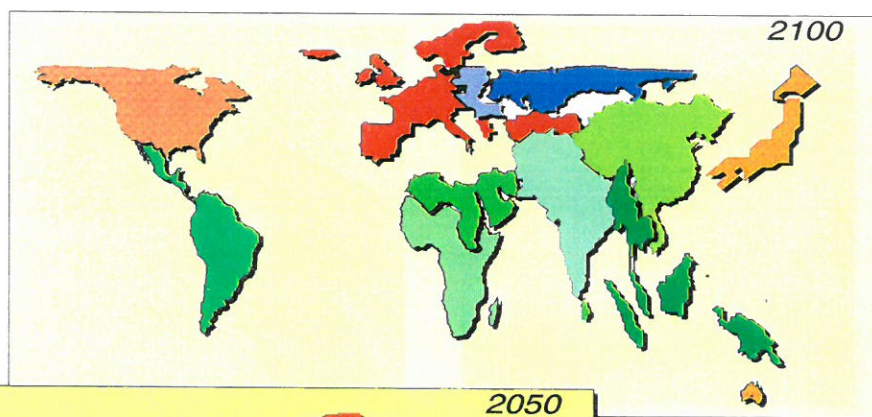


Globale Energieperspektiven 2050

Kurzfassung der IIASA-WEC-Studie

Arnulf Grübler, Nebojša Nakićenović; Laxenburg, Österreich

Anlässlich der 16. Weltenergiekonferenz in Tokio legte das Internationale Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) im Oktober 1995 den über 5 000 Kongreßteilnehmern eine Studie vor, in der in verschiedenen Szenarien „Globale Energieperspektiven bis 2050 und darüber hinaus“ [1] entworfen wurden. Der folgende Beitrag liefert eine Kurzfassung der Studie über langfristige Energieperspektiven, die in Zusammenarbeit mit dem Weltenergieerat (WEC) durchgeführt wurde. Diese Zusammenfassung kann nicht alle Details der gesamten Studie wiedergeben, doch sollen hier fünf ihrer wesentlichen Elemente angeführt werden: Bevölkerungsaussichten, Wirtschaftswachstum, Energieintensität, technische Entwicklung und Ressourcenverfügbarkeit. Primär- und Endenergie, sowie finanzielle und ökologische Auswirkungen der Szenarien werden ebenfalls vorgestellt.



telfristiger Entscheidungen der Energiepolitik andererseits, ermöglicht werden.

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. Diese und die aus ihnen abgeleiteten sechs Szenarien unterscheiden sich durch folgende drei Hauptmerkmale:

- Wirtschaftswachstum,
- technischer Fortschritt und
- Ausmaß der internationalen Zusammenarbeit, unter anderem 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) 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 wur-

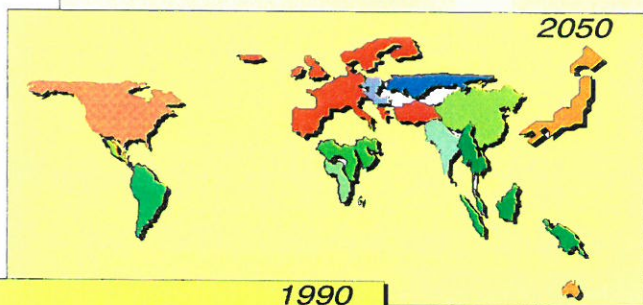
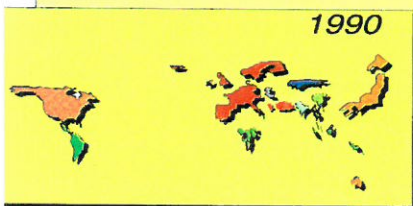


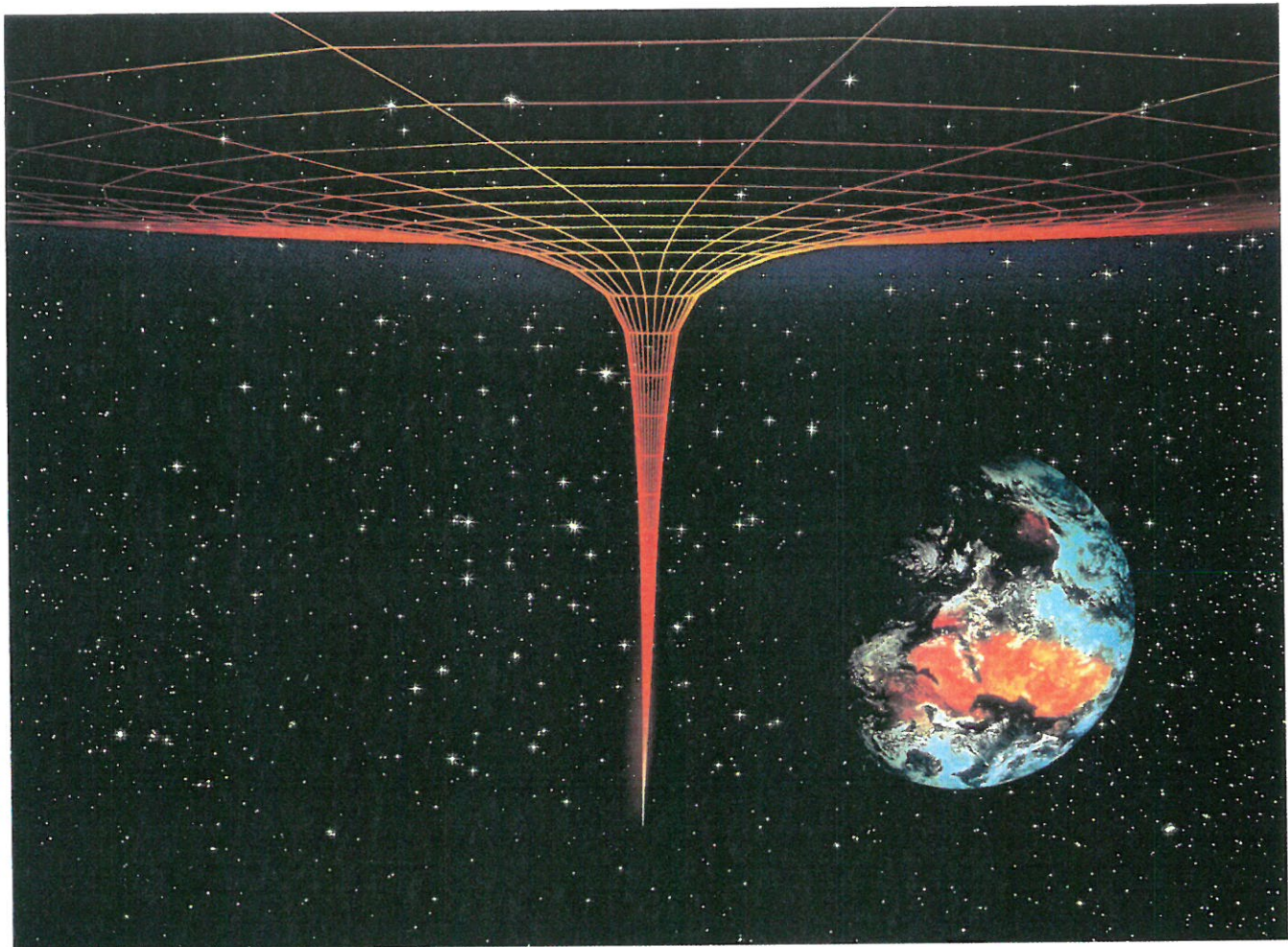
Bild 1: „Wirtschaftslandkarte“ der Welt 1990, 2050, 2100 für den Fall B. Größen einzelner Weltregionen sind proportional zu ihrem BSP (zu offiziellen Wechselkursen) im Jahre 1990. Quelle: [1]



konsistente Bilder möglicher Entwicklungspfade, die sich aus einer Reihe von Szenariannahmen 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 mit-

Die IIASA-WEC-Studie beruht auf der Formulierung alternativer Szenarien, die mit Hilfe eines integrierten Systems von Energie- und Umweltmodellen, das am IIASA entwickelt wurde, näher untersucht wurden. Im Sinne der Studie sind Szenarien keine Prognosen zukünftiger Entwicklung, sondern lediglich in sich

Dr. A. Grübler, Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA); Dr. N. Nakićenović, Projektleiter im Projekt umweltverträgliche Energiestrategien am IIASA und Leiter der gemeinsamen IIASA-WEC-Studie über „Langfristige Energieperspektiven“ des Weltenergieerates (WEC), London



Szenarien im hier verstandenen Sinne: aus Vorannahmen mittels Modellrechnung abgeleitete Bilder möglicher Entwicklungspfade

Bild: ZEFA

den 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.

Bevölkerungswachstum

Die Weltbevölkerung wächst gemäß den heutigen mittleren Prognosen der Weltbank [3], der Vereinten Nationen und des IIASA bis zu rund 10 Mrd. Menschen im Jahr 2050 an und stabilisiert sich zu Ende des 21. Jahrhunderts bei rund 12 Mrd. 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 [4, 5], 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 bekanntes Ausmaß ansteigen. Im ökologisch ausgerichteten Fall C wird angenommen, daß die Urbanisierung etwas langsamer fortschreitet als in den anderen zwei Fällen.

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

Bild 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 Bild 1 dargestellt wird, entspricht den Projektionen des Falles B, der für die Entwicklungsländer die vorsichtigsten Annahmen betreffend ihres wirtschaftlichen Aufholprozesses trifft. Nichtsdestoweniger reduzieren sich die gegenwärtigen Unterschiede zwischen „arm“ und „reich“. Nicht nur werden durch wirtschaftliche Entwicklung einzelne Regio-

nen 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 in dem in Bild 1 dargestellten Fall B.

In der Studie wird auch die Berechnung der Kenngrößen des Wirtschaftswachstums weiterentwickelt, indem diese nicht nur zu offiziellen Wechselkursen, sondern auch auf der Basis von Kaufkraftparitäten berechnet werden. Kaufkraftparitäten geben eine präzisere Darstellung des relativen Niveaus von Wirtschaftsaktivitäten für Wirtschaftssysteme, die keinen freien Markt für Wechselkurse haben. Diese Unterscheidung wird besonders wichtig, wenn man Unterschiede in Energieintensitäten einzelner Regionen betrachtet.

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

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 Verbesserungsraten 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.

Technische Entwicklung

Der Studienbericht [1] widmet unter Bezugnahme auf die 1 400 Technologien umfassende Technologiedaten-

	Case		
	A Hohes Wachstum	B Mittelkurs	C Ökologisch ausgerichtet
Weltbevölkerung (10 ⁹)			
2050	10,1	10,1	10,1
2100	11,7	11,7	11,7
Welt-BSP (10 ¹² \$)			
2050	100	75	75
2100	300	200	220
Energieintensitätsverbesserung (% / Jahr)			
Welt (1990-2050)	mittel -1,0	gering -0,7	hoch -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	hoch	mittel	hoch
Nicht-fossile	hoch	mittel	gering
Technologiedynamik			
Fossile	hoch	mittel	mittel
Nicht-fossile	hoch	mittel	hoch
Emissionsbeschränkungen für CO ₂	nein	nein	ja
Kohlenstoffemissionen (GtC)			
2050	9-15	10	5
2100	7-22	14	2
Umwelsteuern	nein	nein	ja
Anzahl der Szenarien	3	1	2

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

bank des IASIA der Diskussion der Dynamik technologischer Veränderungen sowie der Technologieausbreitung (Diffusion) größeren 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 technische Entwicklungen 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 herausbilden. Verbesserungsdaten, 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 zunehmende 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 Verbesserungsdaten wie im Fall A

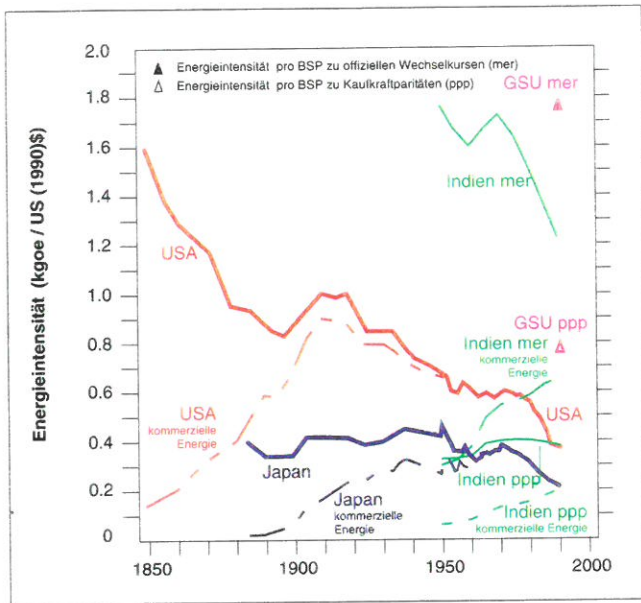


Bild 2: Primärenergieintensität für ausgewählte Länder, gesamte und kommerzielle Energie in Kilogramm Erdölseinheiten (kgoe) pro US-\$ (1990) für das BSP zu offiziellen Wechselkursen und das BSP zu Kaufkraftparitäten.
Quellen: [6, 7, 8, 9, 10]

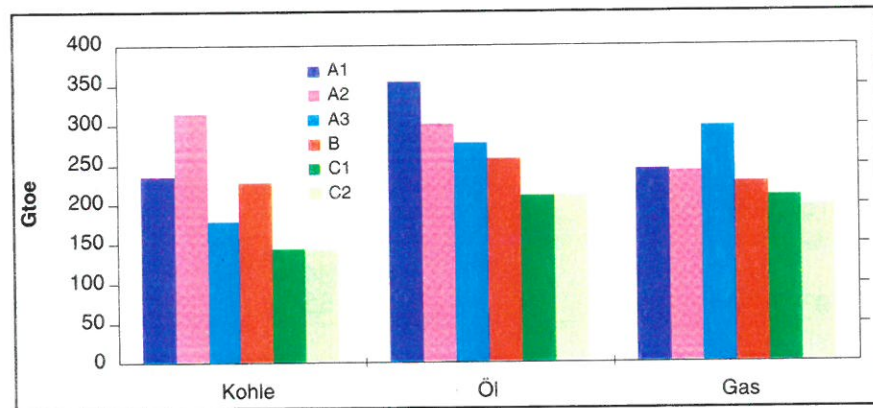


Bild 3: Kumulativer fossiler Ressourcenbedarf 1990-2050 in Gigatonnen Erdölseinheiten (Gtoe) Quelle: [1]

auf. Die Technologieentwicklung auf anderen Energiesektoren geht hingegen langsamer vor sich, wie z.B. in Fall B.

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. Bild 3 gibt eine Übersicht über den kumulativen Ressourcenverbrauch der Szenarien bis zum Jahr 2050. In keinem der Szenarien wird die zukünftige Verfügbarkeit exotischer Vorkommen (wie etwa von Methanhydraten) angenommen, doch werden die (enormen) geologischen Vorkommen dieser Mengen in der Studie [1] erwähnt.

Aus Sicht der Szenarien sind fossile Brennstoffressourcen sicherlich für mehr als 100 Jahre ausreichend, und zwar auch im höchsten Wachstums-szenario 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. So-

gar in den ökologisch ausgerichteten Szenarien im Fall C, mit dem relativ niedrigsten Einsatz von Kohle, wird zwischen 1990 und 2050 genau soviel Kohle genutzt 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 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 sie gewonnen und in Brennstoffe umgewandelt werden können. Die Berichte des Weltenergieerates [2, 11] 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 relativ 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.

Die Zukunftsaussichten der Energiesysteme

Kernaussage der Studie und der in ihr beschriebenen Szenarien ist, daß langfristig die Struktur der Endenergie-nachfrage 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.

Primärenergie

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

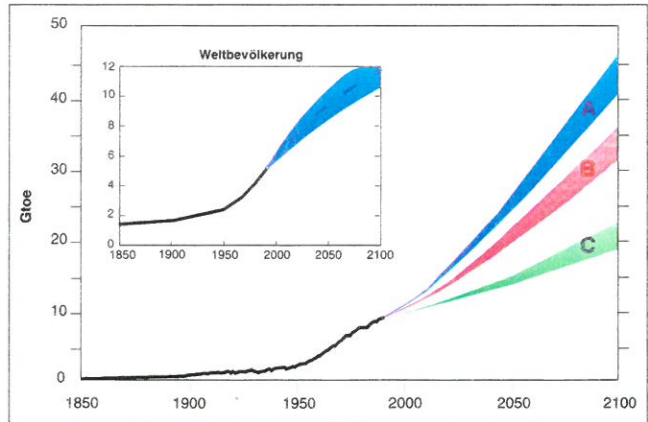
Die globale Primärenergie wächst bis zum Jahre 2100 auf ein zwei- bis fünffaches ihres heutigen Standes. Fall A nimmt Wachstumsraten für Primärenergie an, die in etwa den langfristigen historischen Erfahrungswerten entsprechen, während die Fälle B und C wesentlich niedrigere Wachstumsraten aufweisen. 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.

Einige grundlegende Zahlen für das Jahr 2050 für Primärenergieangebot und -nachfrage, die Zusammensetzung der Brennstoffversorgung und dem Endenergiebedarf der sechs Szenarien sind in Tabelle 2 ersichtlich. Investitionen und Emissionen sind dort ebenfalls zusammengefaßt.

Bild 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 je eine Quelle 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. Lang-

Bild 4: Globale Primärenergie (in 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 [3] bis zum Jahr 2100 in Milliarden Menschen Quelle [1]



	Fall / Szenario					
	A			B	C	
	A1	A2	A3	B	C1	C2
Primärenergie (Gtoe)	25	25	25	20	14	14
Anteil an Primärenergie (%)						
Kohle	24	32	9	21	11	10
Öl	30	19	18	20	19	18
Erdgas	24	22	32	23	27	24
Kernenergie	6	4	11	14	4	12
Erneuerbare Energieträger	16	23	30	22	39	36
Ressourcennutzung, 1990-2050 (Gtoe)						
Kohle	235	324	180	226	143	141
Öl	323	302	284	257	210	210
Erdgas	241	247	285	227	210	197
Investitionen des Energiesektors (US-\$ 10 ¹²)	1,2	1,7	1,2	1,1	0,7	0,7
US-\$/toe geliefert	50	67	47	56	50	50
als % des Welt-BSP	1,2	1,7	1,2	1,5	0,9	0,9
Endenergie (Gtoe)	17	17	17	14	10	10
Anteil an Endenergie (%)						
Feste Brennstoffe	16	19	18	23	19	20
Flüssige Brennstoffe	42	36	33	33	34	34
Elektrizität	17	18	18	16	18	17
Andere ^a	25	27	31	28	29	29
Emissionen						
Schwefel ^{b,c} , MtS	23	86	15	35	4	3
Stickstoff, MtN	21	55	21	22	14	12
Kohlenstoff, GtC	12	15	9	10	5	5

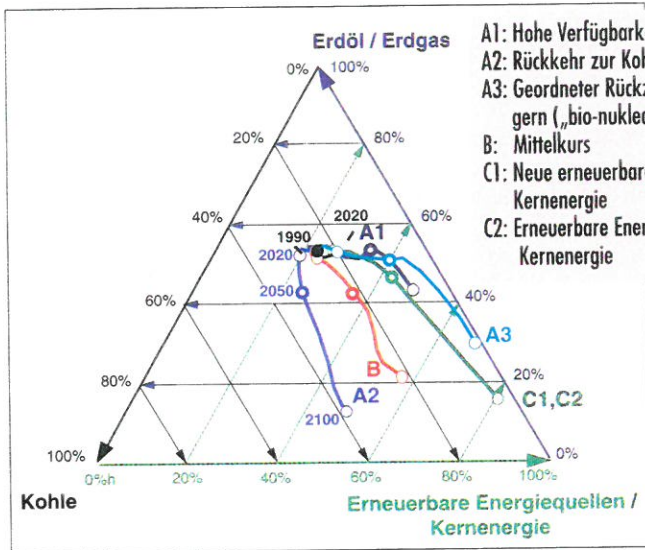
Tabelle 2: Charakteristische Werte der drei Fälle und sechs Szenarien für die Welt im Jahre 2050

fristig 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



**Bild 5: Veränderung in der Primärenergiestruktur der sechs Szenarien bis 2100; prozentuale Anteile von Erdöl und Erdgas, Kohle sowie nichtfossiler Quellen wie erneuerbarer Energien und Kernenergie
Quelle: [1]**

diesem Szenario die Kernkraft auch allgemein akzeptiert 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 konservativer und daher stärker auf Kohle ausgerichtet. Szenario A3 ist „technologie-intensiv“, doch hier verhilft die Kombination von neuen erneuerbaren Energiequellen und neuen Kerntechnologien zum 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 Versorgung wird dabei durch den „Brückensbrennstoff“ 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 40-50 % 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, CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2100 auf 2 Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) zu reduzieren.

Endenergie

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

Wo immer Sie wollen

z.B.

Anlagenüberwachung

Messen, steuern, regeln - Über das Datenfunknetz der GfD erfahren Sie sofort alle wichtigen Werte. Dann treffen Sie oder Ihr Computer die notwendigen Entscheidungen. Und kurz darauf ist wieder alles geregelt. Doch das ist nur ein Beispiel aus der Welt des Datenfunks.

Verpassen Sie den Anschluß nicht. Sprechen Sie mit jemandem, der sich auskennt: GfD.

Die Gesellschaft für Datenfunk.

Tel: 02 01.89 49-555

Fax: 02 01.89 49-100



Die Gesellschaft für Datenfunk

Strom ist bereits ein wichtiger Energieträger, und sein Beitrag erhöht sich in allen sechs Szenarien. Methanol spielt in der Zukunft ebenfalls eine größere Rolle. Wasserstoff ist ein weiterer Energieträger, der langfristig (nach 2050) eine wesentliche Rolle spielen wird. Viel Zeit wird benötigt, seine Wirtschaftlichkeit zu verbessern und eine Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen.

Finanzielle und Umweltauswirkungen

Finanzierung

Die Finanzierungserfordernisse für die in allen Szenarien aufgezeigten Alternativen sind enorm. Finanzierung ist in vielen Entwicklungsländern 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 3 bis 4 % des Bruttonationalprodukts in den Energiesektor investiert, und die Studie erwartet, daß dieser Prozentsatz ziemlich stabil bleibt. Nur in den Wirtschaftsreformländern Osteuropas und der ehemaligen Sowjetunion liegt dieser Anteil in den Szenarien mit 7 bis 9 % 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 einem Bereich von US-\$ 13 bis 20×10^{12} (US-\$1990) geschätzt. Die letztgenannte Zahl entspricht dem Weltbruttonationalprodukt des Jahres 1990. Der Anteil der Entwicklungsregionen steigt von seinen heutigen 25 bis 30 % auf 42 bis 48 %; sie werden in allen Szenarien zum größten Kapitalinvestitionsmarkt für Energie.

Zwischen 2020 und 2050 kommt es zu einem Übergang von Investitionen des Energiesektors (in den Berechnun-

gen inkludiert) zu Investitionen in Endverbrauchstechnologien und Infrastrukturen (nicht inkludiert). Unter Einfluß der letzteren wären die Investitionszahlen um mindestens 50 % höher. Dies ist auch der Grund, warum der Investitionsbedarf der Szenarien im Fall C niedriger als in den anderen Szenarien ist.

Umweltauswirkungen

Drei Arten von Umweltauswirkungen wurden in der Studie [1] 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_2 , und ihr möglicher Beitrag zu einer globalen Erwärmung. Stellvertretend sollen hier regionale und globale Umweltauswirkungen der Szenarien beschrieben werden.

Die Energieemissionen von Schwefeldioxid (SO_2) und Stickstoffoxiden (NO_x) haben sowohl lokale wie auch regionale Auswirkungen. „Saure Niederschläge“ vor allem der kohle- und schwefelintensiven Szenarien (wie A2) sind hier von besonderer Bedeutung und wurden mit Hilfe des IASA-„RAINS“-Modells [12, 13] 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^2 pro Jahr übersteigen. Demgegenüber fordert das zweite Schwefelprotokoll über grenzüberschreitende Luftverschmutzung eine Herabsetzung der maximalen Schwefelablagerungen auf unter 3 g/m^2 pro Jahr. In Asien ist die Situation noch weit dramatischer. Im Szenario A2, unter Annahme keinerlei Minderungsmaßnahmen, würden sich die SO_2 -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 aus-

IPCC IS92 Szenarien	a	1 500
	b	1 430
	e	2 190
WEC „Energie für die Welt von Morgen, 1993	A	1 425
	B	1 130
	C	625
IIASA – WEC „Globale Energieperspektiven 2050“, 1995	A2	1 720
	A1	1 350
	A3	980
	B	1 190
	C1	590
	C2	580
* Unter vergleichbaren Annahmen über das Bevölkerungswachstum (mittlere UNO Prognose). Quellen: [1, 2, 14, 15].		

Tabelle 3: Kumulative CO_2 -Emissionen 1990-2100 (in GtC): Ein Vergleich zwischen den IPCC- und WEC- Szenarien*

schließlich die Verwendung umweltverträglicher Kohletechnologien, inklusive Rauchgaswäschern. Die Schwefelemissionen sind folglich wesentlich niedriger als in Fällen mit keinerlei Minderungsmaßnahmen. Die Ergebnisse der Szenarien sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Treibhausgasemissionen

Die Emissionen an CO_2 , dem hauptsächlichen Treibhausgas, unterscheiden sich wesentlich in den einzelnen Szenarien. In dem intensiv auf Kohle ausgerichteten Szenario A2 erreichen sie im Jahre 2100 22 GtC (Gigatonnen reinen Kohlenstoffs) und im Szenario A1 15 GtC; im Szenario A3 beträgt ihr Wert aufgrund von strukturellen Veränderungen des Energiesystems 7 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 konzertierte Maßnahmen zum Klimaschutz annehmen, führen zu einer Stabilisierung auf jetzigem Niveau im Jahre 2050, und erreichen bis zum Jahr 2100 2 GtC, was einen Rückgang auf ein Drittel ihres heutigen Standes bedeutet.

Die aus der Studie resultierenden kumulativen Kohlenstoffemissionen, die als besonders relevant für potentielle Klimaveränderung angesehen werden, werden in Tabelle 3 früheren WEC-

Szenarien [2] und vergleichbaren Emissionsszenarien des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change [14, 15]) gegenübergestellt.

Die atmosphärischen CO₂-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 [16] berechnet. Bis zum Jahr 2100 erreichen die zwei Szenarien von Fall C eine atmosphärische CO₂-Konzentration von unter 420 ppmv (Teile pro Million volumensmäßig berechnet); Fall B liegt unter 580 ppmv; und die drei Szenarien von Fall A liegen bei 520 ppmv (A3), 610 ppmv (A1) und 730 ppmv (A2). A2 ist das einzige Szenario, das den Wert des „bevorzugten“ IPCC-Szenarios (IS92a) überschreitet.

Es bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich der Auswirkungen solcher 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 +2,5 °C.

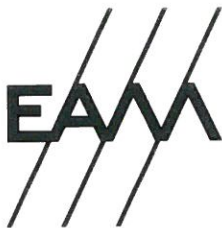
Schlußfolgerungen

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, bequemerem und saubereren Energieformen 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, nicht nur aufgrund der enormen Geldsummen, die damit verbunden sind.

Die in anderen Studien getroffene Annahme, daß ein hoher Anstieg der Energienachfrage bei nur begrenzten technologischen und finanziellen Fortschritten möglich ist, wird in dieser Stu-



Partner für Energie und Umwelt

- Wir sorgen für eine sichere, umweltfreundliche und preiswerte Energieversorgung für über zwei Millionen Menschen in Hessen, Südniedersachsen und Ostwestfalen.
- Den mit uns partnerschaftlich verbundenen Kommunen, der Industrie, dem Handwerk und der Landwirtschaft stehen wir bei der Lösung ihrer Energie- und Umweltprobleme zur Seite.
- Das Dienstleistungsangebot der EAM und der mit ihr verbundenen Gesellschaften geht weit über die traditionelle Versorgung mit Energie hinaus: Abfallentsorgung und Kompostierung, Trinkwasserversorgung, Wasseraufbereitung und -reinigung, Umweltanalytik und Altlastensanierung sowie schließlich Erdgas- und Fernwärmeversorgung gehören heute zum Aufgabenbereich des kommunalen-regionalen Unternehmens.
- Wir fördern traditionell die ergänzenden Energien, wo immer es wirtschaftlich vertretbar ist – die EAM entstand auf der Basis der Wasserkraft.
- Wir beraten unsere Kunden in allen Fragen der Energieversorgung, des sinnvollen Umgangs mit der Energie und der Nutzung von additiven Energien.
- Weitere Informationen zu folgenden Themen senden wir Ihnen gerne zu:
 - Dienstleistungsspektrum im EAM-Gesamtunternehmen
 - Energieerzeugung und additive Energien
 - Energiesparen und Umweltschutz

ENERGIE-AKTIENGESELLSCHAFT MITTELDEUTSCHLAND

EAM-Unternehmens-Kommunikation, Monteverdstraße 2, 34131 Kassel

die in Frage gestellt. Rigorose internationale Umweltmaßnahmen (inklusive einer Beschränkung der CO₂-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 einigen 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, Versorgungsnetzen und anderen 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 werden erschlossen werden müssen, da sich der Übergang vom Verkauf (nur) von Energieträgern zur Vermarktung von Energiedienstleistungen fortsetzen und noch verstärken wird.

Die Botschaft im Mittelpunkt aller sechs Szenarien liegt darin, daß langfristig die Strukturen der Endenergienut-

zung in Richtung reinerer, flexiblerer und bequemerer 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 die Notwendigkeit), strategische Entscheidungen zu treffen. Auch wenn die strukturellen Veränderungen in der näheren Zukunft geringfügig 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 bestimmen, welche der, in der Studie aufgezeigten, langfristig divergierenden Alternativen zum Tragen kommen, und welche ausgeschlossen werden.

In der Studie wurden Tendenzen aufgezeigt, die sich gegenüber dem bewußt breit angesetzten Spektrum der Szenarien als robust erweisen. Es wurden auch die Bedingungen beschrieben, unter denen sich zukünftige Strukturen der Energiesysteme in alternative Richtungen auseinanderentwickeln. Dennoch wird keine Analyse und Studie je eine unbekannte Zukunft in eine sichere Prognose verwandeln können.

Literatur

[1] International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) und WEC (World Energy Council): *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, WEC, London, UK, 1995. Zu beziehen über: World Energy Council, 34 St. James's Street, London SW1A 1HD; fax (+44171) 839 3285. Die englische Kurzfassung des Berichts kann vom IIASA (A-2361) Laxenburg, Österreich bezogen werden. A. Grübler, M. Jefferson, N. Nakicenovic: *A Summary of the Joint IIASA and WEC Study on Long-Term Energy Perspectives*. WP-95-102, September 1995.

[2] WEC (World Energy Council): *Energy for Tomorrow's World - The Realities, the Real Options and the Agenda for Achievements*, Kogan Page, London, UK, 1993.

[3] Bos, E., M.T. Vu, A. Leven, und R.A. Bulatao: *World Population Projections 1992-1993*, John Hopkins University Press, Baltimore, USA, 1993.

[4] UN (United Nations): *World Urbanization Prospects: The 1992 Revision*, Population Division, Division of Economic Development, UN, New York, USA, 1994.

[5] Berry, B.J.L.: *Urbanization*, in: 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, pp. 103-119, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.

[6] Maddison, A.: *The World Economy in the 20th Century*, Development Centre Studies, Organisation for Economic Co-Operation and Development, OECD, Paris, France, 1989.

[7] 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, USA, 1993.

[8] Nakicenovic, N.: *Technological Substitution and Long Waves in the USA*, in: T. Vasko (ed.) *The Long Wave Debate*, pp. 76-104, Springer Verlag, Berlin, Germany, 1987.

[9] Martin, J.M.: *L'Intensité Énergétique de L'Activité Économique dans Les Pays Industrialisés: Les Evolutions de Très Longue Période Livrent Elles des Enseignements Utiles?* *Economies et Sociétés*, 4:9, 27, 1988.

[10] TERI (Tata Energy Research Institute): *TERI Energy Data Directory Yearbook*, Pauls Press, New Delhi, India, 1994.

[11] WEC (World Energy Council): *New Renewable Energy Resources: A Guide to the Future*, Kogan Page, London, UK, 1994.

[12] Alcamo, J., R. Shaw, und L. Hordijk (eds.): *The RAINS Model of Acidification, Science and Strategies in Europe*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1990.

[13] Amann, M., J. Cofala, P. Dörfner, F. Gyrfas, 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.

[14] 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*, pp. 247-304, Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Grübler, A. und A. McDonald: *The Drive to Cleaner Energy. Options Fall/Winter 1995: 8-11.*



