

---

# Zur Behandlung des Treibhauseffekts im Chemieunterricht

In memoriam Professor Dr. Dres. h. c. Josef Goubeau  
31. 3. 1901–18. 10. 1990

*Verfasser: Prof. Dr. Manfred Adelhelm, Prof. Dr. Ernst-Gerhard Höhn, Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, Abt. Chemie, Postfach 220, 7140 Ludwigsburg*

*Ursachen und mögliche Auswirkungen des anthropogenen Treibhauseffekts werden kurz vorgestellt. Es wird ein einfacher Modellversuch beschrieben, mit dem man das verschieden starke Treibhauspotential verschiedener Gase qualitativ demonstrieren kann, und es werden Hinweise zur Auswertung des Versuchs und zur Unterrichtsgestaltung gegeben.*

---

## 1 Einleitung

Meteorologische Beobachtungen haben für die letzten hundert Jahre bereits deutliche Veränderungen der mittleren Temperaturen über der Erdoberfläche nachgewiesen (Abb. 1), und verschiedene Modellrechnungen sagen für die nächsten Jahrzehnte weitere Erwärmungen zwischen 1,5 und 4,5 °C voraus [1]. Damit wären globale Klimaveränderungen mit dramatischen Verschiebungen der Vegetationszonen und ein deutlicher Anstieg des Meeresspiegels zu erwarten. Die ökologischen, sozialen und politischen Folgen einer solchen Entwicklung sind unabsehbar, wenn man nur daran denkt, daß Hauptanbauggebiete für Ge-

treide, z. B. in den USA, wegen anhaltender Dürren für die Welternährung ausfallen könnten, daß ganze Siedlungsräume, z. B. in den Mittelmeerländern, durch Verschiebung der Wüstengürtel gefährdet würden oder weite Landstriche, z. B. Bangladesch, infolge Überflutung von der Landkarte verschwinden könnten.

Ursache für die vorhergesagten Klimaveränderungen ist die anthropogen bedingte Zunahme des Gehalts verschiedener Spurengase und deren zusätzlicher Treibhauseffekt in unserer Atmosphäre. Diese Spurengase sind Kohlenstoffdioxid, Methan, Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFKW), Ozon, Distickstoffoxid u. a. Ihren Anteil am Treibhauseffekt verdeutlicht Tabelle 1.

Insbesondere die in ungeheurem Ausmaß betriebene Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas hat seit Beginn der Industrialisierung zu einer seit Jahrtausenden nicht beobachteten Zunahme des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre geführt: Innerhalb von 200 Jahren stieg dieser von rd. 280 ppm auf über 350 ppm (Abb. 2). Die Menschheit ist auf dem Wege, das ihr von der Natur

anvertraute Erbe fossiler Energien, die in Millionen von Jahren angesammelt wurden, in wenigen Jahrhunderten zu verprassen. Dabei ist die Endlichkeit der Vorräte nur die eine Seite des Problems; die andere ist, daß sich der für das »Abfallprodukt« Kohlenstoffdioxid vorhandene Kreislauf als nicht geschlossen erwiesen hat. Die Leistungen der wichtigsten Kohlenstoffdioxidsenken – die Photosynthese und die Auf-

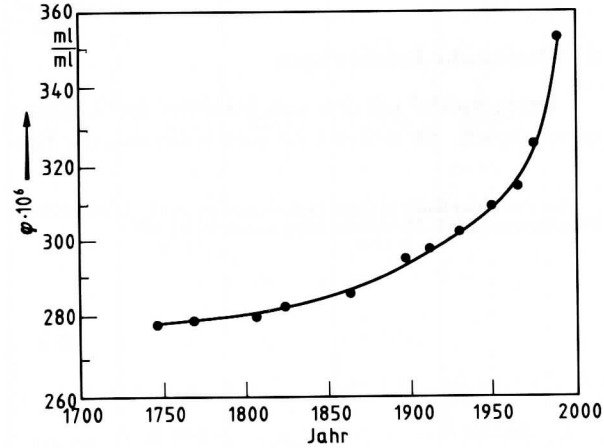
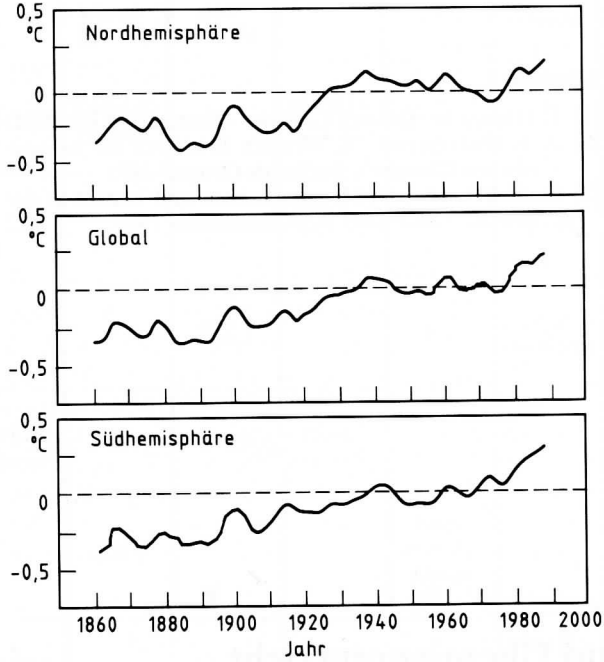


Abb. 2. Zeitlicher Trend des atmosphärischen Kohlenstoffdioxid-Volumenanteils  $\varphi$  nach [2].

◁ Abb. 1. Anomalien der bodennahen globalen Temperaturen (1861–1988) unter Berücksichtigung der kontinentalen und marinen Daten. Als Nulllinie ist der Mittelwert des Zeitabschnittes zwischen 1951 und 1989 gewählt worden [1].

Treibhausgas	Kohlenstoffdioxid	Methan	Distickstoffoxid	Ozon <sup>1</sup>	R 11	R 12
Volumenanteil in $10^{-6}$ ml/ml	354	1,72	0,31	0,03	0,00028	0,00048
Verweilzeit in Atmosphäre und Biosphäre in a	120 <sup>2</sup>	10	150	0,1	60	130
Jährliche Zunahme in %	0,5	1,0	0,25	0,5 <sup>5</sup>	5	3
Relatives Treibhauspotential (bei gl. Vol.)	1	21	206	2000	12 400	15 800
(bei gl. Masse)	1	58	206	1800	3 970	5 750
Anteil <sup>3</sup> am Effekt in %	50	13 <sup>4</sup>	5	7 <sup>6</sup>	5	12

<sup>1</sup> Sämtliche Angaben sind sehr grobe Mittelwerte, da der Ozonanteil in der Troposphäre räumlich und zeitlich sehr variabel ist.

<sup>2</sup> Strenge genommen besitzt Kohlenstoffdioxid eine wesentlich kürzere Verweilzeit, wenn die Austauschvorgänge zwischen Atmosphäre und Biosphäre einerseits und Atmosphäre und Ozean bis in große Tiefen andererseits betrachtet werden. Die genannte Verweilzeit von 120 Jahren beinhaltet auch Phasen, in denen das Gas in andere Kohlenstoffverbindungen überführt wird. Mit dieser Verweilzeit wird zum Ausdruck gebracht, daß es etwa 120 Jahre dauert, bis eine freigesetzte Kohlenstoffdioxidportion auf etwa ein Drittel ihres ursprünglichen Werts im wesentlichen durch Aufnahme in den Ozean abgesunken ist.

<sup>3</sup> Diese Anteile ergeben in der Summe nur 93 Prozent, da die anderen CFKW nicht enthalten sind. Ihr Anteil liegt etwa bei 7%, der Anteil des stratosphärischen Wasserdampfes bei 3%. Werte der 80er Jahre.

<sup>4</sup> In diesem Anteil von 13% sind nur die direkten Effekte enthalten.

<sup>5</sup> Anstieg nur in der Troposphäre der Nordhemisphäre.

<sup>6</sup> Der Beitrag des Ozons kann nur sehr unsicher quantifiziert werden.

Tab. 1. Charakteristika der Treibhausgase (verändert nach [1]).

nahme des Gases im schwach basischen Meerwasser – kommen dem Eintrag nicht nach. Hinzu kommen Rückgang der Waldflächen, Brandrodung mit ihrer doppelten Wirkung, nämlich Zunahme von Kohlenstoffdioxid und Minderung der Assimilation.

Bei der Nutzung fossiler Energien betreibt die Menschheit in der Atmosphäre ein offenes Endlager für den gasförmigen Abfall Kohlenstoffdioxid: ein wahrhaft ungelöstes »Endlagerproblem« (und wohl riskanter als ein im Salzstock gesichertes Endlager für feste radioaktive Abfälle)!

Um den von Wissenschaftlern schon länger warnend vorausgesagten Entwicklungen [2] bzw. der von den Medien inzwischen bereits reißerisch vermarkteten »Klimakatastrophe« zu begegnen, ist die Menschheit aufgerufen, sowohl das bedrohliche Wachstum der Weltbevölkerung mit ihrem steigenden Energiebedarf einzudämmen, als auch die Emissionen treibhauswirksamer Spurengase – allen voran Kohlenstoffdioxid – drastisch zu vermindern. Hier sind zum einen die Länder der dritten Welt, zum anderen ganz besonders die Industrieländer gefordert.

Da die Maßnahmen weltweit organisiert und koordiniert werden müssen, ist eine intensive Zusammenarbeit von Regierungen notwendig. Für einschränkende Maßnahmen (z. B. die Vorschläge der Weltklimakonferenzen) ist ein breiter gesellschaftspolitischer Konsens in den Völkern notwendig. Ein fundier-

ter naturwissenschaftlicher Unterricht breiter Bevölkerungsschichten ist hierfür eine gute Voraussetzung, und daher sollten Grundlagen und Auswirkungen des Treibhauseffekts in keinem Chemielehrplan mehr fehlen.

Die Behandlung dieses Themas im Lehrplan kann insbesondere in der anorganischen Chemie bei den Unterrichtseinheiten zu Kohlenstoffdioxid und Kohlenensäure sowie in der organischen Chemie bei den Unterrichtseinheiten Erdgas – Erdöl – Kohle, Energiegewinnung erfolgen.

Eine detaillierte Unterrichtsplanung ist im Rahmen dieses Beitrags nicht beabsichtigt. Hier soll lediglich ein Modellexperiment vorgestellt werden, das sich im Rahmen des Themas »Treibhauseffekt« einsetzen läßt.

## 2 Der Modellversuch

Zwei gleiche Bechergläser (250 ml, niedere Form) werden nebeneinander aufgestellt und von oben mit einer nicht zu schwachen Lampe so gleichmäßig wie möglich ausgeleuchtet (Abb. 3). Am einfachsten läßt sich eine Schreibtischlampe (mit einer 100-W-Glühlampe mit Reflektor) verwenden, die an einem Stativ gehalten wird. Auf dem Boden beider Bechergläser befinden sich runde Platten aus schwarz gebeiztem Messingblech. (Eine mattschwarze Oberfläche läßt sich er-

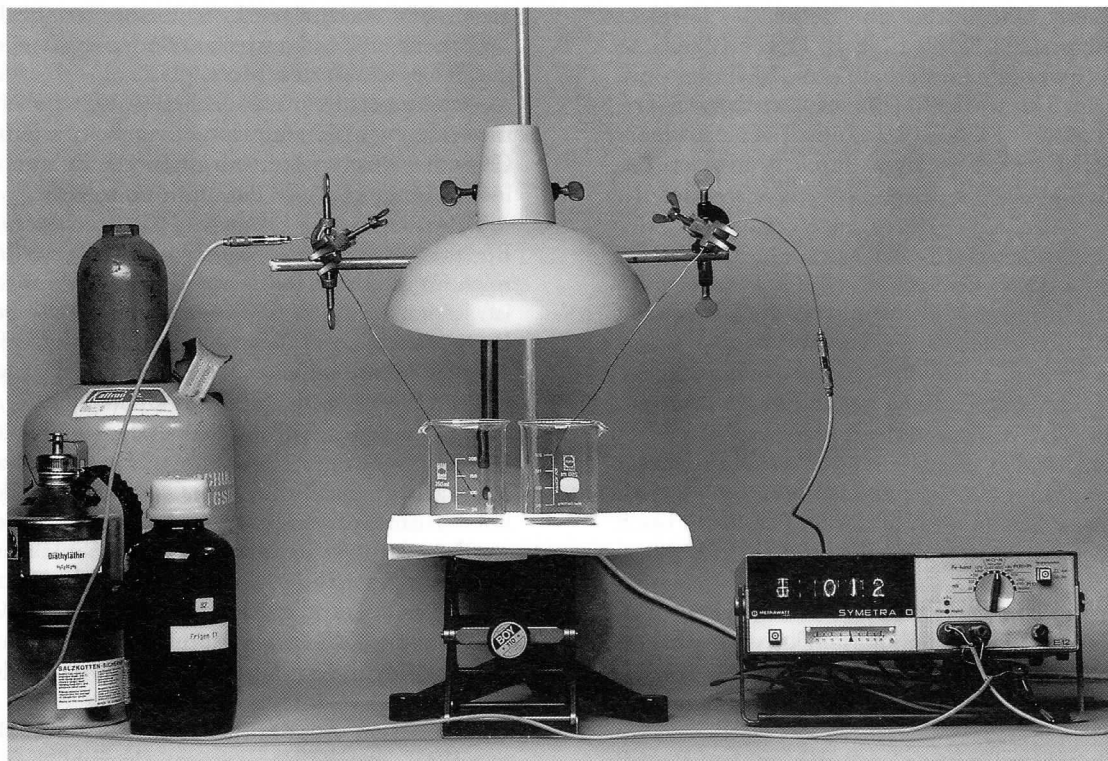


Abb. 3. Versuchsaufbau zur Demonstration des Treibhauseffekts.

reichen, wenn das Messingblech 2 Stunden in eine 10%ige Natronlauge gelegt wird, die 2,5 g Kaliumperoxodisulfat,  $K_2S_2O_8$ , auf 250 ml Lösung enthält.)

Die Temperaturen in den Bechergläsern werden in der Mitte, rd. 2 cm über dem Boden mit schräg eingespannten Thermoelementen (Thermocoax, Philips, Kassel) gemessen. Man kann die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Bechergläsern direkt anzeigen, wenn man die Thermoelemente gegeneinander auf ein Meßgerät schaltet. Wird die Lampe eingeschaltet, so ist nach wenigen Minuten das Strahlungsgleichgewicht erreicht und die Temperatur in den Bechergläsern konstant. Die angezeigte Temperaturdifferenz beträgt dann  $\Delta\vartheta = 0 \pm 2^\circ C$ . Diese Genauigkeit ist für die folgende qualitative Demonstration völlig ausreichend.

Nun wird über ein abgewinkeltes Glasrohr in das eine Becherglas vorsichtig ein Gas mit Treibhauseffekt eingeleitet, das andere Becherglas wird dabei mit einer Glasplatte abgedeckt. Nachdem z. B. genügend Kohlenstoffdioxid eingeleitet wurde (nach etwa 30 Sekunden), entfernt man Einleitungsrohr und Glasplatte. In kurzer Zeit beobachtet man eine deutliche Temperaturdifferenz. In dem mit Kohlenstoffdioxid gefüllten Becherglas steigt die Temperatur innerhalb etwa 1 Minute um rd.  $10^\circ C$  an. Mit der Zeit nimmt die Temperaturdifferenz wieder ab, weil das Gas durch Konvektion und Diffusion aus dem Becherglas entweicht.

Besonders eindrucksvoll kann das hohe Treibhauspotential der CFKW (vgl. Tab. 1) demonstriert werden. Leitet man in das eine Becherglas Dichlordifluormethan,  $CCl_2F_2$ , (R 12, z. B. Frigen 12) ein, so steigt die Temperatur innerhalb von 2 Minuten um rd.  $22^\circ C$  an. Das starke Treibhauspotential von Trichlorfluormethan,  $CCl_3F$ , (R 11) und Trichlortrifluoethan,  $C_2Cl_3F_3$ , (R 113) kann durch Eintropfen der Flüssigkeiten gezeigt werden (1–2 ml sind ausreichend!); nach kurzer Abkühlung durch die Verdampfung der Flüssigkeit wird nach rd.  $2\frac{1}{2}$  Minuten eine Erwärmung um rd.  $15^\circ C$  beobachtet. (Bei R 113 steigt die Temperatur in 3 bis 6 Minuten um rd.  $18^\circ C$ ). Analog lassen sich auch andere leicht verdampfende Flüssigkeiten wie Pentan, Diethylether oder Dichlormethan als Substanzen mit Treibhauseffekt demonstrieren. Der für die Verhältnisse in der Erdatmosphäre wichtige Treibhauseffekt des Methans läßt sich mit dieser Versuchsanordnung nicht demonstrieren, da Methan eine geringere Dichte als Luft hat und daher zu rasch aus dem Becherglas entweichen würde.

### 3 Deutung des Experiments

Die Erklärung des Treibhauseffekts wird entsprechend den Möglichkeiten der Schulstufe und den Fähigkeiten der Schüler auf verschiedenem Niveau erfolgen.

Die einfachste Deutung wird sich an dem Begriff des Treibhauses oder Glashauses orientieren und an

die in jüngster Zeit immer beliebteren Wintergärten erinnern: Sonnenstrahlen dringen durch das gläserne Dach ins Innere des Treibhauses und wandeln sich beim Auftreffen auf den Boden (oder auf irgendwelche Körper im Inneren) in Wärmeenergie um. Die erwärmten Körper senden ihrerseits wieder »Wärmestrahlung« aus, die aber das Glasdach nicht durchdringen kann, weil das Glas für die (unsichtbare infrarote) Wärmestrahlung undurchlässig ist. Insgesamt verbleibt also einfallende Sonnenenergie im Glashaus und führt zu einer Temperaturerhöhung, zum »Treibhausklima«.

Die Analogie dieses Modells zum Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre hat natürlich erhebliche Schwächen, nicht nur, weil die Wechselwirkung von Strahlung verschiedener Wellenlängen und Intensitäten mit Gasen der Atmosphäre, mit Wolken, Landmassen und Meeresoberflächen sehr komplex ist, sondern auch, weil ein Dach aus festem Glas den »treibhauswirksamen« Spurengasen der Atmosphäre wenig ähnlich ist. Man behilft sich mit dem Bild einer »Gasglocke«, die sich über der Erdoberfläche wölbt.

Demgegenüber zeigt das Modellexperiment, eng angelehnt an die Verhältnisse in der nach oben offenen Gasmasse der Atmosphäre, den bestimmenden Einfluß der Zusammensetzung der Gasmischung auf die Temperatur im Gasraum (des Becherglases) unter der Einwirkung einer Quelle weißen Lichtes (der Lampe). Wichtig erscheint uns der unmittelbare Vergleich mit »normaler« Luft im zweiten Becherglas. Das einfallende Licht wird am Boden des Becherglases auf der geschwärzten Metallplatte absorbiert und die zurückgeworfene, ins längerwellige verschobene Wärmestrahlung in den infrarotaktiven Schwingungen der Gasmoleküle absorbiert, in kinetische Energie (Translation) umgesetzt und damit die Gasphase erwärmt.

Man kann leicht zeigen, daß tatsächlich die vom Boden zurückgestrahlte Energie im längerwelligen Bereich für die Erwärmung der Gasphase verantwortlich ist. Läßt man die geschwärzten Metallplatten auf dem Boden der Bechergläser weg, so mißlingt die Demonstration einer deutlichen Temperaturerhöhung.

Selbstverständlich muß im Unterricht darauf hingewiesen werden, daß der Gehalt der treibhausaktiven Spurengase in der Atmosphäre nur im ppm- bzw. ppt-Bereich liegt, andererseits die Gashülle aber kilometerhohe Ausmaße hat. Weiter muß an dieser Stelle betont werden, daß der Treibhauseffekt der natürlichen Spurengase eine wichtige Grundlage unseres Lebens ist, da er für eine mittlere Temperatur von  $+15^\circ C$  sorgt. (Ohne diese natürlich vorkommenden Treibhausgase betrüge die mittlere Temperatur über der Erdoberfläche etwa  $-19^\circ C$ ).

In diesem Zusammenhang sollte besonders auf den Wasserdampf als wichtigstes treibhauswirksames Spurengas hingewiesen werden (Anteil am gesamten

Treibhauseffekt rd. 65%) sowie auf Rückkopplungseffekte und komplexe Wechselwirkungen verschiedener Einflüsse in der Atmosphäre, wie es allgemein für vernetzte Systeme mit vielen wechselseitig abhängigen Parametern charakteristisch ist. Hier wäre insbesondere die stärkere Wasserverdunstung und der Anstieg des Meeresspiegels zu erwähnen, die der anthropogenen Erwärmung folgen können, sowie die Intensivierung des gesamten Wasserkreislaufs, die Änderung der Windverhältnisse, häufigere Extremwetterlagen (z. B. Hurricans) und mögliche Änderungen in der Bewölkung und der Pufferwirkung der Ozeane. Diese komplizierten, noch lange nicht in allen Einzelheiten durchschauten Zusammenhänge machen genaue Voraussagen über Ausmaß und Auswirkungen des anthropogenen Treibhauseffekts so schwierig.

Besonders wichtig erscheint uns, daß mit dem Modellversuch das viel höhere Treibhauspotential der CFKW gegenüber dem Kohlenstoffdioxid gezeigt werden kann. So können die Schüler einsehen, daß die Verwendung dieser Stoffe nicht nur wegen der Gefährdung der Ozonschicht vermieden werden muß, sondern auch wegen ihrer Auswirkungen auf das Weltklima (Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt derzeit rd. 17%).

Sind bei den Schülern oder Studenten genauere Kenntnisse über die Wechselwirkung von Strahlung und Materie, insbesondere über die Lichtabsorption von Molekülen vorhanden, so kann der Treibhauseffekt noch genauer auf molekularer Basis erklärt werden. So kann man z. B. die auf Folie kopierten Infrarotspektren von Kohlenstoffdioxid, R 11, R 12, Ozon, Distickstoffoxid u. a. auf dem Tageslichtprojektor übereinanderlegen, mit dem IR-Spektrum von Wasserdampf vergleichen und zeigen, daß jene Spurengase gerade im IR-transparenten Spektralbereich (im »Fenster«) des Wasserdampfs absorbieren und daher die Wärmerückstrahlung von der Erde in den Weltraum schwächen. Mit fortgeschrittenen Schülern oder Studenten können in einem Praktikum Infrarotspektren der Treibhausgase aufgenommen und diskutiert werden.

Das Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr und Energieableitung, welches die Temperatur in den unteren Schichten der Atmosphäre festlegt, ist nicht allein durch Strahlungsvorgänge bestimmt. Neben der Strahlung ist auch thermische Konvektion und latenter Wärmefluß (z. B. Verdampfung und Kondensation von Wasser) für den Energietransport verantwortlich. Auch in unserem Modellexperiment spielen Wärmeleitung und Konvektion sicher eine erhebliche Rolle für die beobachteten Temperatureffekte. (So zeigt z. B. Argon, welches im infraroten Spektralbereich nicht absorbiert, im Modellexperiment ebenfalls eine Temperaturerhöhung von maximal 6°C.)

Die Separierung und Quantifizierung dieser verschiedenen Energietransportmechanismen ist natürlich außerordentlich schwierig. Immerhin kann man qualitativ zeigen, daß auch im Modellexperiment Strahlungsvorgänge die Temperatureffekte mitbestimmen. Mißt man die Temperatur der geschwärzten Messingplatte direkt mit einem Thermoelement und gleichzeitig mit einem »berührungslosen« IR-Strahlungsthermometer von oben, so steigt nach Einbringen von R 12 oder R 113 die Temperatur im Gasraum an, auch die der Bodenplatte steigt etwas, aber vom IR-Thermometer wird eine erniedrigte Temperatur angezeigt. Dies ist auf die Absorption durch die Gase im Empfindlichkeitsbereich des IR-Thermometers zurückzuführen.

Als wichtigstes Lernziel gilt es, den Schülern und Studenten bewußt zu machen, wie dringend notwendig es ist, die Verschwendung kostbarer fossiler Rohstoffe zur Energiegewinnung weltweit drastisch einzuschränken und den Eintrag von Kohlenstoffdioxid und anderen Spurengasen mit Treibhauseffekt in die empfindlichen Gleichgewichte der Atmosphäre auf ein Minimum zu reduzieren.

Wir danken Frau REGINA HORNSTEIN für technische Hilfe.

## Literatur

- [1] a) Deutscher Bundestag (Hg.): Schutz der Erde. Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik. - Bonn 1990.
- b) Deutscher Bundestag, Enquete-Kommission »Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre« (Hg.): Schutz der Erdatmosphäre. Eine internationale Herausforderung. 3. Auflage. - Bonn: Economica Verlag; Karlsruhe: Verlag C. F. Müller 1990.
- [2] a) H. FLOHN: Das Problem der Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft. - Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1988.
- b) H. FLOHN: Das CO<sub>2</sub> - Klimaproblem und die Rolle biologischer Vorgänge. - Biologie in unserer Zeit 14 (1984) 43.
- c) K. HEINLOTH: Alle unsere Energie-Quellen. - Physik in unserer Zeit 18 (1987) 47.
- d) P. J. CRUTZEN - M. MÜLLER (Hg.): Das Ende des blauen Planeten? - München: C. H. Beck 1989.
- e) W. SEILER: Klimaänderung: die große Herausforderung des nächsten Jahrhunderts. - Tagungsbericht 10. Hochschultage Energie RWE, Essen 1990.
- f) C.-D. SCHÖNWIESE - B. DIEKMANN: Der Treibhauseffekt. Der Mensch ändert das Klima. 2. Auflage. - Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt 1988.
- g) P. FABIAN: Atmosphäre und Umwelt. 3. Aufl. - Berlin: Springer 1989.
- h) E. KEPPLER: Die Luft, in der wir leben. Physik der Atmosphäre, Kapitel 9. - München: Piper 1988.
- i) R. M. WHITE: Die große Klima-Debatte. - Spektrum der Wissenschaft 9/1990. □