruttonationalprodukt des Jahres 1995 betrug rund  $23 \times 10^{12}$  (US\$ 1990).

### 5.2 Umweltauswirkungen

Drei Arten von Umweltauswirkungen wurden in der Studie<sup>1, 18</sup> näher behandelt: lokale Auswirkungen der Luftverschmutzung innerhalb geschlossener Räume und in Ballungsräumen der Entwicklungsländer; regionale Auswirkungen der Schwefel- und Stickstoffemissionen und ihr möglicher Beitrag zum „sauren Regen“; und Treibhausgasemissionen, besonders CO<sub>2</sub>, und ihr möglicher Beitrag zu einer globalen Erwärmung. Stellvertretend sollen hier regionale und globale Umweltauswirkungen der Szenarien beschrieben werden.

Die Energieemissionen von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und der Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) haben sowohl lokale wie auch regionale Auswirkungen. „Saure Niederschläge“ vor allem der Kohle- (und Schwefel-)intensiven Szenarien (wie A2) sind hier von besonderer Bedeutung und wurden mit Hilfe des IIASA-„RAINS“-Modells<sup>12, 13</sup> untersucht.

Im Szenario A2 würden die Schwefelemissionen Europas in Abwesenheit jeglicher Minderungsmaßnahmen während der nächsten 30 Jahre um ungefähr 50 % steigen. Die Schwefelablagerungen würden in großen Teilen Mittel-, West- und Nordeuropas 16 g/m<sup>2</sup> pro Jahr übersteigen. Demgegenüber fordert das zweite Schwefelprotokoll über grenzüberschreitende Luftverschmutzung eine Herabsetzung der maximalen Schwefelablagerungen auf unter 3 g/m<sup>2</sup> pro Jahr.

In Asien ist die Situation noch weit dramatischer. Im Szenario A2, unter Annahme keiner Minderungsmaßnahmen, würden sich die SO<sub>2</sub>-Emissionen Asiens bis zum Jahr 2020 verdreifachen. Dabei würden die Schwefelablagerungen das Doppelte der höchsten je beobachteten Werte Mittel- und Osteuropas erreichen und die tolerierbaren Lasten für den Anbau wirtschaftlich wichtiger Nahrungsmittel bis zum Zehnfachen überschreiten.

Angesichts dieser Ergebnisse unterstellen alle Szenarien der Studie ausschließlich die Verwendung umweltverträglicher Kohletechnologien inklusive Rauchgaswäschern. Die Schwefelemissionen sind folglich wesentlich niedriger als in Fällen mit keinerlei Minderungsmaßnahmen.

### 5.3 Treibhausgasemissionen

Die Emissionen an CO<sub>2</sub>, dem hauptsächlichen Treibhausgas, unterscheiden sich wesentlich in den einzelnen Szenarien. In dem intensiv auf Kohle ausgerichteten Szenario A2 erreichen sie im Jahre 2100 20 GtC (Gigatonnen reinen Kohlenstoffs Nettoemissionen\*\* des Energiesektors) und im Szenario A1 14 GtC; im Szenario A3 sinkt ihr Wert aufgrund von strukturellen Veränderungen des Energiesystems auf 6 GtC. Dieser letzte Wert entspricht ungefähr dem Stand der gegenwärtigen globalen Emissionen, doch der Energieverbrauch wäre bis dahin um das Fünffache gestiegen. Die Emissionen im Fall B sind vergleichbar mit jenen von Szenario A3 bis zum Jahre 2050, steigen jedoch bis zum Jahr 2100 fast auf das Doppelte an. Die Emissionen der zwei Szenarien von Fall C, die weltweit konzentrierte Maßnahmen zum Klimaschutz annehmen, führen zu einer Stabilisierung auf jetzigem Niveau im Jahre 2050, und erreichen bis zum Jahr 2100 rund 2 GtC, was einen Rückgang auf ein Drittel ihres heutigen Standes bedeutet.

Die atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und die mögliche Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur, die durch die in den Szenarien angegebenen Emissionen hervorgerufen würden, wurden unter Heranziehung eines vereinfachten Kohlenstoffzyklus- und Klimamodells<sup>16</sup> berechnet. Bis zum Jahr 2100 erreichen die zwei Szenarien von Fall C eine atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration von unter 450 ppmv (Teile pro Million volumsmäßig berechnet); Fall B liegt unter 600 ppmv; und die drei Szenarien von Fall A liegen bei 550 ppmv (A3), 650 ppmv (A1) und 750 ppmv (A2). A2 ist das einzige Szenario, das den Wert des bislang „bevorzugten“ IPCC Szenarios (IS92a) überschreitet.

Es bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich des Kohlenstoffkreislaufs bzw. der Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Konzentrationserhöhungen auf mögliche Temperaturveränderung. Für die Szenarien von Fall C könnte der mittlere Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis zum Jahr 2100 weniger als 1,5°C, verglichen mit dem heutigen Stand, betragen; für die Szenarien von Fall A und Fall B beträgt der Anstieg ungefähr +2,0 bis +2,7°C.

## 6. Schlußfolgerungen

Alle sechs in der Studie analysierten Szenarien zeigen die folgenden durchgehenden sowie konvergierenden Entwicklungen: ein steigender Bedarf nach Energiedienstleistungen im Zusammenhang mit Bevölkerungswachstum und Wirtschaftsentwicklung; höhere Qualität und Umweltverträglichkeit der Endenergieformen; eine Verlagerung des globalen Gleichgewichts der Wirtschaftsaktivitäten und der Energienutzung vom „Norden“ in den „Süden“; und die Verfügbarkeit und weitere Nutzung von fossilen Brennstoffen für viele kommende Jahrzehnte.

Technologischer Fortschritt und die entsprechenden Investitionen, die benötigt werden, vorhandene Primärenergiequellen den Forderungen des Konsumenten nach flexibleren, bequemeren und saubereren Energie-

formen anzupassen, sind von grundlegender Bedeutung, doch werden einige Jahrzehnte Umschlag des Kapitalstocks nötig sein, um diesem Wunsch entsprechen zu können. Und sollte dieses langfristige Ziel in der Zwischenzeit nicht durch entsprechende politische und institutionelle Rahmenbedingungen sowie durch Maßnahmen und Investitionsentscheidungen gesichert werden, wird es bis dahin noch schwieriger und teurer werden, den Kurs zu ändern. Investitionsentscheidungen bis zum Jahr 2020 sind daher ein wichtiges Anliegen – und nicht nur aufgrund der enormen Geldsummen, die damit verbunden sind.

Die in anderen Studien getroffenen Annahmen, daß ein hoher Anstieg der Energienachfrage bei nur begrenzten technologischen und finanziellen Fortschritten möglich ist, werden in dieser Studie in Frage gestellt. Rigorose internationale Umweltmaßnahmen (inklusive einer Beschränkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen) und Maßnahmen zur Förderung einer wirtschaftlichen Entwicklung des „Südens“ (wie im ökologisch ausgerichteten Fall C) erweisen sich vereinbar mit hohem Wachstum und weiterer Energieentwicklung. Obwohl einzelne Länder oder Sektoren unter den Beschränkungen leiden könnten, kann das Gesamtergebnis positiv sein. Potentielle Verluste können reduziert oder durch Strategien der Diversifizierung aus langfristig rückgängigen Aktivitäten abgewendet werden.

Alle Szenarien zeigen, daß z. B. Erdöl und Erdgas noch lange nicht an der Mitte ihres Lebenszyklus angelangt sind; sogar die für die Kohle ungünstigsten Szenarien lassen noch eine voraussichtliche Lebensdauer von vielen Jahrzehnten erkennen. So zeigen alle drei Fälle, d. h. alle sechs Szenarien ein hohes Wachstum für alle Energieindustrien und Sektoren zumindest bis zum Jahr 2020. Die kommenden Jahrzehnte werden allerdings eine Umgruppierung innerhalb sowie zwischen den einzelnen Energiesektoren mit sich bringen. Es werden sich viele neue wirtschaftliche Möglichkeiten im Zusammenhang mit reineren und bequemeren Energieträgern bieten: flüssige anstelle von festen Brennstoffen, Versorgungsnetze und andere Verbundsysteme, und lokal besser angepaßte Energiequellen und Umwandlungstechnologien.

Die Szenarien zeigen jedoch, daß sich die Zukunftsperspektiven nach 2020 auseinanderentwickeln, wobei unterschiedliche Systeme der Energiegewinnung einander gegenseitig ausschließende Entwicklungsrichtungen einschlagen. Die Kohle könnte trotz ihrer enormen Ressourcen besonders gefährdet sein und zwar aufgrund der Konkurrenz anderer Energiequellen und aufgrund von Umweltbeschränkungen. Im Gegensatz dazu hat die Erdöl- und mehr noch die Erdgasindustrie eine lange Zukunft vor sich. Neue Märkte müssen erschlossen, neue transkontinentale Leitungsnetze vor allem in Asien errichtet werden. Der Übergang von der Vermarktung von Primärenergie zur Bereitstellung sauberer leitungsgebundener Endenergieformen und der Vermarktung von Energiedienstleistungen wird sich fortsetzen und noch verstärken.

Die Botschaft im Mittelpunkt aller sechs Szenarien liegt darin, daß langfristig die Strukturen der Endenergienutzung in Richtung reinerer, flexiblerer und bequemere Energieformen konvergieren, während die möglichen Strukturen der Energieversorgungssysteme divergieren, und zwar als Folge neu entstehender technologischer, wirtschaftlicher und unternehmerischer Möglichkeiten. Dies bedeutet für die Zukunft die Gelegenheit (aus der Sicht der Szenarien sogar Notwendigkeit), strategische

\*\* D. h. Nettoeintrag in die Atmosphäre aus Verbrennung fossiler Energieträger. Nachhaltige Nutzung von Biomasse und Verwendung fossiler Energie als Rohstoff in der petrochemischen Industrie für langlebige Produkte sind in den Zahlen exkludiert.

Entscheidungen zu treffen. Auch wenn die strukturellen Veränderungen in der näheren Zukunft gering sein werden, müssen langfristige Veränderungen bereits heute eingeleitet und diesbezügliche Entscheidungen getroffen werden. Die in naher Zukunft getätigten Investitionen an Kapital sowie an Wissen (Forschung und Entwicklung, Technologie) werden bedingen, welche der in der Studie aufgezeigten, langfristig divergierenden Alternativen zum Tragen kommen und welche ausgeschlossen werden.

In der IIASA-WEC-Studie werden Tendenzen aufgezeigt, die sich gegenüber einem bewußt breit ange-setzten Spektrum der Szenarien als robust erweisen. Es werden auch die Bedingungen beschrieben, unter denen sich zukünftige Strukturen der Energiesysteme in unterschiedliche Richtungen auseinanderentwickeln. Dennoch kann keine Analyse und Studie je eine unbekannte Zukunft in eine sichere Prognose verwandeln.

#### Literaturverzeichnis

<sup>1</sup> International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) und WEC (World Energy Council): Globalenergy perspectives to 2050 and beyond, WEC, London, 1995. – <sup>2</sup> WEC (World Energy Council): Energy for tomorrow's world – the realities, the real options and the agenda for achievements, Kogan Page, London, 1993. – <sup>3</sup> Bos, E., M. T. Vu, A. Leven und R. A. Bulatao: World population projections 1992–1993. Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, 1992. – <sup>4</sup> UN (United Nations): World urbanization prospects: the 1992 revision. Population Division, Division of Economic Development, UN, New York, 1994. – <sup>5</sup> Berry, B. J. L.: Urbanization. In: Turner, B. II, W. C. Clark, R. W. Kates, J. F. Richards, J. T. Mathews und W. B. Meyers (Hrsg.): The earth as transformed by human action: global and regional changes in the biosphere over the past 300 years. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990, pp. 103–119. – <sup>6</sup> Maddison, A.: The world economy in the 20<sup>th</sup> century. Development Centre Studies, Organisation for Economic Co-Operation and Development, OECD, Paris, 1989. –

<sup>7</sup> UN (United Nations): UN MEDS Macroeconomic Data System, MSPA Data bank of world development statistics, MEDS/DTA/1 MSPA-BK.93. Long-Term Socio-Economic Perspectives Branch, Department of Economic and Social Information & Policy Analysis, UN, New York, 1993. – <sup>8</sup> Nakićenović, N.: Technological substitution and long waves in the USA. In: T. Vasko (ed.) The long-wave debate, Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo, pp. 76–104. – <sup>9</sup> Martin, J.-M.: L'intensité énergétique de l'activité économique dans les pays industrialisés: Les évolutions de très longue période liverent-elles des enseignements utiles? Economies et Sociétés 4 (1988), 9–27. – <sup>10</sup> TERI (Tata Energy Research Institute): TERI energy data directory year-book, Pauls Press, New Delhi, 1994. – <sup>11</sup> WEC (World Energy Council): New renewable energy resources: A guide to the future, Kogan Page, London, 1994. – <sup>12</sup> Alcamo, J., R. Shaw und L. Hordijk (eds.): The RAINS Model of acidification, science and strategies in Europe, Kluwer, Dordrecht, 1990. – <sup>13</sup> Amann, M., J. Cofala, P. Dörfner F. Gyarfás und W. Schöpp: Impacts of energy scenarios on regional acidification. Report to the World Energy Council Project 4 on Environment, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1995. – <sup>14</sup> Alcamo, J., A. Bouwman, J. Edmonds, A. Grübler, T. Morita und A. Sugandhy: An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. In: Climate change 1994. Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995, pp. 247–304. – <sup>15</sup> Pepper, W., J. Leggett, R. Swart, J. Wasson, J. Edmonds und I. Mintzer: Emission scenarios for the IPCC. An update: assumptions, methodology, and results. Paper prepared for IPCC Working Group I, Geneva, Switzerland, 1992. – <sup>16</sup> Wigley, T. M. L., M. Salmon und S. C. B. Raper: Model for the assessment of greenhouse-gas induced climate change. Version 1.2, Climate Research Unit, University of East Anglia, UK, 1994. – <sup>17</sup> Grübler, A. und A. McDonald: The drive to cleaner energy. Options Fall/Winter 1995: 8–11. – <sup>18</sup> Nakićenović, N., A. Grübler und A. McDonalds (Hrsg.): Global energy perspectives, Cambridge University Press, 1998. – <sup>19</sup> Nakićenović, N.: Energy perspectives for eurasia in the global context. International Conference "Russia's and other CIS-Countries Energy Potential: Crucial Link between Europe and Asia Pacific", March 31 to April 2, 1998, Moscow, mimeo, IIASA, Laxenburg, Austria.