Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 11–33*

Karl Lanius

Szenarien des Klimawandels

Der Zwischenstaatliche Ausschuß für Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) wurde 1988 durch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Seine Aufgaben umfassen:

- Die Bewertung der verfügbaren wissenschaftlichen und sozioökonomischen Informationen zur Klimaänderung sowie die Möglichkeiten zur Vermeidung der Klimaänderungen und zur Anpassung daran.
- Auf Anfrage die Erteilung von wissenschaftlichen/ technischen / sozioökonomischen Ratschlägen an die Vereinten Nationen.

Wesentliche Ergebnisse der Arbeit von vielen hundert Experten aus aller Welt fanden ihren Niederschlag in den bisher veröffentlichten drei Wissensstandsberichten des IPCC aus den Jahren 1990, 1995,und 2001.[1] Ein Synthesebericht speziell für politische Entscheidungsträger wurde auf der Grundlage des dritten Zustandsberichtes erarbeitet.[2]

Auf dem Erdgipfel, der 1992 in Rio de Janeiro stattfand, wurde ein „Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen“ (UNFCCC) verabschiedet. Es setzt das Ziel, die Konzentration der klimarelevanten Treibhausgase, die durch den menschlichen Stoffwechsel mit der Natur freigesetzt werden, auf einem *nachhaltigen* Niveau zu stabilisieren. Als Ziel des Übereinkommens heißt es in Artikel 2:

„Das Endziel dieses Übereinkommens und aller damit zusammenhängenden Rechtsinstrumente, welche die Konferenz der Vertragsparteien beschließt, ist es, in Übereinstimmung mit den einschlägigen Bestimmungen des Übereinkommens die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau

1 IPCC Climate Change, Cambridge 1991. IPCC (Hrsg.) Climate Change 1995, Cambridge 1996. IPCC (Hrsg.) Climate Change 2001, Cambridge 2002.

2 Klimaänderung 2001, Synthesebericht. Bonn 2001.

sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann."

Das Übereinkommen trat im März 1994 in Kraft. Auf der Kyoto Konferenz (1997) wurde ein Protokoll beschlossen, das die Staaten verpflichtet, innerhalb des Zeitraums 2008–2012 ihre Treibhausgasemissionen um 5,2 Prozent zu verringern gegenüber dem Stand von 1990.

Nach der Ratifizierung durch Rußland trat das Kyoto-Protokoll am 15.2.2005 in Kraft, mehr als sieben Jahre nach seiner Verabschiedung.

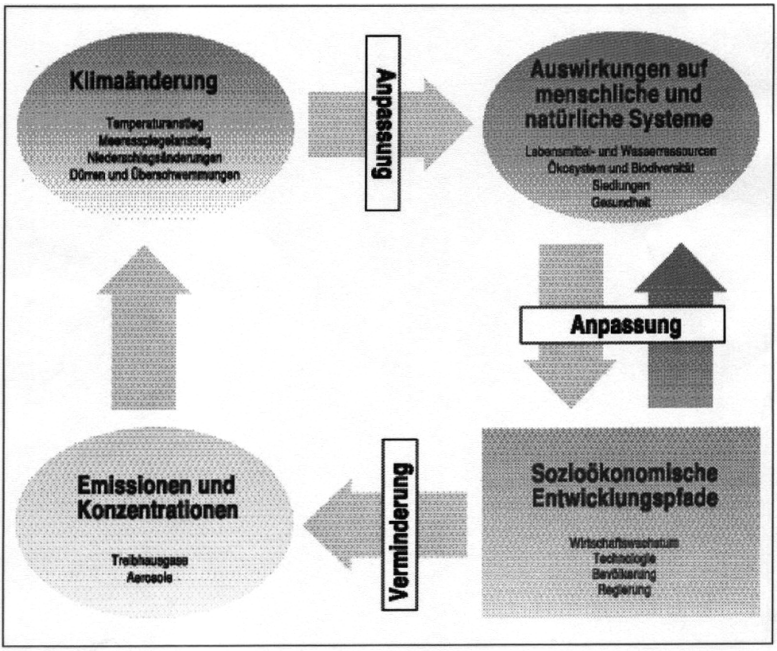

Abb.1: Schematische und vereinfachte Darstellung des Systems zur Betrachtung der anthropogenen Klimaänderung (Quelle IPCC 2001)[3]

Jede Diskussion der Probleme einer zukünftigen nachhaltigen Sicherung der Energie- und Rohstoffversorgung läßt sich nicht von den Folgen trennen, die

3 Die Abbildungen, die in den Quellen in Farbe zu finden sind, werden hier aus technischen Gründen in Schwarz-Weiß abgedruckt.

die bisherige Energieerzeugung und –nutzung auf das Klima hatten. Um sie bewerten zu können, sind einige Erläuterungen zu den Einschätzungen des IPCC erforderlich.

Die IPCC-Wissensstandsberichte unterscheiden zwischen einer Vorhersage (prediction) und einem Entwurf (projection). Den Entwurf kann man als eine bedingte Vorhersage betrachten, die sich erfüllt, wenn die in Szenarien zusammengefaßten Annahmen zutreffen.

Jede integrative Betrachtung der Klimaänderungen muß die Dynamik des Kreislaufs von verknüpfenden Ursachen und Wirkungen im System berücksichtigen. Abb.1 zeigt in einem vereinfachenden Schema diese Verknüpfungen. Die helleren Pfeile zeigen den Kreislauf von Ursache und Wirkung, der dunklere Pfeil deutet die gesellschaftliche Antwort an.

In meinem Beitrag beschränke ich mich auf die Wechselwirkung zwischen sozioökonomischen Entwicklungspfaden und ihren Wirkungen auf Emission und atmosphärischer Konzentration klimarelevanter Treibhausgase. Ich werde über die Szenarien berichten, die in den bisherigen Wissensstandsberichten betrachtet wurden und über weiterführende Ansätze.

Zunächst einige Bemerkungen zu den klimarelevanten Treibhausgasen:

Das wirksamste Treibhausgas ist Wasserdampf – die Luftfeuchte, deren Konzentration durch verschieden Maße ausgedrückt wird. Während trockene Luft bis in große Höhen eine einheitliche Zusammensetzung hat, unterliegt die Konzentration von Wasserdampf starken lokalen und regionalen Schwankungen. Sie hängt von der Lufttemperatur ab sowie von Kontakten der Luftmassen mit den Wasserreservoirs der Erdoberfläche. Die Wasserdampfkonzentration variiert zwischen Bruchteilen eines Prozents und mehr als drei Prozent.

Die wichtigsten anthropogenen Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid oder Lachgas(N_2O) und die voll- oder teilhalogenisierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFCs und PFCs) sowie Schwefelhexafluorid (SF_6).

Wie alle bisherigen Untersuchungen zweifelsfrei belegen, ist der Einfluß der Kohlendioxid-Emission aus der Verbrennung fossiler Energieträger dominierend für den Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration. Bis zu Beginn der industriellen Revolution lag sie bei 280ppm.[4]

Mit der Entstehung der industriellen Zentren, z.B. in Mittelengland und im Ruhrgebiet, wuchs der CO_2-Ausstoß weltweit jährlich um vier Prozent. Der weitere Anstieg wurde durch Weltkriege, Weltwirtschaftskrise, Ölkrise

4 Der Gehalt an Spurengasen in der Atmosphäre wird in parts per million – 1ppm=0,0001 Prozent Volumenanteil angegeben (1000ppb = 1ppm).

und den Zusammenbruch der Industrien in den Ländern des Realsozialismus vorübergehend gebremst – aufgehalten wurde er nie. Gegenwärtig steigt er wieder stärker an, wie die Messungen auf dem Mauna Loa (Hawaii) belegen (siehe Abb.2).

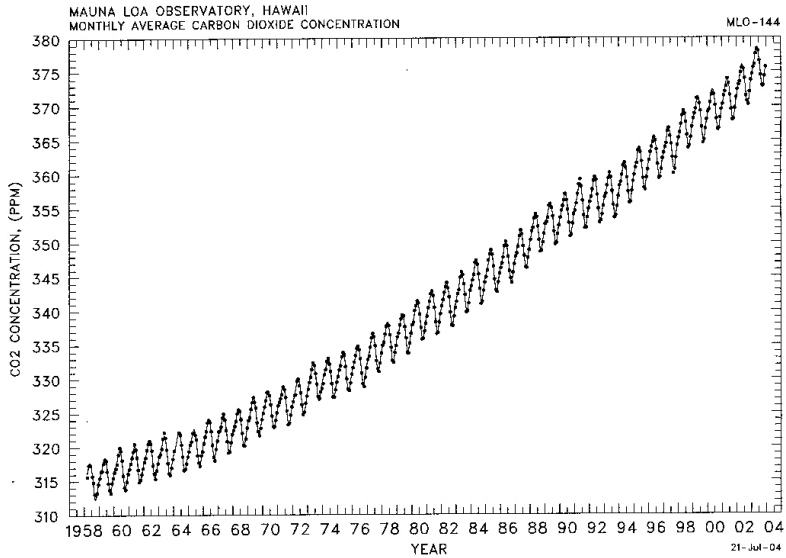

Abb.2: Messung der Kohlendioxid-Konzentration auf dem Mauna Loa (Hawaii).

Die sehr präzisen Messungen in einer ungestörten Hochlage begannen 1957/58 im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres. Die im Jahresrhythmus auftretenden Schwankungen sind deutlich erkennbar. Sie werden vom Verhalten der Biosphäre auf den ausgedehnten Festlandflächen der Nordhalbkugel bestimmt. Im Sommerhalbjahr nehmen die Pflanzen der Nordhalbkugel Kohlendioxid auf, im Winterhalbjahr gibt verwesende Biomasse CO_2 an die Atmosphäre ab.

Methan (CH_4) stammt überwiegend aus dem Stoffwechsel anaerober Bakterien beim Abbau organischen Materials. Insbesondere bei grasfressenden Wiederkäuern, beim Reisanbau und in Müllhalden, aber auch bei der Verbrennung von Biomasse wird Methan freigesetzt.

Lachgas (N_2O) setzen Bodenbakterien frei. Es entsteht auf überdüngten Feldern und beim Humusabbau in tropischen Regenwäldern. Es bildet sich auch bei Verbrennung unter hohen Temperaturen, z.B. in Düsentriebwerken.

Viele halogenierte Kohlenstoffe, die in der Industrie erzeugt und freigesetzt werden, wirken sowohl als Treibhausgase als auch bei der Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre. Durch die Festlegung des Protokolls von Montreal und dessen Anschlußvereinbarungen wurde eine Emissionsreduktion durchgesetzt. Ersatzstoffe und weitere synthetische Stoffe wie die HFCs, PFCs und SF_6 erweisen sich ebenfalls als sehr effektive Treibhausgase.

Bei allen Unsicherheiten, mit denen Vorhersagen über die Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert verbunden sind, mit Sicherheit wissen wir, daß die Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre seit dem Beginn der Industriellen Revolution wächst. Nachfolgende Tabelle 1 zeigt die Veränderungen bei den wichtigsten klimarelevanten Treibhausgasen zum Ende des 20. Jahrhunderts gegenüber der vorindustriellen Zeit.

Treibhausgase	**Anstieg der Konzentration**
CO_2	von 280 ppm auf 360 ppm
CH_4	von 700 ppb auf 1750 ppb
N_2O	von 270 ppb auf 316 ppb
HFCs, PFCs, SF_6	globaler Anstieg in den letzten 50 Jahren

Tab. 1: Anstieg der Konzentration der Treibhausgase (Quelle IPCC)

Die atmosphärische Konzentration von CO_2 und CH_4 erreichten damit die höchsten Werte der zurückliegenden 420 000 Jahre.

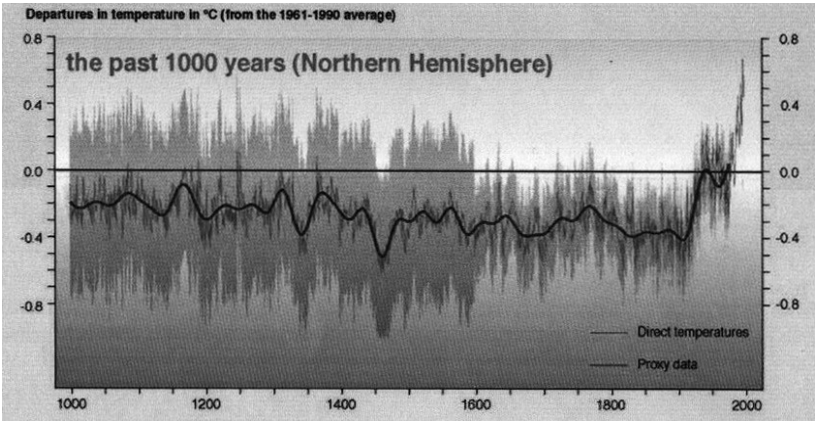

Abb.3: Variation der Oberflächentemperatur auf der Nordhalbkugel (Quelle IPCC).

Wir können mit gutem Grund annehmen, daß der Anstieg anthropogener Treibhausgase zu einer Erwärmung in der unteren und mittleren Troposphäre bei gleichzeitiger Abkühlung in höheren Schichten führte und weiter führen wird. Abb. 3 zeigt als Beispiel den Temperaturverlauf der zurückliegenden 1000 Jahre auf der Nordhalbkugel.

Bei der Bewertung der Wirksamkeit – des Treibhauspotentials, – der im Kyoto-Protokoll neben dem CO_2 genannten Treibhausgasen, ist zu berücksichtigen, daß diese zum Teil weit höhere Werte des Treibhauspotentials als CO_2 haben. Die Wirksamkeit eines Treibhausgases hängt von der Verweilzeit in der Atmosphäre und vom Absorptionsverhalten gegenüber der Wärmestrahlung ab. Ursache verschiedener Verweilzeiten sind überwiegend unterschiedliche Stoffzyklen. Abb. 4 demonstriert die Abnahme der Konzentration der Treibhausgase in Abhängigkeit von der Verweilzeit.

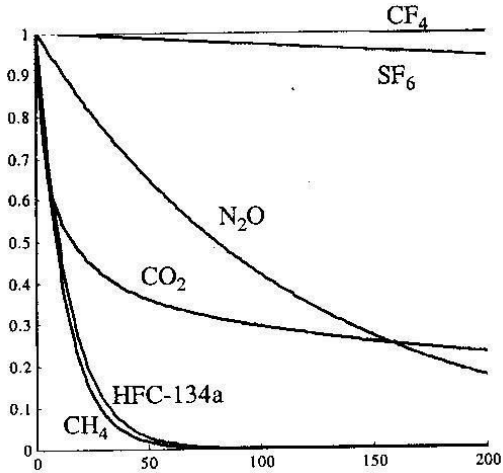

Abb.4: Zeitlicher Verlauf des Zerfalls der Treibhausgase. Aufgetragen ist der Konzentrationsabfall gegen die Verweilzeit in Jahren (Quelle UNFCC).

Die unterschiedlichen Treibhauspotentiale werden durch CO_2-Äquivalente ausgedrückt. CO_2-Äquivalente lassen sich wegen der variierenden Zerfallszeiten nur über einen vorgegebenen Zeithorizont angeben. Tabelle 2 zeigt die Treibhauspotentiale für Zeithorizonte von 20 und 100 Jahren.

Gas	**Treibhauspotentiale für Zeithorizonte**	
	von 20 Jahren	**von 100 Jahren**
CO_2	1	1
CH_4	62	23
N_2O	275	296
HFC – 134a	3300	1300
CF_4	3900	5700
SF_6	15 100	22 200

Tab. 2: Die Treibhauspotentiale für zwei Zeithorizonte (Quelle IPCC).

In Tabelle 3 sind als Beispiel die relativen Beiträge der Treibhausgase, die von den EU-Staaten emittiert wurden, für die Jahre 1990 und 2000 gegenüberstellt.

Gas	**relativer Beitrag in %**	
	1990	**2000**
CO_2	10,12	8,40
CH_4	9,51	8,31
N_2O	0,58	1,16
HFC – 134a	0,32	0,17
CF_4	0,20	0,22

Tab. 3: Die relativen Beiträge der verschiedenen Spurengase zum Treibhauspotential für die Länder der EU (Quelle UNFCCC).

Szenarien über mögliche Wege der Menschheitsentwicklung bestimmen die Modellrechnungen der Klimatologen. Darin werden in der Regel folgende Komplexe berücksichtigt:

- Bevölkerungswachstum
- Ökonomische Entwicklung
- Energieerzeugung und –verbrauch
- Landwirtschaft
- Umgang mit tropischen Regenwäldern.

Betrachten wir zunächst die vier Szenarien, die im Wissensstandsbericht des Jahres 1990 benutzt wurden.

Szenario A heißt: *Business as usual.* Es geht von folgenden Voraussetzungen aus:

- Der Energieverbrauch nimmt weltweit zu, und zwar in den Entwicklungsländern stärker als in den Industrienationen. Er vervierfacht sich bis zum Jahr 2100.
- Zu dieser Zeit werden auf der Erde mehr als 10 Milliarden Menschen leben.
- Die Energieversorgung erfolgt zu rund 90 Prozent durch fossile Brennstoffe. Nur wenige Prozent des Energiebedarfs werden über Kernenergie und aus regenerativen Quellen wie Wasser-, Sonnen- oder Windkraft gedeckt.
- Das Abholzen der tropischen Regenwälder geht unvermindert weiter – zumindest solange noch merkliche Bestände vorhanden sind.
- Die Emissionsrate von Methan verdoppelt sich bis zum Jahr 2100, denn mehr Menschen bedeuten mehr Landwirtschaft, mehr Rinder und mehr Reisfelder. Außerdem entweicht zusätzliches Methan beim Abbau und Transport von Kohle, Öl und Erdgas.
- Die Lachgasproduktion wird um 35 Prozent zunehmen. Dieser Zuwachs kommt nicht nur aus der Landwirtschaft, sondern auch aus zusätzlichen Kraftwerken und den Auspufftöpfen der Autos.
- Der Ausstoß der FCKW und Halone steigt – wenn das Montrealer Protokoll nicht verschärft wird – um 130 Prozent. Die von dem Abkommen betroffenen Substanzen F-11 und F-12 nehmen zwar nicht mehr weiter zu, dafür aber Ersatzstoffe, die bisher keinen Beschränkungen unterliegen.

Unter diesen, durchaus realistischen, Bedingungen verdoppelt sich der *reine* Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre bis zum Jahr 2060 (vorausgesetzt, die Ozeane nehmen nicht – aus bisher unbekannten Gründen – mehr/weniger CO_2 auf). Alle Treibhausgase zusammengenommen ergibt eine entsprechende Zunahme des Treibhauseffektes schon im Jahr 2030.

Szenario B, das der *mäßigen Eingriffe,* geht von folgender Entwicklung aus:

- Der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre verdoppelt sich bis zum Jahr 2100. Das liegt vor allem daran, daß statt Kohle verstärkt Erdgas verheizt wird, wobei, auf den Energiewert bezogen, weniger CO_2 entsteht.
- Die Lachgas-Emissionen wachsen um zehn Prozent.
- Der Methanausstoß steigt um nur 45 Prozent, weil Förderung und Transport von Erdgas besser kontrolliert werden und dabei weniger Methan in die Atmosphäre entweicht.
- Die FCKW- und Halonproduktion verdoppelt sich. Das Montrealer Protokoll wird verschärft, aber F-22 darf weiter unvermindert hergestellt werden.

- Der Raubbau am Regenwald verlangsamt sich geringfügig.
- Selbst unter diesen Bedingungen reichern sich Lachgas und die FCKW aufgrund ihrer besonders langen Lebenszeit stark in der Atmosphäre an. Eine Treibhauswirkung aller beteiligten Gase, die einer alleinigen CO_2-Verdopplung entspricht, ist im Jahr 2060 erreicht. Anschließend ist noch mit einem weiteren Anstieg der Kohlendioxid- und FCKW-Emissionen zu rechnen.

Bei Szenario C, das ein politisches *Crash-Programm* erfordert, ließe sich eine CO_2-Verdopplung bis in das Jahr 2090 hinauszögern.

Es beruht auf folgenden Annahmen:

- Der Kohlendioxid-Ausstoß steigt um weitere 30 Prozent bis zum Jahr 2050 und sinkt dann bis 2100 um 40 Prozent, also unter das heutige Niveau.
- Die Abholzrate im tropischen Regenwald und die Zerstörung anderer Wälder gehen schon in den nächsten zehn Jahren um die Hälfte zurück und erreichen danach ein konstantes Maß.
- Die Lachgas-Emissionen steigen nur wenig, weil weniger fossile Brennstoffe verheizt werden.
- Aus dem gleichen Grund steigt der Methan-Ausstoß nur bis zum Jahr 2050. Anschließend sinkt er sogar geringfügig.
- Die FCKW werden drastisch eingeschränkt. Die Herstellung von F-11 und F-12 verringert sich zwischen den Jahren 2000 und 2025 auf zehn Prozent der heutigen Menge. Dennoch verstärkt sich die Gesamttreibhauswirkung der FCKW bis zum Jahr 2100 um 40 Prozent, weil sich die F-22-Produktion verzehnfacht.

Szenario D, die *Vollbremsung* fordert eine sofort beginnende drastische Verminderung des Ausstoßes an Treibhausgasen Der Pro-Kopf-Einsatz an Energie müßte weltweit und stetig sinken. Die Produktion der FCKW und Halone müßte umgehend eingestellt werden.

Bei dieser wünschenswerten Entwicklung käme die Menschheit mit einem „blauen Auge“ davon. Zwar wird in diesem Szenario die Gesamtmenge der Treibhausgase in der Atmosphäre noch bis zum Jahr 2030 steigen und damit 170 Prozent des vorindustriellen Wertes erreichen, danach aber nicht mehr. Verschmutzung und natürlicher Abbau erreichen dann ein Gleichgewicht.[5]

---

5 Graßl, H.; Klingholz, R. Wir Klimamacher. Frankfurt a. M. 1990, S. 155ff.

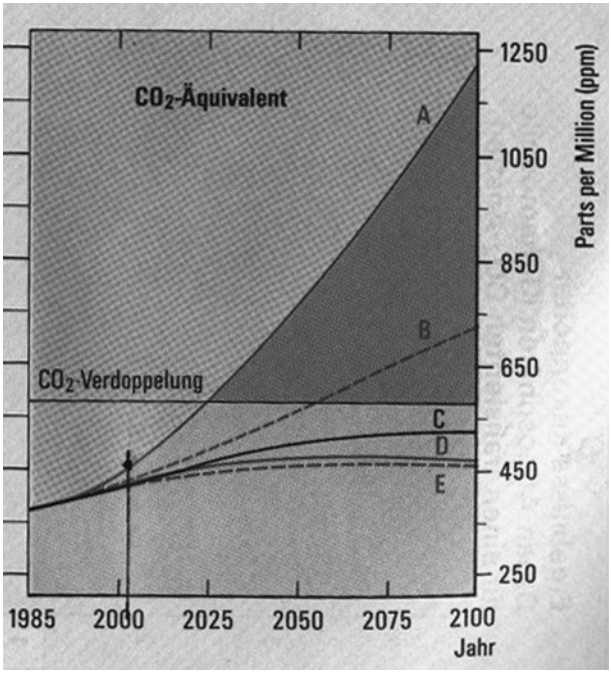

Abb.5: Der erwartete Anstieg des CO_2-Äquivalents für die Szenarien A-E (Quelle Enquete Kommission des Bundestages 1992).

Seitdem sind 15 Jahre vergangen. Zumindest in der Tendenz sollte erkennbar sein, welches der vier Szenarien dem bisherigen Anstieg der klimarelevanten Spurengase entspricht. Abb. 5 zeigt den erwarteten Anstieg des CO_2-Äquivalents für die Szenarien. Zum Ende 2004 wurde ein CO_2-Äquivalent von rund 460 ppm erreicht. Wie in der Abbildung angedeutet, entspricht dies dem Erwartungswert von Szenarium A (business as usual).

Im zweiten IPCC-Bericht wurden sechs Szenarien betrachtet IS92a bis IS92f:

Szenario IS92a geht von folgenden Annahmen aus:

- Bevölkerungswachstum bis 2100 auf 11,3 Milliarden
- Ökonomisches Wachstum um jährlich 2,9 % bis 2025, bis 2100 um 2,3 %
- Verwendung konventioneller und erneuerbarer Energiequellen, deren Anteil bis 2100 auf 43 % steigt
- Bis 2100 werden 73 % der noch vorhandenen Regenwälder vernichtet sein
- Es gibt kein wirksames Abkommen zur CO_2-Reduktion. Abkommen zur

Reduktion der FCKW werden weltweit voll wirksam.

Szenario IS92b geht von der gleichen Annahme wie IS92a aus. Hinzu kommt lediglich eine Vereinbarung zur CO_2-Stabilisierung.

Szenario IS92c:

- Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts dann Rückgang auf 6,4 Milliarden bis 2100
- Jährliches Wirtschaftswachstum um 2,0 % bis 2025, bis 2100 um 1,2 %
- Bis 2100 werden im großen Umfang alternative Energien, einschließlich der Kernenergie genutzt
- Emissionsbeschränkungen wie in IS92a

Szenario IS92d:

- Bevölkerungswachstum wie in IS92c.
- Wirtschaftswachstum bis 2025 um jährlich 2,7 %, bis 2100 um 2,0 %.
- Energieerzeugung wie in IS92c.
- Weltweite Kontrolle einiger Treibhausgase. Ausstieg aus der CFC-Erzeugung bis 1997 in den Industriestaaten.
- Stop des Abbaus der tropischen Regenwälder.

Szenario IS92e:

- Anstieg der Weltbevölkerung auf 11,3 Milliarden.
- Wachstum des Bruttosozialprodukts bis 2025 um jährlich 3,5 %, bis 2100 um 3,0 %.
- bis 2075 Ausstieg aus der Kernenergie.
- Emissionskontrollen bei Anstieg der Kosten für fossile Energieträger.

Szenario IS92f:

- Anstieg der Weltbevölkerung bis 2100 auf 17,6 Milliarden.
- Wirtschaftswachstum bis 2025 um 2,9 % jährlich, bis 2100 um 2,3 %.
- Energieerzeugung wie in IS92e.

Auch diese Szenarien, die mit wachsendem Zeithorizont mit großen Unsicherheiten behaftet sind, führen zu einem Anstieg CO_2-Konzentration in der Atmosphäre Abb. 6 zeigt den erwarteten Verlauf bis 2100. Je nach Szenarium wächst die CO_2-Konzentration zwischen 75 und 220 % gegenüber 1990. Den stärksten Anstieg zeigt IS92e mit seinen Annahmen über ein moderates Bevölkerungswachstum, einen starken Anstieg des Bruttosozialprodukts, eine starke Nutzung fossiler Brennstoffe und einen Ausstieg aus der Kernenergie. Den günstigsten Verlauf zeigt IS92c mit seinen Annahmen über ein geringes Bevölkerungswachstum, ein geringes Wirtschaftswachstum und Einschränkungen beim Verbrauch fossiler Brennstoffe. Szenarium IS92a, dessen Annahmen denen des vorher betrachteten Szenariums 90A „business

as usual“ ähneln, zeigt einen 90A entsprechenden Anstieg der CO_2-Konzentration. Nach 92a soll die CO_2-Konzentration von 450ppm um das Jahr 2030 erreicht werden.

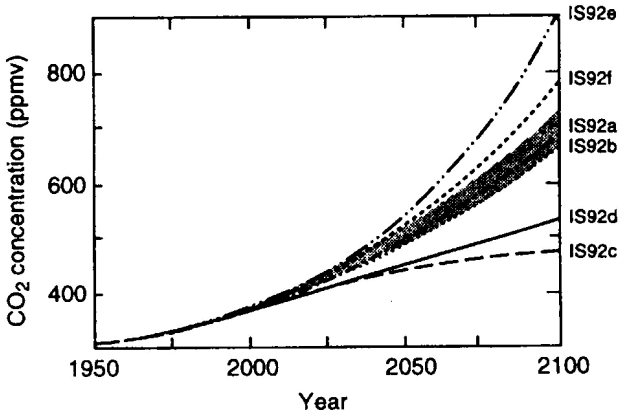

Abb.6: Anstieg der CO_2 Konzentration bis 2100 für die 6 Szenarien IS92a-IS92f. Der Fehlerbereich für IS92a ist geschwärzt angedeutet (Quelle IPCC).

Bemerkenswert erscheint, daß keines der sechs Szenarien zu einer Stabilisierung der CO_2-Konzentration bis 2100 führt.

Die neuen Szenarien, die dem dritten Wissensstandsbericht zugrunde liegen, wurden in einem IPCC-Spezialbericht zusammengefaßt. Es sind Szenarien ohne klimapolitische Maßnahmen, die die große Bandbreite zukünftiger Entwicklungen deutlich machen.

„Die insgesamt 40 Szenarien wurden in vier Familien gruppiert. Alle Szenarien einer Familie haben eine charakteristische „Geschichte“ (storyline) also eine Beschreibung der Beziehungen zwischen Einflußfaktoren und ihrer Entwicklung. Die vier Familien lassen sich vereinfacht in zwei Dimensionen unterscheiden: Die erste Dimension unterscheidet eine Welt mit starker Ausrichtung auf Wirtschaftswachstum (A) von einer Welt, die auf Nachhaltigkeit ausgerichtet ist (B). In der B-Welt werden umweltpolitische Maßnahmen etwa zur Luftreinhaltung berücksichtigt, nicht jedoch Maßnahmen, die spezifisch auf den Klimaschutz ausgerichtet sind (beispielsweise CO_2-Steuern). Die zweite Dimension erlaubt die Unterscheidung zwischen einer Welt zunehmender ökonomischer Konvergenz und sozialer und kultureller Interaktion zwischen den Regionen (Globalisierung 1) von einer Welt mit stärkerer Betonung regionaler Unterschiede und lokaler Lösungen (Regionalisierung 2).

Es ergeben sich vier Szenariofamilien: A1 (Hohes Wachstum), B1 (Globale Nachhaltigkeit), A2 (Regionalisierte Wirtschaftsentwicklung), B2 (Regionale Nachhaltigkeit).

AI-Welt: Hohes Wachstum

Die Al-Storyline weist folgende Charakteristika auf: starke Marktorientierung, anhaltendes Wirtschaftswachstum (weltweit etwa 3% jährlich, entsprechend dem Wachstum der letzten 100 Jahre), starke Betonung von Investition und Innovation in Bildung, Technologie und Institutionen, rasche Einführung neuer, effizienter Technologien, zunehmende Mobilität und zunehmende soziale und kulturelle Interaktionen sowie Konvergenz zwischen Regionen (etwa in Bezug auf das Pro-Kopf-Einkommen). Die heute in Industriestaaten beobachteten demographischen Entwicklungen (sehr niedrige Fertilitätsraten, hohe Alterung) werden wegen der in der A1-Welt angenommenen globalen Konvergenz langfristig auch auf die Entwicklungsländer übertragen. Dies führt nach einem Anstieg der Bevölkerung auf etwa 9 Mrd. Menschen ab 2050 zu einer Abnahme auf etwa 7 Mrd. 2100. Diese Bevölkerungsentwicklung liegt im unteren Bereich der existierenden Projektionen, aber noch über der niedrigsten UN-Projektion.

Die Energieproduktivität steigt jährlich um etwa 1,3% – schneller als im Mittel der letzten 100 Jahre. Allerdings gibt es wegen der niedrigen Energiepreise wenig Anreize für eine effiziente Endenergienutzung, so daß der Primärenergieeinsatz sehr hoch ist und Motorisierung und Zersiedelung weltweit stark ansteigen. Die Szenarien übertragen quasi die ökonomische Entwicklung Japans und Südkoreas nach dem 2. Weltkrieg bzw. Chinas in den letzten Jahren auf alle Entwicklungsländer. Insofern sind sie in Bezug auf das Wirtschaftswachstum und die globale Konvergenz der Pro-Kopf-Einkommen sehr optimistische Szenarien.

Innerhalb der A1-Szenariofamilie wurden je nach angenommener Technologieentwicklung vier verschiedene Pfade unterschieden: Der kohleintensive Pfad A1C, der öl- und gasintensive Pfad A1G, der Pfad A1T mit einem hohem Anteil nicht fossiler Energieträger und schließlich der mittlere Pfad A1B, für den ähnlich schnelle Fortschritte für alle Energieträger bzw. Technologien angenommen werden. Anhand dieser Unterscheidung wird der Einfluß der Technologieentwicklung bei sonst gleichen Antriebskräften (insbesondere gleicher wirtschaftlicher Entwicklung) sichtbar).

BI-Welt: Globale Nachhaltigkeit

Die B1-Szenarien gehen von der gleichen Bevölkerungsentwicklung und einem ähnlich starken Wirtschaftswachstum wie die Al-Szenarien aus. Auch hier wird eine Konvergenz der Entwicklungen in den verschiedenen Regionen angenommen („Globalisierung"). Einkommensdisparitäten schließen sich ebenso rasch wie in den A1-Szenarien.

Die B1-Welt unterscheidet sich jedoch von der A1-Welt durch ein starkes soziales und Umweltbewußtsein; sie wird als „wohlhabend, gerecht und grün" charakterisiert. Die Welt ist durch hohe Effizienzsteigerungen auch im Energiebereich gekennzeichnet. Produktions- und Einkommenszuwächse werden in hohem Maß für den Ausbau sozialer Institutionen, Umverteilungsmaßnahmen und Umweltschutz verwendet. Wirtschaftsstrukturen verändern sich zügig in Richtung auf eine Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft, in der Materialien sparsam eingesetzt werden. Saubere und effiziente Technologien werden rasch eingeführt. Auch vollzieht sich ein Wertewandel in Richtung auf nichtmaterielle Einstellungen.

Die Energienachfrage ist somit – trotz starken Wirtschaftswachstums – niedrig und beträgt im Jahr 2100 nur etwa ein Viertel derjenigen in den A1-Szenarien. Ein hoher Einkommenstransfer und hohe Steuern prägen diese Welt. Globalisierung und Liberalisierung sind mit einer starken internationalen Nachhaltigkeitspolitik verbunden. Forschung und Entwicklung werden intensiv gefördert. Städte entwickeln sich kompakt und mit hohem Anteil an nicht motorisiertem Verkehr. Zusätzlich wird der Urbanisierungstrend gebremst. Selbst ohne klimapolitische Maßnahmen führen diese Entwicklungen zu geringen Treibhausgasemissionen, weil sie bezüglich des Klimaschutzes bereits sehr effektiv sind.

A2-Welt: Regionalisierte Wirtschaftsentwicklung

Die A2-Welt ist heterogen, da die Regionen ihre nationalen, kulturellen und religiösen Identitäten bewahren wollen und unterschiedliche Entwicklungspfade einschlagen. Es bilden sich getrennte wirtschaftliche Regionen aus. Das Wirtschaftswachstum ist deshalb geringer als in anderen Szenariofamilien, ebenso die Geschwindigkeit technologischer Entwicklungen. Technologien verbreiten sich zögerlicher, Handelsströme sind niedriger als in Al-Szenarien. Auch das Pro-Kopf-Einkommen konvergiert nicht so stark wie in den Al- oder B1-Szenarien. Es wird ein sehr hohes Bevölkerungswachstum (15 Mrd. Menschen in 2100) zugrunde gelegt, da im Unterschied zu Al- und B1 Sze-

narien die Fertilitätsmuster nicht konvergieren. Die Energieproduktivität steigt nur um 0,5–0,7% jährlich, die Energienachfrage ist hoch, wenn auch nicht so hoch wie in den Al-Szenarien. Die Energiesysteme der A2-Welt sind sehr heterogen. Der Energieträgermix in den einzelnen Regionen hängt stark von der Ressourcenverfügbarkeit ab.

B2-Welt: Regionale Nachhaltigkeit

Die B2-Storyline beschreibt eine Zukunft, in der lokalen und regionalen Lösungen für eine nachhaltige Entwicklung eine große Rolle zukommt. Internationale Institutionen und Strukturen nehmen dagegen an Bedeutung ab. Umweltschutz wird betont, allerdings nur auf nationaler und regionaler Ebene. Das Bevölkerungswachstum ist geringer als in A2-Szenarien (etwa 10 Mrd. Menschen im Jahr 2100). Das Wirtschaftswachstum ist moderat, die Technologieentwicklung weniger ausgeprägt als in der B1- oder Al-Welt. Viele Projektionen entsprechen den heutigen Trends, etwa in Bezug auf das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum oder die Steigerung der Energieproduktivität. Die Energienachfrage ist niedriger als in den Al- und A2-Szenarien, aber höher als in der B1-Szenarien. Auch der derzeitige Trend abnehmender Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen setzt sich fort.“[6]

Die SRES- Szenarien sind von der internationalen Gemeinschaft der Wissenschaftler akzeptiert. Sie zeigen die große Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungspfade. In ihnen kommen die Unsicherheiten zum Ausdruck über die Ursachen, die zum Anstieg der Treibhausgase führen und über deren Wechselwirkungen.

In Abb.7 sind für einige ausgewählte Szenarien die Projektionen der CO_2-Konzentration gezeigt. Zum Vergleich ist auch die Entwicklung nach IS92a eingezeichnet. Wie zu erwarten, zeigt Szenarium B1 den günstigsten Verlauf, wie er in einer globalen Nachhaltigkeitswelt erwartet wird, die sich als „wohlhabend, gerecht und grün“ charakterisieren läßt. Auch Szenarium A1T zeigt einen günstigen Verlauf. Für beide Szenarien ist ein schneller Übergang zur nichtfossilen Energieerzeugung charakteristisch.

---

6 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) Energiewende zur Nachhaltigkeit, Berlin 2003. S. 106f.

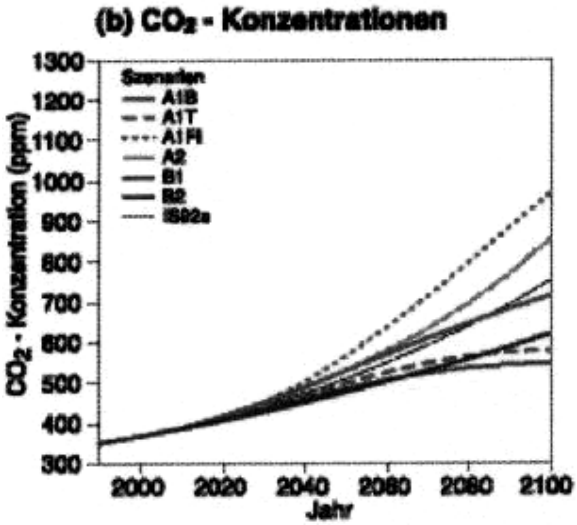

Abb.7: Projektionen der CO_2-Konzentration für einige illustrative SRES- Szenarien (Quelle IPCC).

„Die Emissionen von Treibhausgasen und Schadstoffen variiert stark zwischen und innerhalb der Szenariofamilien. Die höchsten CO_2-Emissionen weisen die fossilintensiven Wachstumsszenarien A1C und A1G auf. Aber auch A2-Szenarien haben sehr hohe Emissionen: Zwar ist das Wirtschaftswachstum weniger stark, aber die langsamere Technologieentwicklung führt zu einer geringeren Minderung der Kohlenstoff- und Energieintensität. A1B- und auch B1 -Szenarien weisen dagegen etwa ab 2050 eine Wende in Richtung Emissionsminderung auf. Dies ist zum einen auf die Trendwende in der Bevölkerungsentwicklung zurückzuführen, zum anderen auf die Verbesserung der Produktivität. Diese Trends gleichen das Wirtschaftswachstum mehr als aus. Die A2-und B2-Szenarien zeigen dagegen stetig wachsende CO_2-Emissionen. Die geringsten CO_2-Emissionen aller Szenarien weisen B1- sowie A1T-Szenarien auf. Beiden gemeinsam ist eine schnelle Entwicklung nicht fossiler Technologien, sie unterscheiden sich aber stark im Energieeinsatz.

Die Szenarien variieren auch in Bezug auf die Landnutzung und ihre Änderung: Der Trend zur Abnahme der globalen Waldflächen wird in den meisten Szenarien umgekehrt, besonders in B1- und B2-Szenarien. Methan- und Lachgasemissionen sind in Al- und B1-Szenarien wegen des angenommenen geringeren Bevölkerungswachstums und der Bevölkerungsabnahme nach 2050 sowie der gesteigerten Produktivität in der Landwirtschaft weit geringer

als in den A2- und B2-Szenarien. Schwefelemissionen sind generell niedriger als in früheren Projektionen, weil angenommen wird, daß die Belastung durch lokale und regionale Luftverschmutzung weit früher zu einer Emissionsminderung führen wird.“[7]

Wie im dritten Wissenstandsbericht des IPCC ausgewiesen, erwarten alle Klimamodelle einen Anstieg der globalen mittleren Temperatur nahe der Erdoberfläche zwischen 1990 und 2100 um 1,4–5,8 Grad Celsius.

Selbst das vorstehend erwähnte Szenarium B1 führt zu einer Spannbreite zwischen 1,4 und 2,6 Grad. Für IS92a liegt die Spannbreite zwischen 1,9 und 3,5 Grad.

Zentrales Anliegen der Klimarahmenkonvention ist eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration. Artikel 2 fordert: Ökosysteme sollen in der Lage sein, sich dem Klimawandel natürlich anzupassen, die Nahrungsmittelproduktion soll nicht gefährdet werden und die ökonomische Entwicklung soll nachhaltig erfolgen (s. S.1).

Daraus ergibt sich die Frage nach einer Grenze oberhalb derer die Folgen des Klimawandels nicht mehr tolerierbar sind. Der „Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen“ (WBGU) hat in der „Post-SRES“-Zeit diese Frage näher untersucht. Ausgehend von eigenen Expertisen, externen Gutachten und neuen Publikationen kommt der Beirat zu folgender qualitativen Einschätzung:

„Bei Ökosystemen sind die Effekte der Klimaänderungen schon heute erkennbar. Die Grenze, ab der die Schäden am globalen Naturerbe nicht mehr hinnehmbar sind, läßt sich nicht präzise bestimmen, wird aber vom WBGU im Bereich um 2°C globaler Erwärmung gegenüber vorindustriellen Werten eingeschätzt. Auch für die weltweite Ernährungssicherheit scheint die Grenze in diesem Bereich zu liegen, denn oberhalb dieses Wertes ist mit klimabedingten weltweiten Verlusten der Agrarproduktion sowie mit einem starken Anstieg der Anzahl der von Wassermangel bedrohten Menschen zu rechnen. Wegen der schwachen Datenlage und unausgereifter Methodik läßt sich für die Gesundheitsfolgen derzeit noch keine Toleranzschwelle einschätzen. Für einige Regionen können die Klimafolgen allerdings vermutlich bereits bei 2°C mittlerer globaler Erwärmung zu intolerablen Belastungen führen. Zudem könnte der Klimawandel singuläre, katastrophale Veränderungen im Erdsystem hervorrufen, wie z. B. die Umsteuerung der weltweiten Ozeanzirkulation, das Schmelzen großer Eisschilde (Westantarktis, Grönland) oder

7 ebenda, S. 107.

das plötzliche Freisetzen riesiger Methanreserven. Eine quantitative Abschätzung der Schwellenwerte für diese Effekte ist mit großen Unsicherheiten behaftet.

WBGU-Empfehlung: Maximal 2°C Erwärmung verantwortbar

Der WBGU bekräftigt seine Überzeugung, daß zur Abwehr gefährlicher Klimaveränderungen die Klimaleitplanke einer maximalen Erwärmung um 2°C gegenüber vorindustriellen Werten eingehalten werden muß. Da die globale Mitteltemperatur seit der Industrialisierung bereits um 0,6°C gestiegen ist, ist eine weitere Erwärmung von nur noch 1,4°C tolerabel. Dabei sollte die globale, langfristig gemittelte Erwärmungsrate 0,2°C pro Jahrzehnt nicht überschreiten.

Dieses Klimafenster sollte als globales Ziel im Rahmen der UNFCCC vereinbart werden. Die EU sollte hier die Meinungsführerschaft anstreben.“[8]

Die Erfüllung des Kyoto-Protokolls, so sie überhaupt erreichbar ist, kann nicht mehr als ein erster kleiner Schritt sein. Selbst bei Erfüllung aller Verpflichtungen könnte eine Erwärmung der Erde nur um 0,04° bis 2100 gebremst werden.

In notwendigen folgenden Vereinbarungen sind daher weit einschneidendere Emissionsbeschränkungen erforderlich, um eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu erreichen, das dem vorstehend definierten Klimafenster Rechnung trägt. Die WBGU-Empfehlung lautet:

WBGU-Empfehlung: Ehrgeizige Minderungsziele vereinbaren

„Angesichts der großen Unsicherheiten über das Klimasystem empfiehlt der WBGU, im Sinn einer Absicherungsstrategie zunächst von einem CO_2-Konzentrationsziel unterhalb von 450 ppm auszugehen. Dies wird nur möglich sein, wenn bis 2050 eine Minderung der globalen energiebedingten CO_2-Emissionen um etwa 45–60% gegenüber 1990 erreicht wird. Zusätzlich müssen deutliche Minderungen der anderen Treibhausgase (insbesondere Methan und Lachgas, aber auch der fluorierten Verbindungen) und anderer indirekt klimawirksamer Stoffe (z. B. Ruß) erfolgen. Daher müssen die Industrieländer ihren Ausstoß von Treibhausgasen bis 2020 um mindestens 20% verringern.“[9]

Der Beirat entwickelte in seinem Hauptgutachten „Energiewende zur Nachhaltigkeit“ Leitplanken einer nachhaltigen Energiepolitik. Als Leitplan-

8 WBGU Über Kioto hinaus denken, Berlin 2004. S. 1f.
9 ebenda, S. 2.

ke definiert der Beirat quantitativ angebbare Schadensgrenzen, deren Verletzungen heute und in der Zukunft nicht zu tolerierende Folgen hätten.

Leitplanken nachhaltiger Energiepolitik

Ökologische Leitplanken

Klimaschutz

Eine Temperaturänderungsrate über 0,2°C pro Jahrzehnt und eine mittlere globale Temperaturänderung über 2°C gegenüber dem Wert vor der Industrialisierung sind intolerable Werte einer globalen Klimaänderung.

Nachhaltige Flächennutzung

10–20% der weltweiten *Landfläche* sollten dem Naturschutz vorbehalten bleiben. Nicht mehr als 3% sollten für den Anbau von Bioenergiepflanzen bzw. für terrestrische CO_2-Speicherung genutzt werden. Dabei ist eine Umwandlung natürlicher Ökosysteme zum Anbau von Bioenergieträgern grundsätzlich abzulehnen. Bei Nutzungskonflikten muß die Sicherung der Nahrungsmittelversorgung Vorrang haben.

Schutz von Flüssen und ihren Einzugsgebieten

Wie bei den Landflächen, so sollten auch etwa 10–20% der Flußökosysteme inklusive ihrer Einzugsgebiete dem Naturschutz vorbehalten sein. Dies ist ein Grund dafür, warum die Wasserkraft nach Erfüllung der notwendigen Rahmenbedingungen (Investitionen in Forschung, Institutionen, Kapazitätsaufbau usw.) nur in Grenzen ausgebaut werden kann.

Schutz der Meeresökosysteme

Der WBGU hält die Nutzung des Ozeans zur Kohlenstoffspeicherung nicht für tolerierbar, weil die ökologischen Schäden groß sein könnten und das Wissen über die biologischen Folgen zu lückenhaft ist.

Schutz der Atmosphäre vor Luftverschmutzung

Kritische Belastungen durch Luftschadstoffe sind nicht tolerierbar. Als erste Orientierung für eine quantitative Leitplanke kann festgelegt werden, daß die Belastungen nirgendwo höher sein dürfen, als sie heute in der EU sind, auch wenn dort die Situation noch nicht bei allen Schadstoffen zufrieden stellend ist. Eine endgültige Leitplanke muß durch nationale Umweltstandards und multilaterale Umweltabkommen definiert und *umgesetzt* werden.

Sozioökonomische Leitplanken

Zugang zu moderner Energie für alle Menschen

Der Zugang zu moderner Energie sollte für alle Menschen gewährleistet sein. Dazu muß der Zugang zu Elektrizität sichergestellt und die Nutzung gesundheitsschädigender Biomasse durch moderne Brennstoffe ersetzt werden.

Deckung des individuellen Mindestbedarfs an moderner Energie

Der WBGU erachtet folgende Endenergiemengen als Minimum für den elementaren individuellen Bedarf: Spätestens ab 2020 sollten alle Menschen wenigstens 500 kWh pro Kopf und Jahr an Endenergie und spätestens ab 2050 wenigstens 700 kWh zur Verfügung haben. Bis 2100 sollte der Wert auf 1000 kWh steigen.

Begrenzung des Anteils der Energieausgaben am Einkommen

Arme Haushalte sollten maximal ein Zehntel ihres Einkommens zur Deckung des elementaren individuellen Energiebedarfs ausgeben müssen.

Gesamtwirtschaftlicher Mindestentwicklungsbedarf

Zur Deckung des gesamtwirtschaftlichen Mindestenergiebedarfs pro Kopf (für indirekt genutzte Energiedienstleistungen) sollte allen Ländern mindestens ein Bruttoinlandsprodukt pro Kopf von etwa 3000 US-$ 1999 zur Verfügung stehen.

Risiken im Normalbereich halten

Ein nachhaltiges Energiesystem sollte auf Technologien beruhen, deren Betrieb im „Normalbereich" der Umweltrisiken liegt. Die Kernenergie kollidiert mit diesen Anforderungen insbesondere durch intolerable Unfallrisiken und ungeklärte Abfallentsorgung sowie wegen der Risiken durch Proliferation und Terrorismus.

Erkrankungen durch Energienutzung vermeiden

Die lokale Luftverschmutzung in Innenräumen durch Verbrennung von Biomasse und in Städten durch Nutzung fossiler Energieträgcr verursacht weltweit schwere Gesundheitsschäden. Die hierdurch verursachte Gesundheitsbelastung, sollte in allen WHO-Regionen jeweils 0,5% der gesamten Gesundheitsbelastung der Region (gemessen in DALYs, „disability adjusted life years“) nicht überschreiten.“[10]

Bei der Festlegung eines Stabilisierungsniveaus der CO_2-Konzentration ist zu beachten, daß die maximale Konzentration sowohl von der Emission

10 WGBU 2003, a.a.O. S. 115.

anderer Treibhausgase als auch von Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf abhängen.

„Energie- und industriebedingte CO_2-Emissionen tragen einen Großteil zur Klimaänderung bei, und es wird erwartet, daß ihr Beitrag ohne Klimapolitik weiter zunehmen wird (IPCC, 2000). Diese Emissionen können sehr viel genauer gemessen und hochgerechnet werden als diejenigen aus Landnutzungsänderungen und anderer Treibhausgase, die im Kioto-Protokoll (Methan, Lachgas, SF_6 perfluorierte Kohlenwasserstoffe) oder Montreal-Protokoll (FCKW und HFCKW) geregelt werden. Im Gegensatz zu den Auswirkungen dieser langlebigen Treibhausgase ist der Klimaeffekt von anthropogenen Aerosolteilchen (z. B. Sulfate mit Kühlung) und Ruß (Erwärmung) sowie der indirekte Effekt der Vorläufersubstanzen des troposphärischen Ozons (CO,NO_X, VOCs) nur regional. Vor allem über den Strahlungsantrieb der Aerosole herrscht große Unsicherheit.“[11]

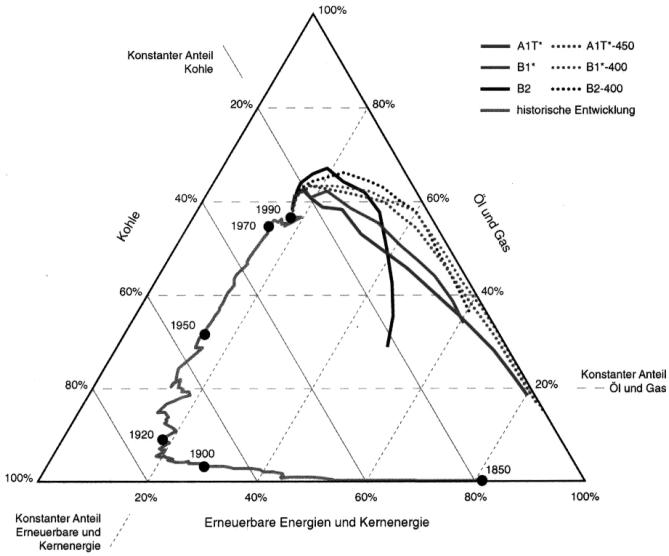

Abb.8: Anteile der Energieträger am globalen Primärenergieverbrauch. Bis 1990 ist die historische Entwicklung gezeigt. (Quelle WBGU).

Ausgehend von den SRES-Szenarien A1T, B1 und B2 untersucht der Beirat drei Referenzszenarien, im Folgenden als A1T*, B1* und B2 bezeichnet. In

11 WGBU 2004, a.a.O. S. 23.

diesen Szenarien wurden verschiedene Kalibrierungen aktualisiert und die Kohlenstoffspeicherung bei Biomasse-Verwertungsanlagen als Netto-CO_2-Senke aufgenommen. In A1T und B1 wurden die Nachhaltigkeitsforderungen der vorstehenden Leitplanken berücksichtigt. Aufbauend auf diesen modifizierten Referenzszenarien wurden anspruchsvolle CO_2-Stabilisierungsziele implementiert: B1* und B2 auf 400ppm und A1T* auf 450ppm.

Die im Resultat erhaltenen Anteile der Energieträger am Verbrauch für die Referenzszenarien A1T*, B1* und B2 sowie die CO_2-stabilisierenden Szenarien A1T*-450, B1*-400 und B2-400 zeigt die globale Entwicklungspfade in einem Dreieck zwischen den Eckpunkten Kohle, Öl/Gas und erneuerbare Energien/Kernenergie (Abb. 8).

Abb. 9 zeigt den Primärenergieeinsatz nach Energieträgern für die Szenarien (a) A1T*,(b) A1T*-450, (c) B1*, (d) B1*-400, (e) B2 und (f) B2-400. Es ist ersichtlich, daß die Verringerung, der Kohlenstoffintensität im fossilen Sektor durch eine verstärkte Nutzung von Gas auf Kosten von Öl und Kohle erfolgt. Insbesondere die Kohlennutzung läuft in den CO_2-stabilisierenden Szenarien A1T*-450 und B1*-400 in der Mitte des Jahrhunderts nahezu aus. Die Energieversorgung zum Ende des 21. Jahrhunderts ruht insbesondere für A1T* / A1T*-450 und B1* / B1*-400 wesentlich auf solarer Elektrizität und solar erzeugtem Wasserstoff. In diesen Szenarien endet die Kernenergienutzung in der Mitte des Jahrhunderts.

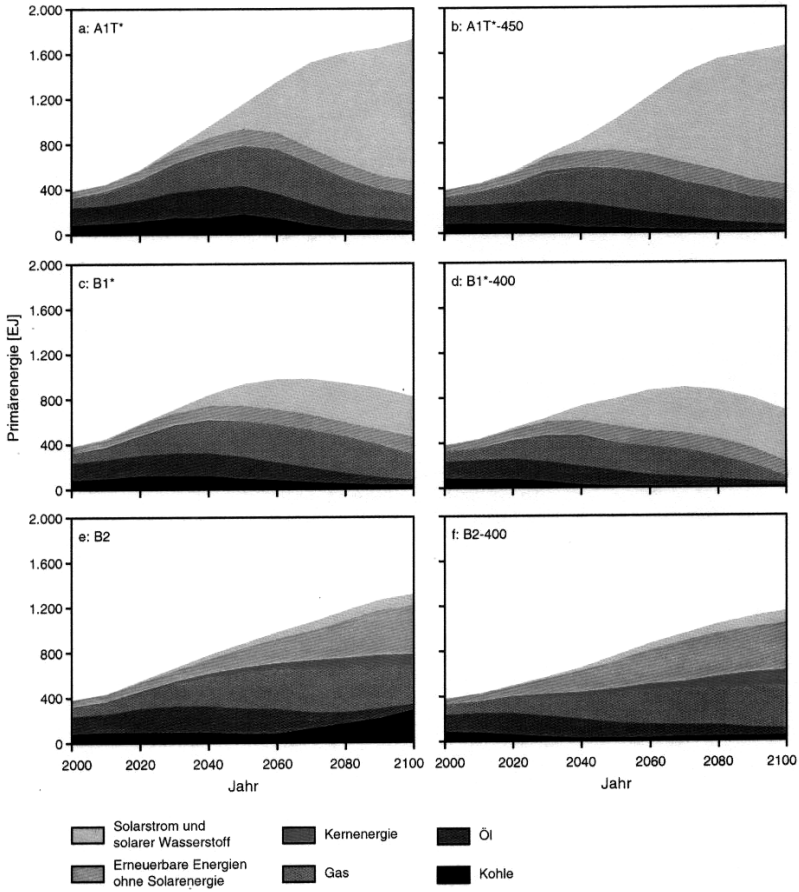

Abb.9: Zeitverlauf des globalen Primärenergie-Potfolios in den Referenzszenarien (Quelle WBGU).