

Der Atmosphären-Effekt

D. Hebert, TU Bergakademie Freiberg^{*)}

Zusammenfassung:

Auf der Grundlage einer historischen Einordnung und physikalischen Erläuterung des Treibhauseffektes wird über das CO₂-Problem und Aspekte rezenter Klimaänderungen informiert. Anschließend werden Einwände der Klima-Skeptiker diskutiert und es wird ein Verfahren zur thermodynamischen Begründung der mittleren Temperatur der bodennahen Luft vorgestellt.

1. Einleitung

Der Atmosphäreneffekt wird unter der Bezeichnung „Treibhaus“-Effekt von einer dominanten Mehrheit etablierter Klimaforscher als Basis jeglichen Verstehens rezenter Klimaveränderungen auf wissenschaftlicher und politischer Ebene und vor allem in den öffentlichen Medien unbeirrt zelebriert, obwohl die sogenannten „Skeptiker“ nicht müde werden, Einwände dagegen vorzutragen. Diese Minderheit von Wissenschaftlern, denen es sowohl an einer gewissen Lobby als auch an öffentlicher Plattform mangelt, geht von der klimasteuernden Wirkung der Sonne aus und bezweifelt, dass der Energieumsatz der Menschheit ($1,3 \cdot 10^{13}$ W (ALTENBERND und MÖLLER, 2004) $\hat{=}$ 0,1 % der Insolation) Klimaänderungen bewirken kann.

Mit diesem Artikel soll ein Beitrag zur physikalischen Bewertung antropogener Einflüsse auf das Klima der Erde geleistet werden.

2. Der Treibhauseffekt

Um die wärmespeichernde Wirkung der Erdatmosphäre zu erklären oder zumindest plausibel zu machen, wird die Atmosphäre gern mit der Glashülle eines Treibhauses verglichen, die Licht und Wärmestrahlung ins Innere eindringen lässt und die Emission von langwelliger Wärmestrahlung sowie das Ausströmen feuchtwarmer Luft verhindert.

Diese Modellvorstellung wird von einer wachsenden Zahl von „Skeptikern“ nicht mehr akzeptiert (THUENE, 2000).

2.1. Historie

Die Erfindung des Begriffes Treibhauseffekt wird dem französischen Physiker FOURIER zugeschrieben (1827). Er verstand darunter einen wärmenden atmosphärischen Effekt. Um 1863 bewies der irische Physiker TYNDALL durch Messungen, dass Gase der Atmosphäre (insbesondere Wasserdampf) Wärme aufnehmen können. Der schwedische Chemiker ARRHENIUS spekulierte 1890 darüber, ob die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche, die er auf +15 °C schätzte, von wärmeabsorbierenden Gasen abhängt und folglich durch anthropogene CO₂-Emission beeinflussbar sein könnte. 1957 schließlich warnte der US-Ozeanograph REVELLE (REVELLE und SUESS, 1957) vor einem durch Erhöhung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre ausgelösten „Global Warming“. Seit 1958 werden auf dem Lavafeld des Vulkans Mauna Loa auf Hawaii regelmäßig Bestimmungen des CO₂-Gehaltes der Luft durchgeführt (KEELING-Kurve, siehe z.B. SCHÖNWIESE, 1995 und HOUGHTON, 2001). Man beobachtete einen deutlichen Anstieg des CO₂-Gehaltes von ca. 320 ppm im Jahr 1960 auf etwa 360 ppm im Jahre 2000 (Abb. 1).

^{*)} Anschrift des Autors: Prof. Dr. D. Hebert, TU Bergakademie Freiberg, 09596 Freiberg; e-mail: hebert@tu-freiberg.de

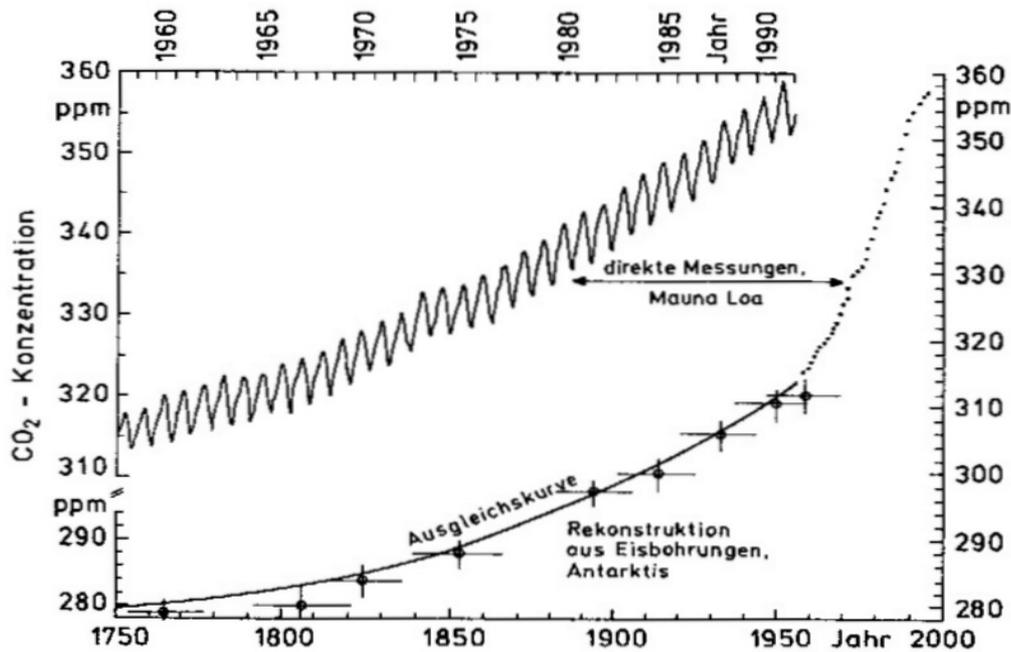


Abb. 1: Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre seit 1750 (aus SCHÖNWIESE, 1995)

Weitere Ausführungen zur Historie finden sich bei BECK (2005).

Die physikalische Begründung der Auswirkung infrarot-aktivierbarer Gase, die häufig Treibhausgase genannt werden, geht auf mehrere Arbeiten von KONDRATYEV u.a. zurück (KONDRATYEV, 1969; KONDRATYEV und MOSKALENKO, 1977; KONDRATYEV und MOSKALENKO, 1984). Sie haben die Differenz zwischen der Temperatur der bodennahen Luft ($\overline{T_0} = 288 \text{ K} \hat{=} +15 \text{ }^\circ\text{C}$) und der Strahlungsgleichgewichtstemperatur der Erde incl. Atmosphäre ($T_{\text{St}} = 255 \text{ K} \hat{=} -18 \text{ }^\circ\text{C}$) als „Treibhauseffekt“ aufgefasst und auf die wichtigsten IR-anregbaren Gase (H₂O-Dampf, CO₂, O₃, N₂O, CH₄) aufgeschlüsselt.

2.2. Physikalische Begründung

Die Funktion des Gärtner-Treibhauses beruht auf zwei Wirkungen des Glasdaches: Die an der Erdoberfläche ankommende Solarstrahlung (Licht und Wärme im nahen Infrarot bis etwa 2 μm) kann durch das Glasdach eindringen und das Entweichen von feucht-warmer Luft aus dem Treibhaus sowie die Abstrahlung von Wärme im Wellenlängenbereich oberhalb von ca. 4 μm wird durch das Glasdach verhindert. Die Ursache dafür liegt im Transmissionsverhalten von Glas (Abb. 2). Nehmen wir beispielsweise an, dass die Temperatur im Glashaus 40 °C (313 K) beträgt, dann ergibt sich nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz für schwarze Strahler

$$\lambda_{(\text{Max})} \cdot T = 2896 \text{ } \mu\text{m} \quad (1)$$

das Strahlungsmaximum bei 9,2 μm. In diesem Wellenlängenbereich ist das Glas undurchlässig (Abb. 2). Die Übertragbarkeit des Glashauseffektes auf die Erdatmosphäre ist schon deswegen fragwürdig, weil es in der Atmosphäre eine den konvektiven Transport von Warmluft verhin-dernde Schicht nicht gibt.

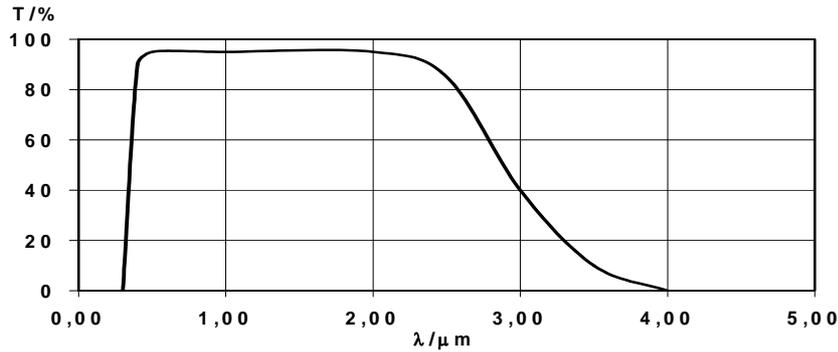


Abb. 2: Transmissionsverhalten von Glas (nach DEMTRÖDER, 2004)

Die Rolle des Glasdaches beim Treibhaus wurde von den Begründern des sogenannten natürlichen Treibhauseffektes in der Atmosphäre den infrarotaktivierbaren Spurengasen (Tabelle 1) zugeschrieben. Es handelt sich um mehratomige Moleküle, die durch IR-Absorption zu Schwingungen angeregt werden. Dabei nehmen sie aus der solaren Einstrahlung und aus der terrestri-

Tabelle 1: Infrarot anregbare Spurengase (nach KONDRATYEV, 1984 und SCHÖNWIESE, 1995)

Gas	Konzentration (1994)	Banden-Mitte/μm	ΔT/K
H ₂ O-Dampf	1,5 % (Trop.)	1,4;1,9;2,7;6,3	20,6
CO ₂	360 ppm	2,3; 4,0; 14,8	7,2
O ₃ (Trop.)	0,03 ppm	5; 10; 15	2,4
N ₂ O	0,31 ppm	4; 8	1,4
CH ₄	1,7 ppm	3; 7	0,8

sehen Emission IR-Quanten auf und geben ihre Schwingungsenergie durch Stöße an Luftmoleküle (N₂, O₂) ab, wodurch sich die Temperatur der Troposphäre ein wenig erhöht.

Die Absorptionsbanden dieser sogenannten Treibhausgase machen die Troposphäre mit Ausnahme eines Fensters bei 7...20 μm praktisch undurchlässig für Wärmestrahlung (Abb. 3).

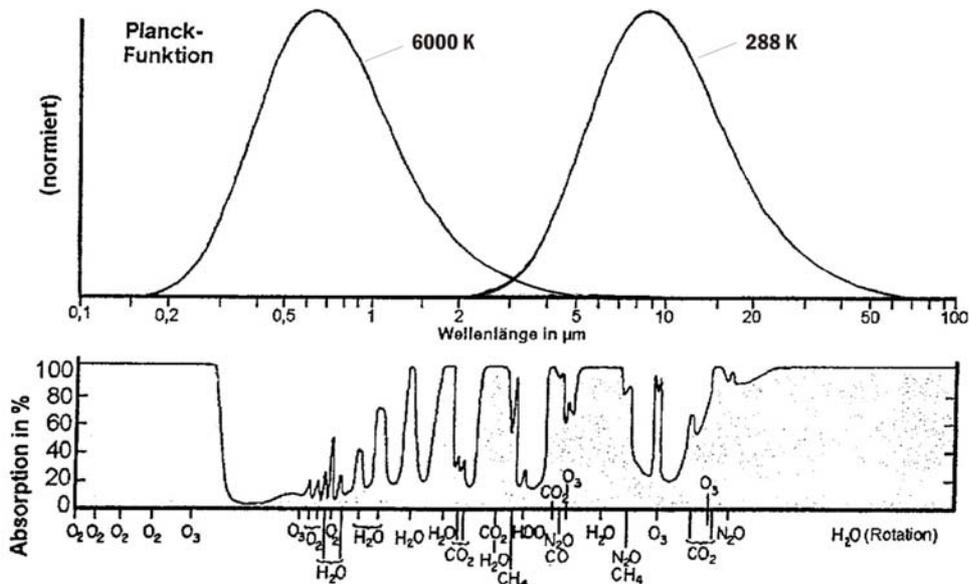


Abb. 3: Schwarzkörperstrahlung von Sonne und Erde sowie Absorptionsbanden der Spurengase H₂O, CO₂, N₂O, O₃, O₂, CH₄ (nach GOODY und YUNG, 1995)

IR-Spektren, die von Satelliten aus gemessen worden sind, belegen, dass die Erdoberfläche tatsächlich Wärme im Wellenlängenbereich dieses Fensters abstrahlt (Abb. 4).

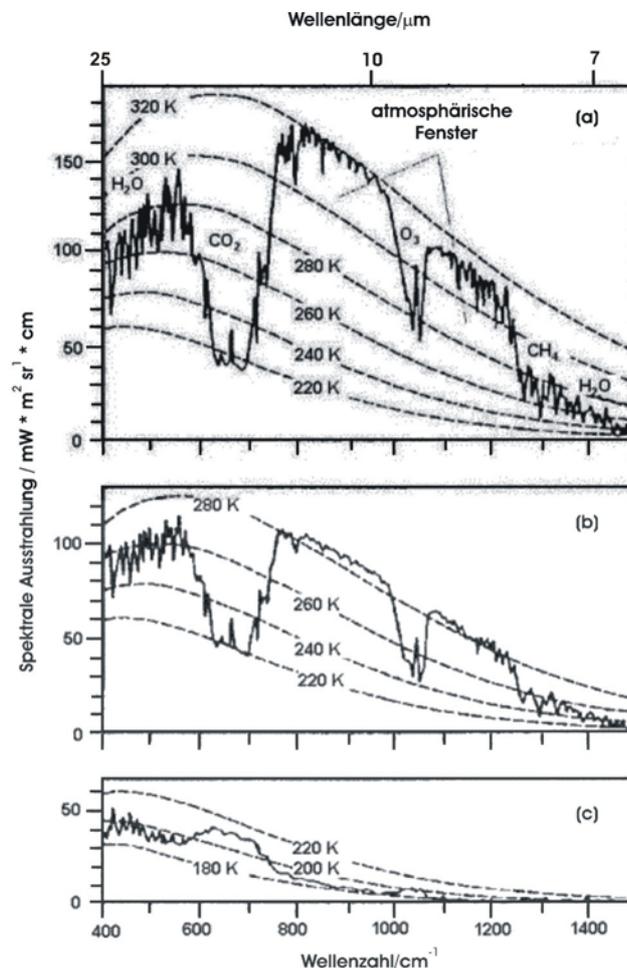


Abb. 4: IR-Emissionsspektren der Erdatmosphäre über (a) – der Sahara, (b) – dem Mittelmeer und (c) – über Antarktika (nach HANEL, 1972; BOLLE, 1979)

Die eingezeichneten Schwarzkörperkurven nach Planck zeigen Temperaturniveaus bei 320 K, 260...280 K und 220 K an. Die Strahlungsquellen sind:

- Im IR-Fenster (8...13 μm) die Sahara mit einer Bodentemperatur von ca. 45 $^{\circ}\text{C}$,
- im Bereich der H_2O -Rotationsbande ($\lambda > 15 \mu\text{m}$, Abb. 3) der Wasserdampf mit $t \cong 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, also in einem Höhengniveau um 4000 m und
- bei 15 μm das CO_2 (t ca. $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$) im Höhenbereich um 10000 m.

Wir erkennen: Die Erde kann Wärme abstrahlen und die Spurengase H_2O und CO_2 können ihre Anregungsenergie auch abstrahlen – allerdings nur in großen Höhen, also bei hinreichend geringer Dichte der Luft!

KONDRATYEV und MOSKALENKO (1969, 1977, 1984) haben den hier beschriebenen Heizmechanismus der Troposphäre benutzt, um die Diskrepanz zwischen der sog. Strahlungsgleichgewichtstemperatur (T_{SE}) der Erde und der mittleren Temperatur der bodennahen Luft

$\overline{T_{\text{OE}}} = 288 \text{ K} = +15 \text{ }^{\circ}\text{C}$) zu erklären. T_{SE} ergibt sich aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz mit der Insolation an der Erdoberfläche von $S_0 = 342 \text{ W/m}_E^2$ (ROEDEL, 2000) und der Erdalbedo von 30 % zu 255 K.

Die Temperaturdifferenz

$$\Delta T = \overline{T_{OE}} - T_{SE} = 33 \text{ K} \quad (2)$$

wurde als Treibhauseffekt der Erdatmosphäre aufgefasst und mit Hilfe empirischer Beziehungen auf die IR-aktivierbaren Gase aufgeteilt (Tabelle 1). In diese Beziehungen gehen im Falle des Wasserdampfes die Lage und Breite der Absorptionsbanden, der Wasserdampfgehalt und die Höhenabhängigkeit des H₂O-Partialdruckes ein. Im KONDRATYEV-Modell sind Wolken nicht enthalten.

2.3. Das CO₂-Problem

Zu Beginn der 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts wurden zwei Messbefunde publiziert, die vielfältige wissenschaftliche und politische Aktivitäten hinsichtlich der Existenz und des Ausmaßes eines anthropogenen Treibhauseffektes auslösten:

- An Eisbohrkernen der Stationen Camp Century (Grönland) und Byrd (Antarktika) wurde festgestellt, dass die im Eis eingeschlossene Luft während der Eiszeit deutlich weniger CO₂ enthielt als nach der Eiszeit (siehe z.B. OESCHGER, 1980). Das Verhältnis von 190 ppm zu 290 ppm wurde später auch an einer Bohrung in der Station Vostok (Antarktika) für weitere drei Eiszeitzyklen bestätigt (Abb. 5).
- Die an der Station Mouna Loa (Hawaii) gemessenen CO₂-Gehalte der Luft zeigten eine signifikant ansteigende Tendenz (Abb. 1).

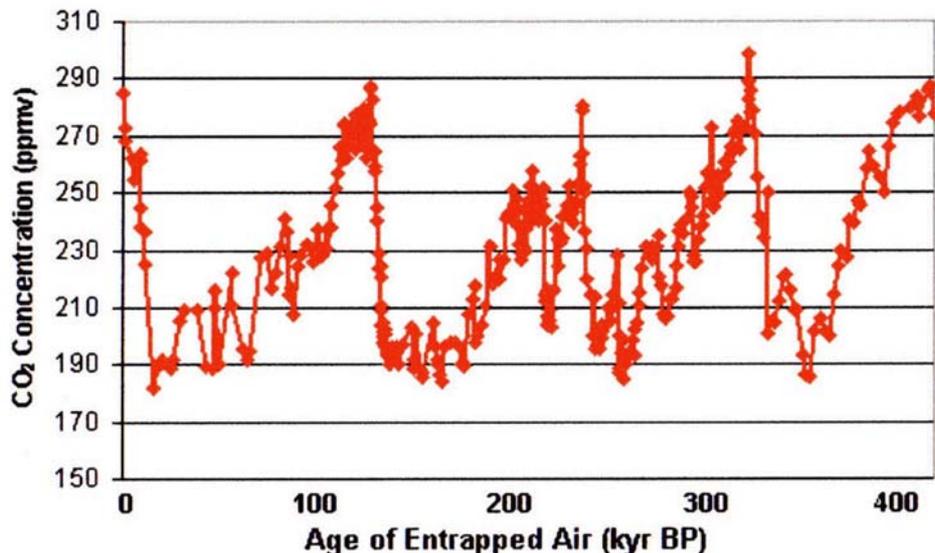


Abb. 5: CO₂-Record an einem Eiskern aus Vostok (Antarktika), Quelle: BARNOLA et. al. (1987)

Aus dem ersten Befund ergab sich die Spekulation, dass der abgesunkene CO₂-Gehalt der Atmosphäre eine Abnahme des natürlichen Treibhauseffektes zur Folge gehabt haben könnte, was dann die Eiszeit ausgelöst hätte. Aus der Verknüpfung dieser – unterdessen widerlegten (FISHER et. al., 1999) – Annahme mit dem zweiten Befund wurde gefolgert, dass der zivilisatorisch (?) bedingte Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre unter Voraussetzung des KONDRATYEV-Heizmechanismus (Abschnitt 2.2.) zu einer Erwärmung führen müsse. Das CO₂-Problem war geboren!

3. Der anthropogene Treibhauseffekt

3.1. Beobachtungen

Die an der bodennahen Luft gemessenen Temperaturen zeigen im globalen Mittel eine steigende Tendenz mit einem Zuwachs von $(0,6 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$ in den vergangenen 140 Jahren (Abb. 6).

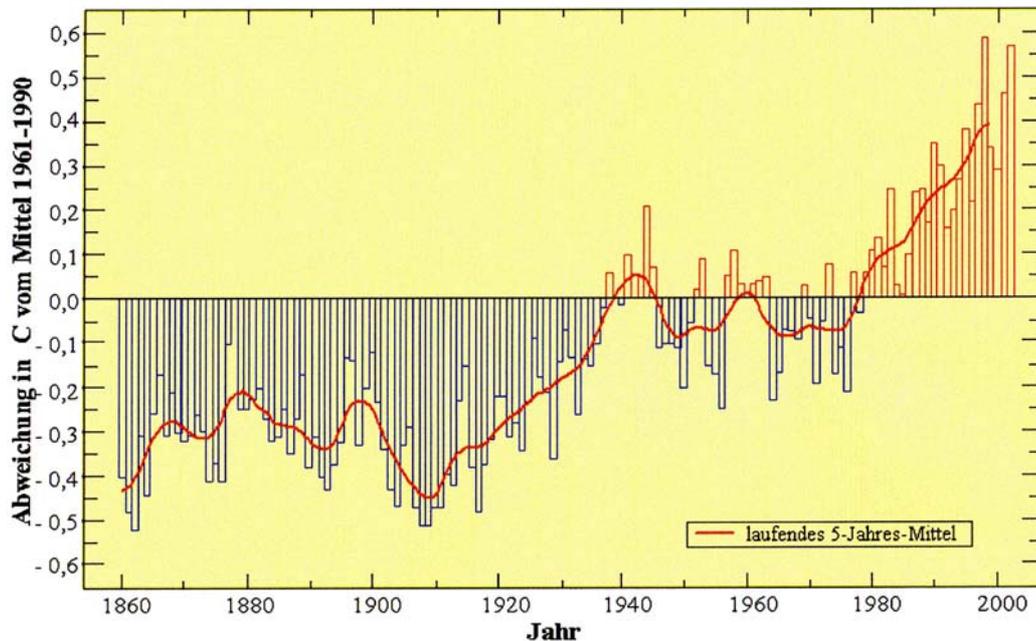


Abb. 6: Globale Mittelwerte der bodennahen Lufttemperatur (HOUGHTON et. al., 2001; CUBASCH und KASANG, 2000)

Phasen stärkeren Temperaturanstiegs erkennt man zwischen 1910 und 1940 sowie zwischen 1975 und 2000. Daneben beobachtet man einen schwachen Anstieg des Meeresspiegels von ca. 5 cm (CHURCH und GREGORY, 2001) im vergangenen Jahrhundert, das entspricht 0,001 % der mittleren Meerestiefe (3770 m).

3.2. Prognosen

Schon vor 25 Jahren hat sich der bedeutende Meteorologe H. FLOHN mit der Gefahr anthropogener Klimaänderungen beschäftigt (FLOHN, 1981). Er gibt für eine Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes eine zusätzliche Heizleistung am Erdboden von $\Delta Q = (+6,5 \pm 1,3) \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ an und berechnete, ähnlich KONDRATYEV (1969), mit einer halbempirischen Formel für den aus einem CO_2 -Anstieg resultierenden Temperaturanstieg ΔT :

$$\Delta T = D \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]} \right), \quad (3)$$

wobei für D ein Intervall von $(6 \pm 3) \text{ K}$ und für $[\text{CO}_2] = 300 \text{ ppm}$ einzusetzen ist. Eine Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes sollte folglich eine Temperaturerhöhung von $(4 \pm 2) \text{ K}$ auslösen. Seither hat sich auf dem Gebiet der Klimamodellierung eine stürmische Entwicklung vollzogen. Unter der Regie von WMO und UNEP erscheinen seit 1990 in 5-Jahresabständen „Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)“.

Die für die seit 100 Jahren beobachtete Erwärmung (Abb. 6) identifizierten Strahlungsantriebe sind in Abb. 7 graphisch dargestellt.

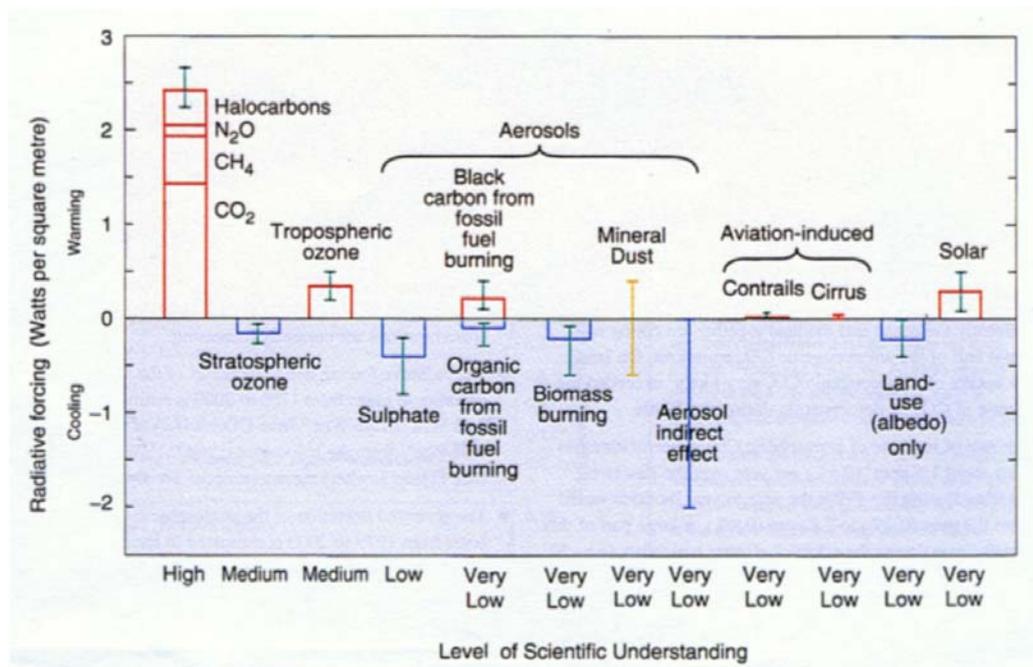


Abb. 7: Störung der Strahlungsbilanz der Erde durch anthropoge Treibhausgase (HOUGHTON, 2001)

Während Klimaforscher schon 1995 glaubten, den Treibhauseffekt wissenschaftlich sehr gut verstanden zu haben (z.B. GRASSEL, 1995), zeigen veröffentlichte Prognoseergebnisse (Tabelle 2) einen gewissen Abwärts-Trend: Lernkurve nach RÖCK (2000)?

Tabelle 2: Anthropoger Treibhauseffekt (Modellierung und Prognose)

Jahr	Autor	$\Delta Q_{TH}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta T(\text{anthr.})/K$	$\Delta Q(2 \cdot CO_2)/W \cdot m^{-2}$	$\Delta T(2100)/K$	$\Delta H_{Oz.}(2100)/cm$
1981	FLOHN	(1,4)	(0,9)	5...8	4 ± 2	—
1990	HOUGHTON	1,5	1,2...1,5	4,4	3...8	50...60
1995	HOUGHTON	1,5	0,3...0,6	4,4	1...3	—
1998	MYHRE	(1,1)	—	3,7	—	—
2001	HOUGHTON	1,5	$0,6 \pm 0,2$	3,7	1,4...5,8	10...90

4. Einwände der Skeptiker

4.1. Zum Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre

Nachdem der CO₂-Gehalt der Erdatmosphäre über geologische Zeiträume im Ergebnis der Lebenstätigkeit der Pflanzenwelt beständig abgenommen hatte (von ca. 5 % vor einer Milliarde Jahren auf etwa 0,1 % vor 100 Millionen Jahren (BECKMANN u. KLOPRIES, 1995)), beobachtet man im Pleistozän Schwankungen zwischen 190 ppm in der Hocheiszeit und 290 ppm in der Warmzeit (Abb. 5). Solcher an der in Eis eingeschlossenen Luft gemessenen CO₂-Gehalte gelten seit etwa 10 Jahren allerdings als unsicher und folglich als ungeeignet zur Ermittlung pleistozäner und vorindustrieller CO₂-Gehalte der Atmosphäre (JAWOROWSKI u.a. 1992a, 1992b und 2004): Einerseits bildet Eis für Gaseinschlüsse nicht unbedingt ein abgeschlossenes System und andererseits kann der CO₂-Gehalt von Luftblasen infolge chemischer Reaktionen sowie der Bildung von Gas-Hydraten abnehmen. Insofern entsprechen die in Abb. 1 eingetragenen, an Eis aus

Antarktika (Station Siple) für die vorindustrielle Zeit ermittelten CO₂-Gehalte (SIEGENTHALER u. OESCHGER, 1987) sicher nicht den damaligen CO₂-Gehalten der Atmosphäre – sie liegen niedriger.

Dem gegenüber haben nämlich CO₂-Bestimmungen an holozänen Sedimenten aus Seen in Dänemark deutlich höhere CO₂-Werte ergeben:

Für 9600 B.P. 348 ppm und für 9400 B.P. 333 ppm (WAGNER et. al., 1999). Auch direkte Messungen von CO₂-Gehalten an Luftproben aus Europa, Nordamerika und Peru belegen für die Zeitspanne von 1800 bis 1955 einen mittleren CO₂-Anteil an der Atmosphäre von 335 ppm (SLOCUM, 1955), wobei die Einzelmesswerte zwischen 270 ppm und 550 ppm streuen (JAWOROWSKI, 2004).

Geht man von einem vorindustriellen CO₂-Gehalt der Atmosphäre von 330 ppm aus, ergibt sich ein anthropogener Zuwachs von gegenwärtig ca. 30 ppm. Das sind anstelle des bislang angenommenen CO₂-Anstiegs von etwa 25 % nur 9 % bzw. 0,2...0,3 % pro Jahr.

Diese Größenordnung ergibt sich auch aus der globalen Kohlenstoffbilanz (Abb. 8).

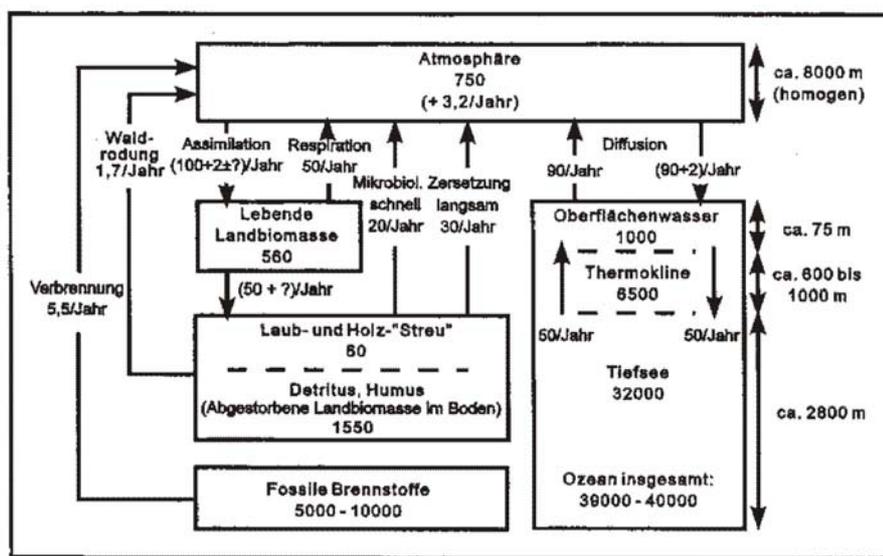


Abb. 8: Globale Kohlenstoffbilanz (Inventare in Gt, Flüsse in Gt/a) (aus ROEDEL, 2000)

Danach enthält die Atmosphäre 750 Gt Kohlenstoff und der Zustrom des durch Verbrennung freigesetzten fossilen Kohlenstoffs beträgt etwa 5,5 Gt/a entsprechend einer Zuwachsrate von 0,7 %/a. Infolge des raschen CO₂-Austausches zwischen Atmosphäre und Ozean (CO₂-Austauschzeitkonstante = 5 Jahre, SEGALSTAD, 1998), verbleiben nur 35 % davon in der Atmosphäre; der Hauptanteil wird offenbar von der Land-Biosphäre und vom Ozean aufgenommen. Angesichts des natürlichen Kohlenstoff-Inputs der Atmosphäre von 190 GT/a (Abb. 8) erscheint der anthropoge Input von 5,5 Gt/a (mit einem relativen Anteil von 2,9 %) als geringfügige Störung des globalen Kohlenstoffsystems.

4.2. Zur Heizrate des anthropogen CO₂

Sucht man nach einer wissenschaftlichen Begründung der Anteile IR-aktivierbarer Spurengase der Atmosphäre am natürlichen Treibhauseffekt bzw. nach einer Ableitung der entsprechenden Heizpotentiale, wird man auf Arbeiten von KONDRATYEV und MOSKALENKO (1977 und 1984) verwiesen – so z.B. auch in (SCHÖNWIESE 1995 und ROEDEL 2000).

Ein interessanter Beitrag zur Lösung des CO₂-Treibhausproblems wurde durch IR-spektrometrische Messungen an Luft-CO₂-Gemischen geleistet (HUG, 1998).

Für definierte Mischungsverhältnisse (375 ppm bzw. 714 ppm CO₂ in Luft) wurden im Bereich der 15 µm-Bande Extinktions-Spektren aufgenommen. Deren Auswertung ergab infolge unzu-

reichender Nachweisgenauigkeit und Auswertemethodik leider keinen klaren Beleg für den Einfluss des CO₂ auf den Treibhauseffekt (DIETZE, 2005), deutet aber auf einen eher geringen Effekt hin. Diese Meinung wird seit einem Jahrzehnt bereits von CRUTZEN (GRAEDEL u. CRUTZEN, 1994) vertreten.

Umfangreiche Untersuchungen zum CO₂-Kreislauf und Modellrechnungen zur Heizrate des CO₂ in der Atmosphäre (DIETZE, 2000) führen zu einem Wert von 3,7 W/m² für den Fall der Verdopplung des CO₂-Gehaltes.

Die Stefan-Boltzmann-Gleichung (Gl. 4) ergibt für Temperatur am Erdboden (15 °C ≅ 288 K) eine Strahlungs-Leistungsdichte von 390 W/m². Fasst man die Differenz zu dem der Strahlungsgleichgewichtstemperatur (-18 °C ≅ 255 K) entsprechenden Wert von 240 W/m² als Auswirkung des Treibhauseffektes (33 K) auf, so errechnet sich die „Erd-Sensitivität“ zu 0,22 K/W·m⁻². Damit ergibt sich für den Fall der Verdoppelung des CO₂-Gehaltes ein Temperaturanstieg von 0,8 K.

Dem im vergangenen Jahrhundert eingetretenen CO₂-Zuwachs von etwa 20% entspräche folglich ein vom anthropogenen CO₂ ausgelöster Temperaturanstieg von nur rund 0,2 K.

Die beiden Temperaturerhöhungen von relativ 0,3% bzw. 0,07% des gegenwärtigen Temperaturmittelwertes (288 K) sind angesichts eingehender Fehler unsicher. Jedenfalls können diese Befunde die aus dem Kyoto-Vertrag resultierenden wirtschaftlichen Belastungen nicht begründen.

4.3. Zum Gegenstrahlungs-Modell

Der Energiehaushalt der Erdatmosphäre ist in Abb. 9 schematisch dargestellt.

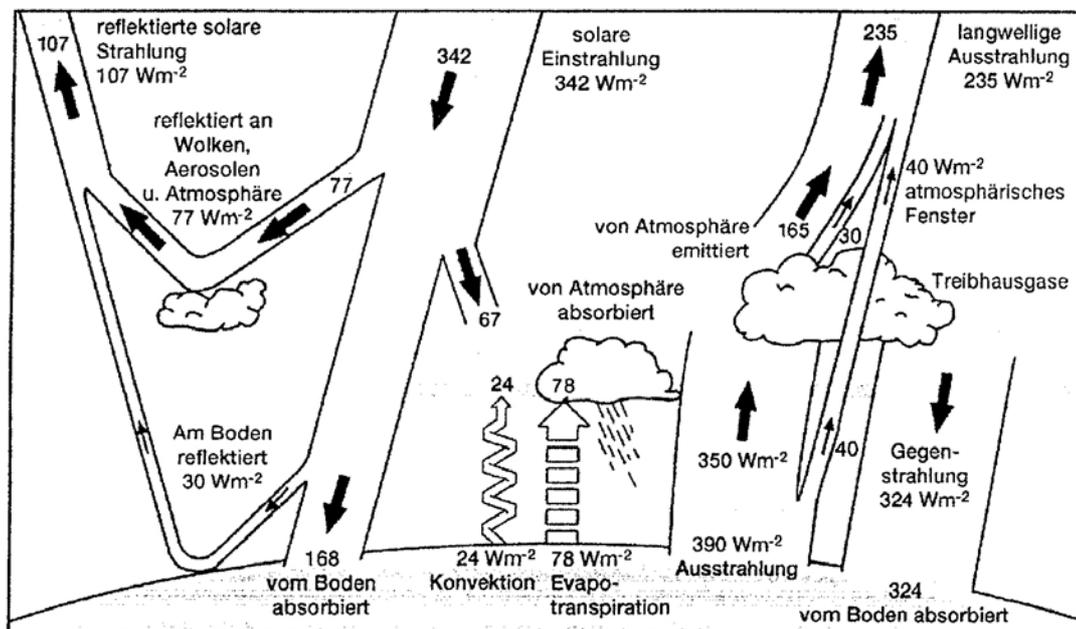


Abb. 9: Globale mittlere Energiebilanz der Erdatmosphäre (nach KIEL und TRENBERTH, 1997)

Eine ähnliche Grafik mit nur wenig modifizierten Einzelwerten findet sich z.B. in (ROEDEL, 2000).

Der solare Input (342 W/m²) verteilt sich auf die Albedo (31 %), die Heizung der Erdoberfläche (49 %) und ca. 20 % der Einstrahlung tragen zur Heizung der Atmosphäre bei. Weitere 102 W/m² gelangen als fühlbare und latente Wärme vom Erdboden aus in die Atmosphäre. Die verbleibenden 66 W/m² tragen zur Wärmestrahlung des Erdbodens bei. Die IR-Abstrahlung der oberen Troposphäre (235 W/m² = Input – Albedo) entspricht der Strahlungsgleichgewichtstemperatur der Erde ($\bar{T}_{Str.} = 255$ K), die sich aus der Beziehung von Stefan und Boltzmann (Gl. 4)

$$P/A = \sigma T^4 \quad (4)$$

mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ (streng gültig für „schwarze“ Strahler) berechnen lässt.

Um die tatsächliche mittlere Temperatur der Erdoberfläche ($\bar{T} = 288 \text{ K} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$) begründen zu können, braucht man nach Gl. 4 am Erdboden eine Leistungsdichte von 390 W/m_E^2 . Diese „erzeugt“ man, indem man eine Gegenstrahlung aus der unteren Troposphäre von 324 W/m_E^2 einführt, zu der die an der Oberfläche der Erde von der solaren Einstrahlung verbliebenen 66 W/m_E^2 zu addieren sind.

Die Begründung dieser „Gegenstrahlung“ führt zu Widersprüchen:

- a. Die Gesamtabstrahlung der Troposphäre ergibt sich incl. Gegenstrahlung zu 519 W/m^2 . Die zugehörige Strahlungstemperatur beträgt nach Gl.4 309 K ($+36 \text{ }^\circ\text{C}$). Die mittlere Temperatur der Troposphäre liegt aber bei nur $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ in den Tropen und $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ in den Polargebieten (ROEDEL, 2000, S. 76).
- b. Erhöht man die Strahlungsleistung des Erdbodens und der Gegenstrahlung um gleiche Beträge, so kann man leicht auch höhere Erdtemperaturen „einstellen“, z.B. mögen jeweils 100 W/m^2 addiert werden: Dann stehen am Erdboden 490 W/m^2 zur Verfügung. Daraus ergäbe sich ein Anstieg der Temperatur der bodennahen Luft auf 305 K ($+32 \text{ }^\circ\text{C}$) ohne jegliche Netto-Energiezufuhr!!

5. Begründung der mittleren Temperatur der Luft an der Erdoberfläche

Grundvoraussetzung für die Herausbildung des Klimas der Erde ist die Existenz von Atmosphäre und Hydrosphäre, insbesondere das Wechselspiel zwischen Ozean und Troposphäre. Während sich die Strahlungsgleichgewichtstemperatur der Atmosphäre modellhaft aus Insolation und Albedo der Atmosphäre nach Stefan und Boltzmann berechnen lässt, hängt die Temperatur der bodennahen Luft mit den Druckverhältnissen in der Atmosphäre zusammen, die sich aus der Masse der Atmosphäre ($m_{\text{At}} = 5,25 \cdot 10^{18} \text{ kg}$), der Größe der Erdoberfläche ($O_E = 5,08 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$) und der Stärke des Gravitationsfeldes der Erde ($g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$) ergeben. Die daraus abgeleiteten Parameter der Atmosphäre sind der Luftdruck an der Erdoberfläche (p_0) und die Skalenhöhe (z_0) der Atmosphäre, für die gilt:

$$p_0 = \frac{m_{\text{At}} \cdot g}{O_E} = 101 \text{ kPa} = 1,01 \text{ bar} . \quad (5)$$

und

$$z_0 = \frac{m_{\text{At}}}{O_E \rho_0} = 7,99 \text{ km}, \quad (6)$$

wobei sich die Dichte der Luft am Erdboden aus der Molmasse von Luft ($0,029 \text{ kg/mol}$) und dem Molvolumen idealer Gase ($0,0224 \text{ m}^3/\text{mol}$) zu $1,29 \text{ kg/m}^3$ errechnet.

Die von der Strahlungsgleichgewichtstemperatur (T_S) der Atmosphäre abweichende globale gemittelte Temperatur der bodennahen Luft (T_0) ist eine Schlüsselgröße der Klimaforschung. Es soll nachfolgend gezeigt werden, wie man die Strahlungs- und Temperaturniveaus der Troposphäre auf der Grundlage satellitengemessener IR-Emissionsspektren der Erde und thermodynamischer Überlegungen verstehen kann.

Den in Abb. 3 dargestellten Emissionsspektren ist im Wellenlängenbereich des Infrarotfensters das Temperaturstrahlungsniveau der bodennahen Luft bzw. des Erdbodens zu entnehmen. Für die Westsahara findet man $310 \dots 320 \text{ K}$ ($40 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$), über Antarktika erkennt man eine schwache Ausstrahlung bei ca. 190 K ($-80 \text{ }^\circ\text{C}$) und über dem Mittelmeer wurde eine kräftige Ausstrahlung gemessen, die zu einer Planck-Temperatur von $280 \dots 290 \text{ K}$ (um $15 \text{ }^\circ\text{C}$) gehört (HANEL et al., 1972, THIEME, 2000). Man „sieht“ also im IR-Fenster um $10 \text{ } \mu\text{m}$ die Strahlungstemperatur der Erdoberfläche.

Daneben befindet sich jenseits von 15 μm ein vom Wasserdampf der Troposphäre emittiertes Spektrum, das über der Sahara zu einer Strahlungstemperatur von 280 K gehört. Dieser Wert liegt um 30...40 K unterhalb der Temperatur des Erdbodens. Folglich entstammt dieses Strahlungsniveau, mit 0,7 K/100 m Temperaturabnahme gerechnet, einer Luftschicht in ca. 5000 m Höhe. Über dem Mittelmeer ist dieses H_2O -Dampfspektrum ebenfalls gemessen worden (THIEME, 2000). Seine Emissionstemperatur von 255 K liegt um 30 K unter der Strahlungstemperatur der Erdoberfläche, woraus ebenfalls auf eine Höhenlage der emittierenden Feuchtschicht um 4000 m zu schließen ist.

Die IR-Emissionsbefunde sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Strahlungsniveaus der Troposphäre

Ebene	Strahler	Höhenlage/m	Temp./ K	$\lambda_{(\text{Max})}/\mu\text{m}$	Anteil/%
Tropopause	IR-Gase	10000	225	12,9	30
Wolken	H_2O -Dampf	4500	255	11,3	50
Erdoberfläche	Gestein	0	288	10,0	20

Der für die Erdoberfläche angegebene Mittelwert ($\overline{T_0} = 288 \text{ K}$) soll nun begründet werden. Dazu werden thermodynamische Zusammenhänge benutzt, die in (THIEME, 2000) ausführlich erörtert werden:

Man geht von einer Erdkugel aus, deren Atmosphäre (wasserfrei) durch eine strahlungsdurchlässige Folie in einer Höhe H begrenzt wird. Ohne Gravitation würde sich eine Luftschicht überall gleicher Dichte ergeben, deren Temperatur genau der Strahlungsgleichgewichtstemperatur ($T_s = 255 \text{ K}$) entspräche, wenn diese Modellerde incl. Atmosphäre rotiert. Nun möge die Gravitationskraft „eingeschaltet“ werden. Infolge der Schwerkraft, die eine Dichte- und Druckzunahme am unteren Rand der Atmosphäre (sowie eine Druckabnahme am oberen Rand, der „Folie“) bewirkt und der Diffusion, die Konzentrationsunterschiede abbaut, stellt sich das durch die barometrische Höhenformel beschriebene vertikale Druckgefälle ein. Der Vorgang entspricht einer adiabatischen Expansion (oben) bzw. einer adiabatischen Kompression im unteren Troposphärenbereich. Es kommt also „oben“ zur Abkühlung und „unten“ zu einer Erwärmung. Der energetische Antrieb zu diesem immerwährenden Prozess ergibt sich durch die solare Energiezustrahlung hauptsächlich in den Tropen und Subtropen. Soweit das Gedankenexperiment.

Die Strahlungsgleichgewichts-Temperatur T_s ist in der Troposphäre in einem Höhenbereich von 4000...5000 m tatsächlich lokalisiert (Tab. 3). Der Druck in diesem Höhenbereich ergibt sich näherungsweise zu

$$p(z) = p_0 \cdot \exp. (-z/z_0). \quad (7)$$

Mit $\bar{z} = 4500 \text{ m}$ und $z_0 = 7,99 \text{ km}$ findet man einen (mittleren) Druck von $p_s = 0,6 \text{ bar}$. Wird nun ein Luftpaket von diesem Druckniveau aufwärts gehoben, so wird es sich adiabatisch abkühlen. Eine Abwärtsbewegung führt also zu einer adiabatischen Kompression, für die gilt:

$$T_0 = T_s \cdot \left(\frac{p_s}{p_0} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}, \quad (8)$$

wobei κ der Adiabatenexponent ist (für Luft: 1,4). Mit $T_s = 255 \text{ K}$, $p_s = 0,6 \text{ bar}$ und $p_0 = 1 \text{ bar}$ errechnet man $T_0 = 295 \text{ K}$. Dieser Temperaturwert kommt der mittleren Temperatur der Erdoberfläche (288 K) schon recht nahe. Wenn genügend viele IR-Emissionsspektren ausgewertet werden können, ist die Höhenlage der zu $T_s = 255 \text{ K}$ gehörenden Feuchteschicht genau be-

stimmbar. Dann kann daraus die für die Erdoberfläche geltende Temperatur \overline{T}_O zuverlässig bestimmt werden (HEBERT, 2004).

Wendet man dieses Verfahren auf die Atmosphäre der Venus an, so verifiziert man als mittlere Temperatur der bodennahen Gas(CO₂)-Schicht $\overline{T}_{OV} \cong 700$ K. Die in die Rechnung eingehenden Daten der Venus (GRAEDEL u. CRUTZEN, 1994) sind $m_V = 5 \cdot 10^{24}$ kg, $r_V = 6049$ km, $O_V = 4,6 \cdot 10^{14}$ m², $g_V = 9,1$ ms⁻², $p_{OV} = 90$ bar, $m_{At,V} = 4,5 \cdot 10^{20}$ kg, $\rho_{OV} = 70$ kg/m³ und $z_{OV} = 14$ km. Die Strahlungsgleichgewichtstemperatur der Venus beträgt bei einer Albedo von 75 % etwa 230 K und wird in einer Höhenlage von 60...70 km (MARSH, 2002) im Bereich von Schwefelsäurewolken angetroffen. Der Atmosphärenereffekt der Venus beträgt folglich 470 K!

Literatur

- ALTENBERND, G. MÖLLER, W. (2004): Energieressourcen und Energiebedarf, Universität Hannover, Zentrum für Didaktik der Technik,
- BARNOLA, J. M.; RAYNAUD, D.; KOROTKEVICH, Y. S.; LORIUS, C. (1987): Historical carbon dioxide record from the Vostok ice core, *Nature*, 329, 408-414
- BECK, E. G. (2003): Biokurs 2003, www.zum.de/Faecher/Materialien/beck/bkurse10.htm und www.biokurs.de und www.biokurs.de/treibhaus/
- BECKMANN, G. und KLOPRIES, B. (1994): Die Antwort der Evolution, *Essener Unikate*, 4/5, Universität Duisburg-Essen
- BOLLE, H. J. (Ed.) (1979): *Remote sounding of the atmosphere from space*, Pergamon Press, Oxford
- CHURCH, J. A.; GREGORY, J. M. (2001): Changes in sea level, Ch. 11, in Houghton, J. T. (Ed.) 2001
- CUBASCH, U.; KASANG, D. (2000): *Anthropogener Klimawandel*, Klett-Perthes-Verlag, Gotha u. Stuttgart, 128 S.
- DEMTRÖDER, W. (2004): *Experimentalphysik*, Bd. 3, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 617 S.
- DIETZE, P. (2000): IPCC's most essential model errors, <http://www.john-daly.com/forcing/moderr.htm>
- DIETZE, P. (2005): CO₂, Klima und Energie, DVD-Video u. pers. Mitt. v. 27.04.2005
- FISHER, H. et al. (1999): Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations, *Science*, 283, 1712-1714
- FLOHN, H. (1981): Klimaänderung als Folge der CO₂-Zunahme?, *Phys. Blätter* 37 (1981) Nr. 7, 184-190
- GOODY, R. M.; YUNG, Y. L. (1995): *Atmospheric Radiation – Theoretical Basis*, Oxford University Press, 544 pp.
- GRAEDEL, T. E.; CRUTZEN, P. J. (1994): *Chemie der Atmosphäre*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 511 S.
- GRASSL, H. (1995): Der veränderte Energiehaushalt der Erde. Globale und regionale Klimaänderung durch den Menschen, *Phys. Bl.*, 51, Nr. 6, 487-492
- HANEL, R. et al. (1972): The NIMBUS 4 infrared spectroscopy experiment, *Journ. Geophys. Res.*, 77, 2629-2641
- HEBERT, D. (2004): *Erdatmosphäre und Klima*, TU Bergakademie Freiberg, *Wiss. Mitt. Inst. Geol.*, Nr. 26, 67 S.
- HOUGHTON, J. T. (Ed.) (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.
- HUG, H.: (1998): Die Klimakatastrophe – ein spektroskopisches Artefakt? 5 S.,

- JAWOROWSKI, Z. (2004): Climate Change: Incorrect information on pre-industrial CO₂, Statement written for the US Senate Committee on Commerce, Science and Transportation
- JAWOROWSKI, Z.; SEGALSTAD, T. V.; HISDAL, V. (1992a): Atmospheric CO₂ and global warming: A critical review, Norwegian Polar Institute, Memoirs, 119, 76 pp.
- JAWOROWSKI, Z.; SEGALSTAD, T. V.; ONO, N. (1992b): Do glaciers tell a true atmospheric CO₂ story? *Science of the Tot. Environm.*, 114, 227-284
- KIEHL, J. T.; TRENBERTH, K. E. (1997): Earth's annual global mean energy budget, *Bull. Am. Met. Soc.*, 78, 197-208
- KONDRATYEV, K. YA., MOSKALENKO, N. J. (1977): Thermal emission of planets, *Gidrometeoizdat*, 263 pp. (Russisch)
- KONDRATYEV, K. YA., MOSKALENKO, N. J. (1984): The role of carbon dioxide and other minor gaseous components and aerosols in the radiation budget, in: Houghton, H. T. (Ed.): *The Global Climate*, Cambridge University Press, Cambridge, 225-233
- KONDRATYEW, K. YA. (1969): *Radiation in the atmosphere*, Academic Press, New York, London
- MARSH, G.E. (2002): A global warming primer, National Policy Analysis, Number 420, National Center for Public Policy research, Washington D. C., USA
- MYHRE, G. et al. (1998): New estimates of radiativ forcing due to well mixed greenhouse gases, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2715-2718
- OESCHGER, H. (1980): In der Natur gespeicherte Geschichte von Umweltvorgängen, S. 209-236, in: Oeschger, H.; Messerli, B.; Svilar, M. (Eds.): *Das Klima*, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 296 S.
- REVELLE, R.; SUESS, H. (1957): Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during past decades, *Tellus*, 9, 18-27
- ROECK, H. (2000): Klima und Politik, *Chem. Techn.* 52, 2, S. 104-112
- ROEDEL, W. (2000): *Physik unserer Umwelt – Die Atmosphäre*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 498 S.
- SCHÖNWIESE, CHR. (1995): *Klimaänderungen*, Springer-Verlag; Berlin - Heidelberg - New York; 224 S.
- SEGALSTAD, T. V. (1998): Carbon cycle modelling and the residence time of natural and anthropogenic atmospheric CO₂: On the construction of the "Greenhouse Effect Global Warming" dogma, in: Bate, R. (Ed.): "Global Warming: The Continuing Debate", ESE-Forum, Cambridge, pp. 184-219
- SIEGENTHALER, U.; OESCHGER, H. (1987): Biospheric CO₂ emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data, *Tellus*, 29B, 140-154
- SLOCUM, G. (1955): Has the amount of carbon dioxide in the atmosphere changed significantly since the beginning of the twentieth century?, *Month. Weather Rev.*, Oct. (1955), 225-231
- THIEME, H. (2000): Der thermodynamische Atmosphäreneffekt, 14 S. in: *Fusion* Nr. 3
- THÜNE, W. (2000): *Der Treibhaus-Schwindel*, Wirtschaftsverlag Discovery Press, Oppenheim, 351 S.
uploader.wuerzburg.de/mm-Physik/klima/artefact.htm
- WAGNER, F. et al. (1999): Century-scale shifts in early holocene atmospheric CO₂ concentrations, *Science*, 284, 1971-1973
www.john-daly.com/zjiceco2.htm
www.zdt.uni-hannover.de/studium/Seminar_energietechnik/2_1Energieumsatz_c.pdf