

# Ökonomische Bewertungen der Klimawandel-Folgen<sup>1</sup>

Reiner Kümmel  
Institut für Theoretische Physik und Astrophysik  
Universität Würzburg

## Zusammenfassung

Einfache Abschätzungen der Wohlfahrtsverluste durch die Folgen des Klimawandels (Überflutung der Küstengebiete, drastischer Rückgang der Nahrungsmittelproduktion) nennen Schäden, die 0-3% der globalen Wirtschaftsleistung nicht übersteigen. Integrierte Wirtschaftsmodelle ergeben Verluste bis 10% des globalen Bruttoinlandprodukts (BIP). Eine von der britischen Regierung in Auftrag gegebene neue Studie (Stern Review) hat die Modellierung der Wohlfahrtsverluste hinsichtlich Zukunftsdiskontierung und Risikobewertung verfeinert. Zur Berechnung der Wohlfahrt werden abdiskontierte, konsumabhängige Nutzenfunktionen über die Zeit integriert. Das geschieht für eine Menge verschiedener Wachstumspfade, die sich an Annahmen über Klimawandel-Folgen orientieren und über die gemittelt wird. Gestützt auf die Daten des IPCC Third Assessment Report 2001 kommt die Studie bei Trendfortschreibung der Treibhausgas-Emissionen ("business as usual") zu jährlichen Verlusten des mittleren globalen pro-Kopf-Einkommens zwischen 5 und 20% gegenüber einem durch die Folgen des Klimawandels nicht betroffenen pro-Kopf-Einkommen; dabei wird ein jährliches globales Wirtschaftswachstum von 1,9% und ein Bevölkerungswachstum von 0,6% angenommen. Die betrachteten Zeiträume liegen zwischen 50 und 200 Jahren. Demgegenüber werden die jährlichen Kosten von international abgestimmten Manahmen zur Stabilisierung der Konzentration der Treibhausgase bei 500-550 ppm Kohlendioxid-Äquivalente im Jahr 2050 auf etwa 1% des BIP geschätzt. Ein Dekarbonisierungsszenario, das von neuen ökonometrischen Untersuchungen über den Beitrag der Energie zum Wirtschaftswachstum ausgeht, lässt höhere Kosten der Emissionsminderung erwarten.

## 1 Einleitung

Die britische Regierung hat kürzlich eine Studie zur Ökonomie des Klimawandels publiziert. Sie trägt den Namen ihres Autors *Sir Nicholas Stern*. Über diese "Stern Review" [1] soll hier berichtet werden. Zuvor möchte ich jedoch zwei frühere ökonomische Bewertungen von Klimawandel-Folgen erwähnen. Dabei zeigt die eine das Problem der Zukunftsdiskontierung und die andere, welche erstaunliche Sicht auf Natur und Wirtschaft Elite-Ökonomen haben. Nach der Besprechung der Stern Review wird eine alternative Kostenschätzung diskutiert. Den Abschluss bilden Sterns Empfehlungen zur Emissionsminderung.

Zum Einfluss der Wirtschaftswissenschaft und neuer ökonomischer Ideen sagt der Nobelpreisträger für Volkswirtschaftslehre des Jahres 1970, *Paul A. Samuelson*: "Die Ideen der Nationalökonomien – seien sie richtig oder falsch – sind weit einflussreicher, als man

---

<sup>1</sup>Hauptvortrag auf der Physikertagung in Regensburg am 27. März 2007

allgemein glaubt. Tatsächlich wird die Welt kaum von etwas anderem regiert. Praktiker, die sich völlig frei von jedem intellektuellen Einfluss glauben, sind gewöhnlich nur Sklaven irgendeines verstorbenen Nationalökonomens. Verrückte Politiker, die Stimmen in der Luft hören, beziehen ihren Unsinn meist von irgendeinem akademischen Schreiberling früherer Jahre. Ich bin sicher, dass der Einfluss erworbener Rechte und Interessen weit übertrieben wird im Vergleich zu diesem langsam aber stetig wachsenden Einfluss von Ideen. So etwas geschieht natürlich nicht sofort, ein solcher Prozess braucht Zeit. Auf dem Gebiet der ökonomischen und politischen Philosophie gibt es nicht viele, die von neuen Theorien beeinflusst werden, nachdem sie älter als 25 oder 30 sind. Es ist daher nicht sehr wahrscheinlich, dass Beamte, Politiker und sogar Agitatoren die neuesten Ideen auf die aktuellen Ereignisse anwenden. Aber früher oder später sind es die Ideen und nicht die verschiedenen Interessen, die gefährlich sind – sei es zum Guten oder zum Bösen.” [2]

## 2 Zukunftsdiskontierung

Die Menschen bewerten zukünftige Nutzen und Schäden geringer als gegenwärtige. Diese individuelle Zeitpräferenz, das “Esau-Prinzip”, gilt seit biblischen Zeiten. Das Buch Genesis des Alten Testaments schildert sie in seinem Bericht über den Verkauf des Erstgeburtsrechts für ein Linsengericht durch Esau an Jakob.<sup>2</sup> Wegen dieser Zeitpräferenz werden Sparguthaben verzinst und Zukunftsschäden diskontiert. Dabei sind für gleiche Zeiträume Zins- und Diskontrate gleich. Die Problematik der Zukunftsdiskontierung illustrierten die Klimaforscher Chen und Schneider vom National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado in den 1970er-Jahren mit einem Beispiel. Darin wird angenommen, dass der anthropogene Treibhauseffekt in, sagen wir, 150 Jahren das Westantarktische Eisschelf schmelzen lässt. Die daraus folgende Überflutung der Küstengebiete der Erde hätte Schäden in Höhe von rd. 2000 Mrd. \$ (Wert 1971) zur Folge. Das Bruttoinlandsprodukt der USA im Jahre 1971,  $BIP_0$ , betrug 1000 Mrd. \$. Das Abdiskontieren des globalen Schadens von  $2BIP_0$  mit der Diskontrate  $d$  liefert die Summe  $S$ , die heute zur Schadenskompensation oder -verhütung investiert werden müsste. Die Tabelle gibt für drei Diskontraten  $d$  diese Summe an:

$d$	$(1 + d)^{150}$	$S = \frac{2}{(1+d)^{150}} BIP_0$
2%	19,5	0,10 $BIP_0$
4%	359	$5,6 \times 10^{-3} BIP_0 \leq 20$ Kraftw.
7%	25580	$8 \times 10^{-5} BIP_0$

Legt man individuelle Zeitpräferenzen zugrunde, ist eine Diskontrate von 4 Prozent per annum bei einem Zeitraum von 150 Jahren nicht zu hoch gegriffen. Dann beläuft sich  $S$  auf weniger als sechs Tausendstel des Bruttoinlandsprodukts der USA von 1971, oder

<sup>2</sup>Zur Erinnerung: Esau war als Sohn Isaaks und Enkel Abrahams vor seinem Zwillingbruder Jakob geboren worden. Er besaß das Recht der Erstgeburt, das Vorzugsrecht auf das Erbe. Eines Tages kam er von der Jagd hungrig nach Hause, wo Jakob gerade ein Linsenmus kochte. Esau sagte zu Jakob: “Lass mich doch rasch von dem roten Essen da kosten, denn ich bin erschöpft.” Jakob entgegnete: “Verkaufe mir heute noch Deine Erstgeburt.” Esau dagegen: “Ich wandle so einher und muss doch sterben! Was soll mir da die Erstgeburt?” Und um seinen gegenwärtigen Hunger zu stillen, verkaufte er eine Verheißung für die Zukunft. – Jakob erhielt den seinem Bruder zugedachten väterlichen Segen und wurde der Stammvater Israels.

weniger als die Kosten für 20 CO<sub>2</sub>-entsorgte GUD-Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 2800 MW<sub>el</sub> gemäß einer Schätzung der Fa. SIEMENS [3] aus dem Jahr 1990. In diesem Sinne wäre es ökonomisch irrational, mehr zur Bekämpfung des Klimawandels zu investieren – zumal ein Wirtschaftswachstum  $w$  allein der USA um jährlich 1% in 150 Jahren  $(1 + w)^{150} \text{BIP}_0 = 4,45 \text{BIP}_0$  liefern und damit die Globalschäden von  $2\text{BIP}_0$  überkompensieren würde.

Wirtschaftsethiker halten allerdings eine Diskontierung der Zukunft mit den Diskonten der individuellen Zeitpräferenz für problematisch, und Philosophen sprechen gar von Skandalon der Zukunftsdiskontierung [4].

### 3 Klimawandel und Elite-Ökonomen

In den 1990er-Jahren schätzten die Elite-Ökonomen *Nordhaus* (Yale), *Beckermann* (Oxford) und *Schelling* (Harvard, Ökonomie-Nobelpreis 2005) die wirtschaftlichen Folgen des anthropogenen Treibhauseffekts ab. Ihre Ergebnisse fasste der frühere Weltbank-Ökonom *Herman Daly* in dem Artikel “When smart people make dumb mistakes” [5] zusammen.

Diese Ökonomen nahmen an, dass der anthropogene Treibhauseffekt nur die Landwirtschaft betrifft, die lediglich 3% zum Bruttoinlandsprodukt (BIP=GNP) der USA beiträgt. Ähnlich gering ist der Beitrag der Landwirtschaft auch in den anderen hochindustrialisierten Ländern. Darum, so die Schlussfolgerung der Ökonomen, seien selbst bei drastischem Einbruch der landwirtschaftlichen Produktion nur geringe Wohlfahrtsverluste zu erwarten. Im Originalton:

*Nordhaus, 1991*: “... there is no way to get a very large effect on the US economy.” [6]

*Beckermann, 1997*: “... even if net output fell by 50% by the end of next century this is only a 1.5% cut in GNP.” [7]

*Schelling, 1997*: “If agricultural productivity were drastically reduced by climate change, the cost of living would rise by 1 or 2%, and that a time when per capita income will likely have doubled.” [8]

Bei dieser Einschätzung wird übersehen, dass Hungersnöte dramatisch den Wert der Nahrung und damit ihren Preis steigern und so den Beitrag der Landwirtschaft zum BIP drastisch erhöhen. Darüber hinaus wird kein Unterschied zwischen Grenznutzen und Gesamtnutzen, in diesem Falle der Nahrung, gemacht. Das ist umso erstaunlicher, als die moderne Ökonomie die Erkenntnis dieses Unterschieds seit der sog. “marginalen Revolution”, d.h. der Einführung der Infinitesimalrechnung in die Ökonomie, als besonders bedeutend ansieht.

### 4 Stern Review: The Economics of Climate Change

Die “Stern Review” war von der britischen Regierung bei dem früheren Weltbank-Ökonomen *Sir Nicholas Stern* in Auftrag gegeben worden. Nach ihrer online-Publikation [1] lobte sie der britische Premierminister *Tony Blair* als “The most important report on the future ever published by this government.” Auf einer Würzburger Tagung zum Klimawandel nannte sie ein Referent “Die kopernikanische Wende der Klimawandel-Forschung”.

In einem am 25. Januar 2007 von der BBC gesendeten Interview äußerten sich Ökonomen kritischer. So sagte *Richard Tol*: “If a student of mine were to hand in this report

as a Masters thesis, perhaps if I were in a good mood I would give him a 'D' for diligence; but more likely I would give him an 'F' for fail. ... There is a whole range of very basic economics mistakes that somebody who claims to be a Professor of Economics simply should not make."<sup>3</sup> *Robert Mendelsohn* von der Yale University hält in demselben Interview Stern's Kosten-Schätzungen der Treibhausgas-Emissionsminderung für viel zu niedrig: "We will actually have to sacrifice a great deal to cut emissions dramatically."

Im weiteren muss ich mich darauf beschränken, die Grundlagen, Annahmen und Methoden der "business as usual" (BAU) Szenarien zu skizzieren, in denen Stern die wirtschaftlichen Verluste für den Fall berechnet, dass wir so weitermachen wie bisher. Hinsichtlich Sterns Schätzung der Kosten von Emissionsminderungen, die den Klimawandel in erträglichen Grenzen halten, können nur die Ergebnisse berichtet werden.

#### 4.1 Stern Review (SR): Grundlagen

Die naturwissenschaftlichen Grundlagen und die Modellierungs-Methoden der "Stern Review" sind: 1. Daten a) des *IPCC Third Assessment Report 2001*, b) der Literatur über Klimawandel-verstärkende Rückkopplungsmechanismen seit 2001. 2. Gewichtung der Wohlfahrt zukünftiger Generationen mit der Wahrscheinlichkeit, dass die Menschheit zu einem gegebenen Zeitpunkt  $t$  noch existiert ("Ethische" Zukunftsdiskontierung). Dabei werden Zeiträume von 50, 100 und 200 Jahren "*with caution and humility*" betrachtet. 3. Zur expliziten Risikomodellierung wird das Modell PAGE2002 verwendet, das frühere integrierte Wirtschaftsmodelle probabilistisch modifiziert. Diese hatten im "Business as Usual" (BAU)-Szenario Verluste im globalen BIP von 5-10% gegenüber einem nicht durch Klimawandel-Schäden betroffenen BIP ergeben.

Im BAU-Szenario wird der Trend der gegenwärtigen Emissionen von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2e</sub>) fortgeschrieben. Zu erwarten sind danach bis zum Jahre 2100 Temperatursteigerungen von 2-3°C und mehr. Abbildung 1 zeigt die derzeitigen Emissions-Quellen. Die folgende Abbildung 2 zeigt im oberen Teil die Wahrscheinlichkeitsintervalle für Temperatursteigerungen bei verschiedenen atmosphärischen Gleichgewichtskonzentrationen von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. (In die Temperaturbereiche links der vertikalen Markierungen auf den 5% - 95% Intervall-Balken fallen weniger als 50 Prozent der Prognosen.) Im unteren Teil der Abbildung werden die innerhalb der Temperatursteigerungsintervalle zu erwartenden Klimawandel-Folgen angegeben. Vor letzteren warnen seit mehr als 20 Jahren Naturwissenschaftler, u.a. die der Deutschen Physikalischen Gesellschaft [9, 10, 11], und die von ihnen beratenen politischen Gremien [12]. Inzwischen können die Wahrscheinlichkeiten der Schadensfälle mit größerer Genauigkeit als früher angegeben werden. Stern berücksichtigt sie in seinen Simulationen.

Die Auswirkungen des Klimawandels betreffen besonders

- die Nahrungsmittelproduktion: erhebliche Ernteauffälle in Entwicklungsländern und Ernteminderungen in den entwickelten Regionen drohen; lediglich in hohen Breiten kann es durch CO<sub>2</sub>-Düngung zu Ertragssteigerungen kommen.

---

<sup>3</sup>In dem Interview wurde Richard Tol als Professor der Universitäten Hamburg und Carnegie Mellon vorgestellt. Als Herausgeber der Zeitschrift "Energy Economics" führt er als Dienstadresse das Economic and Social Research Institute, Dublin. In dieser Zeitschrift war kürzlich zu lesen "energy conservation may harm economic growth" [Vol. 27, 857 (2005)]; unter "energy conservation" wird allgemein Verringerung des Energie-Einsatzes bei ungeschmälernten Energiedienstleistungen verstanden.

- den Wasserhaushalt der Erde: Gebirgsgletscher schmelzen und der Wasserstand von Flüssen sinkt; die Wasserversorgung vieler Menschen leidet; der Anstieg des Meeresspiegels bedroht große Städte wie New York, London, Tokyo, Shanghai und Hong Kong.
- Ökosysteme: Korallenriffe und der Amazonas-Regenwald können ganz oder teilweise zusammenbrechen; viele Arten sind vom Aussterben bedroht.
- extreme Wetterereignisse: Stürme, Überschwemmungen, Dürren, Hitzewellen und Waldbrände nehmen zu.
- Risiken plötzlicher Klimaveränderungen mit irreversiblen Folgen: Schwächung der natürlichen Kohlenstoff-Senken, Methanfreisetzung, Beginn der irreversiblen Schmelze des Grönlandeises, Schwächung oder gar Zusammenbruch der atlantischen thermohalinen Zirkulation (vulgo Golfstrom), Schmelzen des westantarktischen Eisschelfs.

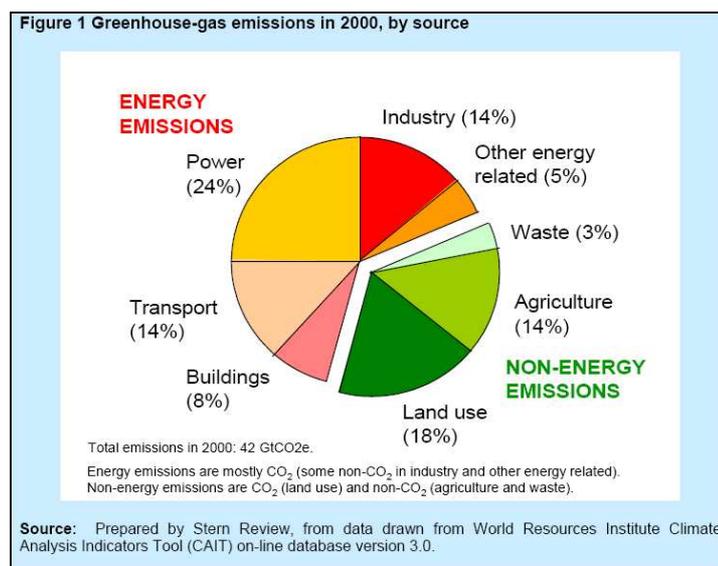


Abbildung 1: Quellen der Treibhausgasemissionen im Jahr 2000. Treibhausgaskonzentration z. Zt.: 430ppm CO<sub>2e</sub>; vorindustriell: 280 ppm .

## 4.2 SR: Ergebnisse

Zuerst sollen die wichtigsten Aussagen der “Stern Review” zusammengestellt werden. Eine Diskussion der Methoden folgt anschließend.

A. *BAU-Szenarien*: Gemäß Stern’s Simulationsrechnungen für die Fälle des “business as usual” belaufen sich die Gesamtkosten der (CO<sub>2e</sub>-bedingten) Klimawandel-Folgen während der nächsten 200 Jahre auf jährliche Verluste des mittleren globalen pro-Kopf Einkommens zwischen 5 und 20 Prozent (“now and into the future”) gegenüber einem durch die Folgen des Klimawandels nicht beeinträchtigten pro-Kopf Einkommen. An einer

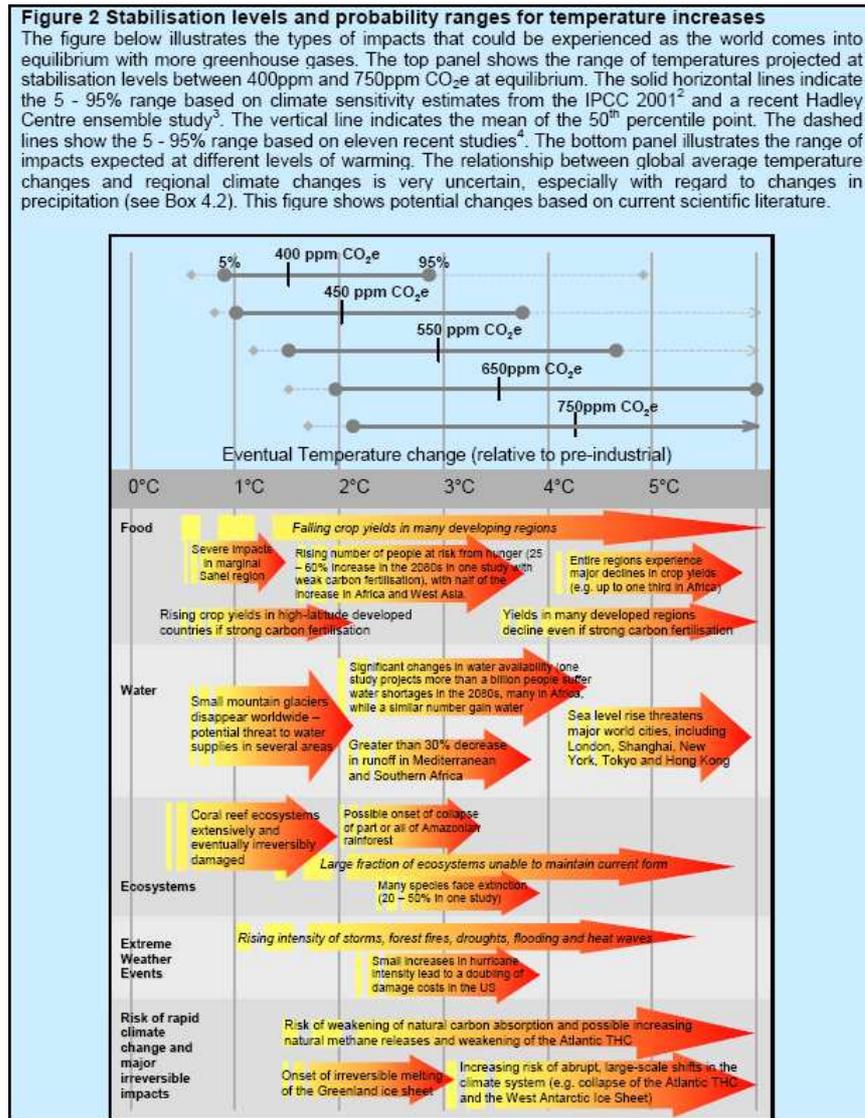


Abbildung 2: Wahrscheinlichkeitsintervalle für Temperatursteigerungen und Klimawandel-Folgen.

Stelle werden soziale Kosten der Tonne CO<sub>2</sub> in Höhe von 85\$ angegeben.

Vorausgesetzt werden dabei weiteres Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum.

Die 20%-Verluste berücksichtigen Effekte, die mit großen Unsicherheiten behaftet sind: Gesundheitsschäden, positive Rückkopplungseffekte wie Methanfreisetzung und Schwächung der CO<sub>2</sub>-Senken und eine angemessene ("appropriate") Gewichtung der unverhältnismäßig hohen Belastungen armer Länder durch die Klimawandel-Folgen.

*B. Stabilisierungs-Szenarien:* Das Ergebnis der Auswertung vieler Studien zu den Möglichkeiten der Emissionsminderung und Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf erträglichem Niveau fasst Stern wie folgt zusammen: "The Review estimates the annual costs of stabilization at 500-550 ppm CO<sub>2e</sub> to be around 1% of (annual global) GDP by 2050."

### 4.3 SR: BAU-Szenarien

Insgesamt werden sechs “business as usual”-Szenarien untersucht. Sie fallen in zwei Klima- und drei ökonomische Kategorien.

In der Klima-Kategorie *I. Baseline Climate*, die sich am A2 Emissions-Szenario des IPCC 2001 orientiert, geht man von mittleren Temperatursteigerungen (gegenüber dem vorindustriellen Mittelwert) um  $3,9^{\circ}\text{C}$  bis zum Jahre 2100 aus. Dabei fallen in das 90%-Vertrauensintervall Temperatursteigerungen von  $2,4\text{-}5,8^{\circ}\text{C}$ .

Die Wachstumsraten des konsumierbaren Bruttoinlandsprodukts (BIP) in Abhängigkeit von den Temperatursteigerungen werden, gestützt auf Schätzungen in der Literatur, “gegriffen”, mit Wahrscheinlichkeiten gewichtet und Berechnungen des Verlustes an BIP/Kopf für die Zeit von 2001 bis 2200 zugrunde gelegt. Mangels besserer, quantifizierbarer Größen wird menschliche “Wohlfahrt” mit “BIP/Kopf” gleichgesetzt.

Die Rechnungen erfolgen für drei Szenarien ökonomischer Klimawandel-Folgen: *1. Markt-Wirkungen*; *2. Markt-Wirkungen + Katastrophenrisiken*; *3. Markt-Wirkungen + Katastrophenrisiken + Umwelt- und Gesundheitsschäden*. Markt-Wirkungen (“Market Impacts”) sind Klimawandel-Folgen, die auf Märkten gehandelte Güter und Dienstleistungen betreffen. Katastrophenrisiken lassen sich schon schwerer in Dollar ausdrücken, und am unsichersten sind die monetären Bewertungen von Artenverlusten und häufigeren Erkrankungen der Menschen in Entwicklungs- und Industrieländern infolge des Klimawandels und der damit verbundenen Anpassungsdefizite .

In der Klima-Kategorie *II: High Climate* werden Verschiebungen der wahrscheinlichen Temperatursteigerungen zu höheren Werten (zwischen  $3$  und  $9^{\circ}\text{C}$ ) und die entsprechenden Schäden angenommen. Als Auslöser kommen positive Rückkopplungseffekte wie Schwächung der natürlichen  $\text{CO}_2$ -Senken und Methanfreisetzung durch Auftauen des Permafrosts in Betracht. Ansonsten wird wie in *I. Baseline Climate* verfahren.

### 4.4 SR: BAU-Modellierung

Mit den Standardmethoden der Wohlfahrtsökonomie und einer ethisch begründeten Zukunftsdiskontierung führt Stern für die sechs BAU-Szenarien intertemporale Wohlfahrtsschätzungen durch. Dabei wird die Wohlfahrt  $W$  der Welt jeweils unter zwei Entwicklungen  $W^1$  und  $W^0$  betrachtet: In  $W^1$  herrscht Wirtschaftswachstum mit Klimawandel-Verlusten, in  $W^0$  wächst die Wirtschaft ohne Verluste.

Definiert wird eine *Nutzenfunktion*  $u$ . Sie gibt die (i.a. von vielen Parametern abhängige) Wohlfahrt der Welt pro Zeiteinheit an.

*Einfachster Fall:*

Die Nutzenfunktion hängt nur vom globalen Konsum  $c$  ab. Dieser wird dem globalen Bruttoinlandsprodukt gleichgesetzt; (alles Produzierte wird zu konsumierbarem Einkommen):  $u = u(c)$ .

Die Gesamtwohlfahrt der Welt zwischen den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  ist dann gegeben durch das Zeitintegral

$$W = \int_{t_1}^{t_2} u(c)e^{-\delta t} dt. \quad (1)$$

Als Zeitpunkt  $t_1$  wird das Jahr 2001 gewählt;  $t_2$  ist strenggenommen  $\infty$ , wird aber hier als

das Jahr 2200 angegeben, ab dem die Klimawandelprobleme als bewältigt angenommen werden.  $e^{-\delta t}$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Menschheit zur Zeit  $t$  noch existiert.  $\delta$  ist die reine Zeit-Diskontrate.

Sei  $\Delta c$  die Störung des Konsums zur Zeit  $t$ . Entwickelt man die Nutzenfunktion in  $W^1$  bis zur ersten Potenz in  $\Delta c$ , so erhält man als Wohlfahrtsverlust durch Klimawandel

$$\Delta W = W^1 - W^0 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{du(c)}{dc} \Delta c \cdot e^{-\delta t} dt \equiv \int_{t_1}^{t_2} \lambda \Delta c dt. \quad (2)$$

Dabei werden die  $\Delta c$  multiplizierenden Terme zum Diskontfaktor  $\lambda \equiv \frac{du}{dc} e^{-\delta t}$  zusammengefasst. Berechnet werden kann  $\lambda$  aus der sog. Diskontrate  $\rho \equiv -\frac{d\lambda/dt}{\lambda}$  unter der Anfangsbedingung  $\lambda(t_1) = 1$ , wenn  $\rho$  bekannt ist.

Dazu werden *Modellannahmen* gemacht. Sie betreffen:

1. die Wahl einer speziellen Nutzenfunktion  $u(c) = \frac{c^{1-\eta}}{1-\eta}$  (oder  $u(c) = \ln c$ , wenn  $\eta = 1$ ).

Mit  $\frac{du}{dc} = c^{-\eta}$  erhält man  $\rho = \eta \frac{dc/dt}{c} + \delta$ .

2. die Wahl von  $\eta$ , genannt "Elastizität des Grenznutzens des Konsums". Diese Elastizität ist abhängig von subjektiven Wertungen. In der Regel wird  $\eta \leq 1$  gewählt. Dann nimmt der zusätzliche Nutzen einer Konsumeinheit mit wachsendem Konsum ab. So bringt z.B. der Konsum einer Scheibe Brot einem Satten weniger Nutzen als einem Hungrigen.

3. die Wahl von  $\frac{dc/dt}{c}$ . *Sie legt die Wachstumsrate des Konsums entlang des Zeitpfads und damit den szenarienspezifischen Konsumpfad zur Berechnung der Wohlfahrtsverluste fest.*

4. die Wahl der reinen Zeit-Diskontrate zu  $\delta = 0,1\%$ ; dem entspricht eine Wahrscheinlichkeit von 90,5%, dass die Menschheit in 100 Jahren noch nicht umgekommen ist, sei es durch einen Meteoreinschlag oder nukleare Verteilungskämpfe um schwindende Ressourcen.

*Jenseits des einfachsten Falls:*

a) Wachsende Weltbevölkerung:  $N(t)$  Menschen leben zur Zeit  $t$ , der pro-Kopf-Konsum  $C/N$  ersetzt  $c$  in der Nutzenfunktion und in  $\lambda$ . Die Gesamtwohlfahrt der Welt zwischen den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  ist

$$W = \int_{t_1}^{t_2} N u(C/N) e^{-\delta t} dt \rightarrow \Delta W.$$

b) Ungleichheit herrscht innerhalb der Bevölkerung zur Zeit  $t$ : Die Bevölkerungsgruppe  $i$  mit  $N_i$  Menschen hat den Konsum  $C_i$ . Die Gesamtwohlfahrt ist der Gesamtnutzen des Konsums:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \sum_i N_i u(C_i/N_i) e^{-\delta t} dt \rightarrow \Delta W.$$

Ist  $\alpha_i$  der Anteil der Konsumänderung, der auf die Gruppe  $i$  entfällt, wird der ausschlaggebende Diskontfaktor zu  $\lambda = \sum_i \alpha_i \frac{du}{dc_i} e^{-\delta t}$  mit  $c_i = C_i/N_i$ .

c) Unsicherheiten im Wachstumspfad: Sei  $p_j$  die Wahrscheinlichkeit für den Konsum  $c_j$  zur Zeit  $t$ . Dann hat man in  $\Delta W$  und der Diskontrate  $\rho$  den Diskontfaktor  $\lambda = \sum_j p_j \frac{du}{dc_j} e^{-\delta t}$ .

Das PAGE2002 Modell kombiniert die skizzierten Fälle zu verschiedenen Konsumpfaden (in den Wohlfahrtsintegralen), die in die 6 Szenarien (I.1-I.3) und (II.1-II.3) eingruppiert werden.

Für jedes Szenario werden etwa 1000 “Monte Carlo”- Simulationen durchgeführt, wobei jedesmal ein Satz unsicherer Parameter nach dem Zufallsprinzip aus einem vorgegebenen Wertebereich gezogen wird. Das liefert eine Wahrscheinlichkeitsverteilung globaler Einkommenspfade.

Für die erwarteten Wohlfahrtsverluste durch Klimawandel *je Szenario* wird eine (“*easily understandable*”) *Darstellung* gewählt, die als *Balanced Growth Equivalent* (BGE) bezeichnet wird. BGE bestimmt einen vom gegenwärtigen Konsum aus startenden Konsumpfad mit konstanter Konsum-Wachstumsrate *so*, dass er eine Gesamtwohlfahrt *W* ergibt, die gleich der Gesamtwohlfahrt ist, die man als Mittelwert der Wahrscheinlichkeitsverteilung der globalen Einkommenspfade erhält. Die Differenz zwischen dem BGE eines Konsumpfades mit Klimawandel und dem BGE eines Konsumpfades ohne Klimawandel ergibt die Kosten des Klimawandels, und zwar ausgedrückt als die für alle Zeiten gleichbleibende Reduktion (in  $x\%$ ) des wachsenden Konsums. So erhält Stern die in Abschnitt 4.2 verbal formulierten Ergebnisse für die BAU-Szenarien. In Gleichungen übersetzt, die nicht in der “Stern Review” stehen, lauten sie:

Ist der Pro-Kopf- Konsum zur Zeit  $t$  *ohne* Klimawandel-Folgen

$$c_0(t) = c(t_1) \exp(\alpha t), \quad (3)$$

so beträgt er zur Zeit  $t$  *mit* Klimawandel-Folgen

$$c_{KW}(t) = c(t_1)(1 - x/100) \exp(\alpha t), \quad 5 \leq x \leq 20. \quad (4)$$

Dabei folgt  $\alpha$  aus angenommenen Wachstumsraten von 1,9 % für das globale Bruttoinlandsprodukt und 0,6% für die Weltbevölkerung.

## 4.5 SR: Stabilisierungs-Szenarien

Stern betrachtet eine Fülle von *Maßnahmen, deren Kombination die Emissionen von Treibhausgasen bis 2050 auf 25% der gegenwärtigen Emissionen reduzieren sollen, was für eine Stabilisierung bei 550 ppm CO<sub>2e</sub> erforderlich wäre.* Dazu gehören:

Reduzierung der nicht durch fossile Brennstoffe bedingten Emissionen; Entwaldungen sollten z.B. stark eingeschränkt werden.

Reduzierung der Nachfrage nach Kohlenstoff-intensiven Gütern und Dienstleistungen.

Rationelle Energieverwendung.

Technologische Dekarbonisierung durch: Wind-, Wellen- und Gezeiten-Kraftwerke; Photovoltaik und Solarthermie; CO<sub>2</sub>-Rückhaltung und -Entsorgung; Wasserstoff-Brennstoffe; Kernenergie; Wasserkraft; Biomasse; Brennstoffzellen; Hybrid- und Elektrofahrzeuge.

Als Grundlagen der Kostenschätzungen zur Berechnung der mit den Emissionsminderungsmaßnahmen verbundenen Wohlfahrtsverluste dienen Literaturdaten, Lernkurven, Annahmen zum technischen Fortschritt etc.

Darauf gestützt erhält Stern das in Abschnitt 4.2 verbal formulierte Ergebnis, das in Gleichungsform übersetzt lautet:

$$BIP(t) = BIP(t_1)(1 - 1\%) \exp(0,019t). \quad (5)$$

Im Unterschied zu Abschnitt 4.4, in dem die Reduktion des globalen Bruttoinlandsprodukts *pro Kopf* angegeben wird, geht es hier um die einprozentige Reduktion des exponentiell wachsenden Bruttoinlandsprodukts.

Bekanntlich kann man bei Kombination vieler Maßnahmen zur Emissionsminderung das technische Reduktionspotential jeder einzelnen Maßnahme nicht voll ausschöpfen. Häufig kommt es zu kostensteigernden Konkurrenzeffekten, z.B. zwischen Technologien der rationellen Energieverwendung einerseits und denen erneuerbarer Energien andererseits. Ob diese Effekte in den Kostenschätzungen berücksichtigt wurden, ist nicht ersichtlich.

## 5 Ein Dekarbonisierungs-Szenario

Die “Stern Review” nimmt ein exponentielles Wirtschaftswachstum  $\sim \exp(0,019 \cdot t)$  über 200 Jahre als gegeben an. Dabei handelt es sich um eine Extrapolation des IPCC-A2-Szenarios (S. 161). Folglich wird auch erwartet, dass selbst mit Klimawandel dank des Wirtschaftswachstums die Welt in Zukunft reicher als heute sein wird: “... even with climate change, the world will be richer in the future as a result of economic growth” (S. 160). Hier liegt Stern voll auf der Linie der in der Volkswirtschaftslehre vorherrschenden Meinung: Wirtschaftswachstum ist nicht alles, aber ohne Wirtschaftswachstum ist alles nichts.<sup>4</sup> Geht man doch davon aus, dass alles durch alles ersetzt werden könne. Darum stelle Ressourcenknappheit keine Wachstumsgrenze dar, handele es sich um Material- und Energieressourcen oder auch um die Emissions-Aufnahmekapazität der Biosphäre.<sup>5</sup> So erklärte 1974 der Nobelpreisträger der Ökonomie, *Robert Solow*: “The world can, in effect, get along without natural resources”; er fügte jedoch hinzu: “... if real output per unit of resource is effectively bounded . . . then catastrophe is unavoidable.” [13] [Die Welt kann letzten Endes auch ohne natürliche Ressourcen zurecht kommen . . . sollte allerdings die reale Wertschöpfung pro Ressourceneinheit begrenzt sein . . . dann ist die Katastrophe unvermeidbar.<sup>6</sup>]

Dass erzwungene Begrenzungen des Energieeinsatzes unter dem Zwang zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen das Wirtschaftswachstum u.U. begrenzen könnten, ist also für Stern kein Thema. Auch in früheren Studien zum Klimawandel, wie z.B. im “DICE-Modell” von *Nordhaus*, auf dessen spätere Arbeiten sich Stern u.a. stützt, spielt Energie als Produktionsfaktor entweder eine untergeordnete oder gar keine Rolle. Bestenfalls gibt man dem Energieeinsatz  $E$  ein ökonomisches Gewicht, das seinem Anteil von etwa 5 Prozent an der Summe der Produktionsfaktor-Kosten entspricht. Gemäß dieser üblichen Vorgehensweise der neoklassischen Ökonomie hat der Faktor (Real-) Kapital  $K$  ein Gewicht von 25 bis 30 Prozent und der Faktor Arbeit  $L$  ein Gewicht zwischen 65 und 70 Prozent. Mit dieser Gewichtung kann die neoklassische Wachstumstheorie allerdings nicht das beobachtete Wirtschaftswachstum der Industrieländer quantitativ beschreiben. Es bleibt ein großer, unerklärter Rest, das “Solow-Residuum”, den man einem nicht näher erklärten

<sup>4</sup>Darum wurde der Bericht des *Club of Rome* über die “Grenzen des Wachstums”, der ja auch schon vor dem anthropogenen Treibhauseffekt gewarnt hatte, in den 1970er Jahren von sehr vielen Ökonomen mit teils heftiger Polemik zurückgewiesen.

<sup>5</sup>An Satelliten-Sonnenkraftwerke und Weltraum-Industrialisierung [14, 15] wird dabei nicht gedacht.

<sup>6</sup>Selbstverständlich ist wegen der ersten zwei Hauptsätze der Thermodynamik die Wertschöpfung pro Energieeinheit begrenzt.

“technischen Fortschritt” zuschreibt. Das hat seit langem zu Diskussionen innerhalb der Volkswirtschaftslehre geführt, die der Schöpfer der neoklassischen Wachstumstheorie, *Robert Solow*, im Jahre 1994 wie folgt zusammenfasste: “This ... has led to a criticism of the neoclassical model: it is a theory of growth that leaves the main factor in economic growth unexplained.” [16]

Neuere ökonometrische Untersuchungen, die industrielles Wirtschaftswachstum ohne Solow-Residuum reproduzieren, erhalten andere Faktor-Gewichtungen: für Energie 40 bis 50 Prozent, für Kapital 30 bis 40 Prozent und für Arbeit 10 bis 20 Prozent [17]-[19]. Sie verwenden dabei die LINEX-Produktionsfunktion  $q_{Lt}$ . Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen der normierten Wertschöpfung (“Output”)  $q = Q/Q_0$  und den normierten Produktionsfaktoren  $k = K/K_0$ ,  $l = L/L_0$ ,  $e = E/E_0$ , wobei 0 ein Basisjahr indiziert, durch

$$q_{Lt} = q_0 e \exp \left[ a \left( 2 - \frac{l+e}{k} \right) + ac \left( \frac{l}{e} - 1 \right) \right] ; \quad (6)$$

$q_0, a$  und  $c$  sind Technologieparameter, die durch Anpassung bestimmt werden. Die Wertschöpfung einer Volkswirtschaft ist das BIP. Die Abbildung 3 zeigt die Reproduktion des Wirtschaftswachstums der BR Deutschland zwischen 1960 und 2000.

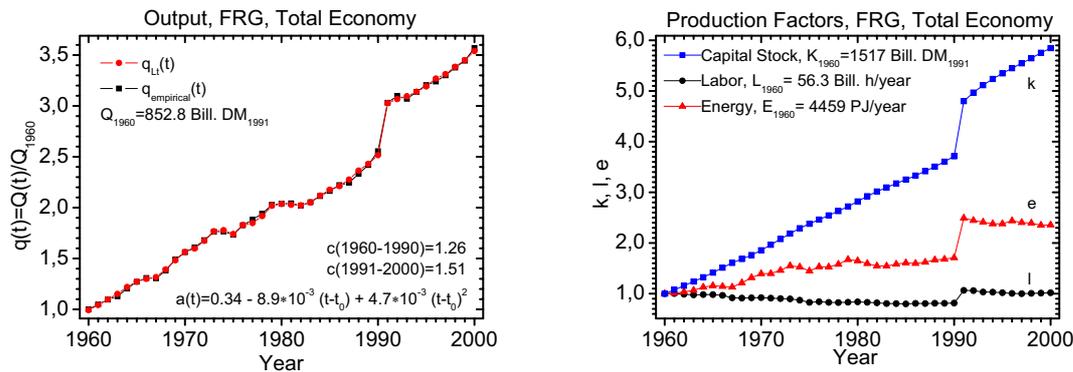
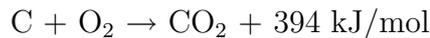


Abbildung 3: Links: Empirisches Wachstum (Quadrate) und mit der LINEX-Produktionsfunktion berechnetes theoretisches Wachstum (Kreise) der normierten Wertschöpfung  $q = Q/Q_{1960}$  (Bruttoinlandsprodukt) der Bundesrepublik Deutschland (FRG) zwischen 1960 und 2000. Rechts: Empirische Zeitreihen der normierten Faktoren Kapital  $k = K/K_{1960}$ , Arbeit  $l = L/L_{1960}$  und Energie  $e = E/E_{1960}$  in der BR Deutschland.[18]

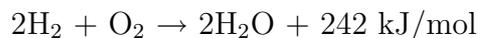
Diese LINEX-Funktion wurde in einer früheren Berechnung der Opportunitätskosten von  $\text{CO}_2$  [20] verwendet, um den Verlust an Wertschöpfung zu ermitteln, wenn zur Emissionsminderung und Klimastabilisierung der Energieeinsatz reduziert werden müsste. Dieser Ansatz unterscheidet sich grundsätzlich von den Stabilisierungs-Szenarien der “Stern-Review”, und über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Zwangs zur drastischen Reduktion des Energieeinsatzes kann nur spekuliert werden. Aber sie dürfte von Null verschieden sein. Darum darf man vielleicht die folgende Abschätzung als eine Stützung der zu Beginn von Kapitel 4 zitierten Auffassung von *Mendelsohn* sehen, dass die Klimastabilisierung mehr kosten wird, als Stern angibt.

Man geht davon aus, dass die Klimastabilität in etwa erhalten bleibt, wenn bis zum Jahre 2100 nicht mehr als 300 Milliarden Tonnen (Gt) C in Form von  $\text{CO}_2$  emittiert werden. Ende der 1980er Jahre wurden global jährlich 6 Gt C emittiert. Unrealistisch optimistisch (unter Klimagesichtspunkten) nehmen wir an, dass zwischen 1981 und 2030 bei stagnierendem BIP jährlich 6 Gt C emittiert werden. Dann ist im Jahr 2030 das Gesamtemissionsbudget erschöpft. Weniger optimistisch nehmen wir an, dass dann auch von den in Abb. 2 aufgeführten Klimawandel-Folgen so viele schlimme eingetreten sind, dass ein inzwischen etablierter Klima-Sicherheitsrat der Vereinten Nationen ein sofortiges weltweites Verbot erlässt, aus der Reaktion



weiterhin Energie zu gewinnen. Aus dieser Reaktion wurden 1989 etwa 60% des Weltenergiebedarfs gedeckt. Nur die Verbrennung des Wasserstoffs in den fossilen Energieträgern ist noch erlaubt. (Bei den derzeitigen Verbrauchsdaten reichen die sicheren Reserven an Kohle 161, Öl 41 und Gas 63 Jahre [21].)

In der stagnierenden Wirtschaft, in der die bisherigen niedrigen Energiepreise die mit teureren Investitionen verbundene Erschließung neuer nicht-fossiler Energiequellen verhindert haben, stehen letztere nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung. Ein genialer Verfahrenstechniker habe jedoch rechtzeitig ein Verfahren erfunden, mit dem zu vernachlässigbaren Kosten sofort so viel Wasserstoff aus den fossilen Energieträgern extrahiert werden kann, dass aus der Reaktion



und den vorhandenen nicht-fossilen Energiequellen insgesamt 50 Prozent des Energiebedarfs für einige Zeit gedeckt werden können. Die Gesellschaft passt sich sofort friedlich an die neue Situation an, so dass der einzige Wertschöpfungs-Verlust durch die Halbierung des Energieeinsatzes entsteht. Die unrealistisch optimistischen Annahmen sind erlaubt, weil es uns hier um die Abschätzung der *kleinstmöglichen* Verluste in diesem Dekarbonisierungsszenario geht.

Das Einsetzen von  $e_{2031} = e_{1981}/2$ ,  $k_{2031} = k_{1981}$ ,  $l_{2031} = l_{1981}$  in die LINEX-Funktion (mit den 1981-Parametern  $q_0 = 0,99$ ,  $a = 0,24$  und  $c = 1,04$ ) für den industriellen Sektor "Warenproduzierendes Gewerbe", der rd. 50% des deutschen BIP produzierte und die gesamte Volkswirtschaft stützt, ergibt

$$\frac{q_{2031} - q_{1981}}{q_{1981}} = -36\%. \quad (7)$$

Der Verlust an Wertschöpfung der Industrie beträgt ab 2031 also jährlich 36% gegenüber den Jahren vor Halbierung des Energieeinsatzes wegen Dekarbonisierung. Da die Gesamtwirtschaft mit der Industrie leidet, sind ihre Verluste vergleichbar. Ähnliches gilt für alle Industrieländer.

Würde ab 2031 die Wertschöpfung bei gleichem Faktoreinsatz durch schlagartige Effizienzverbesserung um 30% gesteigert, beliefe sich der jährliche Verlust immer noch auf 17%.

Der Unterschied zum Ein-Prozent-Verlust von Stern ist dadurch bedingt, dass hier die Wertschöpfung bei Reduzierung von Energiedienstleistungen abnimmt, während dieser Fall in der "Stern Review" mit ihrem konstanten Wirtschaftswachstum nicht vorkommt.

Aber vielleicht gelingt ja Wissenschaft und Technik eine wie immer geartete Dekarbonisierung ohne Minderung der Energiedienstleistungen. Dazu müssen schnellstmöglich Empfehlungen der “Stern Review” in die Tat umgesetzt werden.

## 6 Empfehlungen

Zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen empfiehlt die “Stern Review” mit großem Nachdruck Maßnahmen, die seit über 20 Jahren seitens der Wissenschaft gefordert werden:

- Energie-/CO<sub>2</sub>-Steuern, Emissionshandel sowie Gebote und Verbote.
- Entwicklung kohlenstoffarmer Energiequellen und effizienzsteigernder Technologien.
- Beseitigung der Barrieren gegen Verhaltensänderung.
- Internationale Kooperation.
- Unterstützung der Entwicklungsländer bei der Emissionsminderung.

Weiterhin wird Anpassung an die unvermeidlichen Folgen des Klimawandels empfohlen. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass der Klimawandel bereits im Gange ist.

## Literatur

- [1] Stern Review Report on the Economics of Climate Change, ISBN number: 0-521-70080-9, Cambridge University Press (<http://www.cambridge.org/9780521700801>) 2007
- [2] Paul A. Samuelson, *Volkswirtschaftslehre I*, Bund Verlag, Köln, 1976; S.32
- [3] Die SIEMENS-Kostenschätzungen für CO<sub>2</sub>-entsorgte Kraftwerke wurden auf einer Anhörung zur CO<sub>2</sub>-Rückhaltung und Entsorgung 1990 im BMFT vorgetragen.
- [4] D. Birnbacher, *Intergenerationelle Verantwortung oder: Dürfen wir die Zukunft der Menschheit diskontieren?*, in: Umweltschutz und Marktwirtschaft (J. Klawitter, R. Kümmel Hrsg.), Königshausen und Neumann, Würzburg, 1989; S. 101-115
- [5] H. Daly, *Ecological Economics* **34**, 1 (2000)
- [6] W. Nordhaus, *Science*, Sept. 1991, 1206.
- [7] W. Beckermann, *Small is Stupid*, Duckworth, London, 1997
- [8] T.C. Schelling, *The Cost of Combating Global Warming*, Foreign Affairs, November/December 1997, 9
- [9] Deutsche Physikalische Gesellschaft und Deutsche Meteorologische Gesellschaft, *Warnung vor drohenden weltweiten Klimaänderungen durch den Menschen*, Phys. Blätter **43**, 347–349 (1987)

- [10] Deutsche Physikalische Gesellschaft, *Energiememorandum 1995*, Phys. Blätter **51**, 388–391 (1995)
- [11] Deutsche Physikalische Gesellschaft, *Erklärung zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung anlässlich der 3. Vertragstaaten-Konferenz der UN-Klimarahmenkonvention vom 1.–10.12.1997 in Kyoto, Japan*, Phys. Blätter **53**, 1178 (1997)
- [12] Deutscher Bundestag (Hrsg.), *Protecting the Earth's Atmosphere*, Bonn, 1989
- [13] R. M. Solow, *The Economics of Resources and the Resources of Economics*. The American Economic Review **64** (1974) 1-14
- [14] G.K. O'Neill, *The Colonization of Space*, Physics Today, September 1974, p.32-40; *The Low (Profile) Road to Space Manufacturing*, Astronautics and Aeronautics, Special Section, March 1978, und *The High Frontier*, William Morrow and Co, New York, 1977 - deutsch: *Unsere Zukunft im Raum*, Hallwag, Bern, 1978.
- [15] N. Lior, *Power from Space*, Energy Conversion and Management **42** (2001), 1789-1805.
- [16] Robert M. Solow, *Perspectives on growth theory*, Journal of Economic Perspectives **8** (1994) 45 - 54.
- [17] R. Kümmel, W. Strassl, A. Gossner, W. Eichhorn, *Technical progress and energy dependent production functions*, Z. Nationalökonomie – Journal of Economics **45** (1985) 285 - 311; D. Lindenberger, W. Eichhorn, R. Kümmel, *Energie, Innovation und Wirtschaftswachstum*, Zeitschrift für Energiewirtschaft **25** (2001), 273-282; R. Kümmel, J. Henn, D. Lindenberger, *Capital, labor, energy and creativity: modeling innovation diffusion*, Structural Change and Economic Dynamics **13** (2002) 415 - 433.
- [18] J. Schmid, D. Lindenberger, R. Kümmel, *Energy, Economic Growth and German Reunification*, in: “Advances in Energy Studies”, (S. Ulgiati et al. Eds.), SGE, Padova, 2003, pp. 119-124.
- [19] R. U. Ayres and B. Warr, *Accounting for growth: the role of physical work*, Structural Change and Economic Dynamics **16** (2005) 181 - 209; desgl. in: “Advances in Energy Studies”, (S. Ulgiati et al. Eds.), SGE, Padova, 2003, pp. 15-33.
- [20] R. Kümmel, *Opportunity Costs of CO<sub>2</sub>*, Energy **17** (1992) 901 - 906.
- [21] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, *Energiedaten 2005: Tabellen 40, 41, 42*, online service.