

Naturwissenschaftliche Rundschau

Kurzmitteilung

Temperaturwerte -18°C und $+33^{\circ}\text{C}$ gehören nicht in Lehrbücher

Viele Lehrbücher machen anhand dieser beiden Zahlenwerte den Treibhauseffekt plausibel. Diese Zahlenwerte sind aber sehr unrealistisch. Es wird kurz dargestellt, wo die Fehler liegen und wie gravierend sie sein können. Diese Werte sollten in Lehrbüchern nicht länger verwendet werden.

Der Treibhauseffekt beruht auf der Berechnung der Globaltemperatur der Erdoberfläche, welche -18°C ergeben soll, aus der Strahlungsbilanz zwischen Sonneneinstrahlung und Wärmeausstrahlung ins Weltall. Das Rechenergebnis von -18°C wird in Schulbüchern [1] und Universitätslehrbüchern [2] genannt. Es wird ergänzt durch Rechenergebnisse des sowjetischen Geophysikers Ya. K. Kondratyev, welche ebenfalls weit verbreitet sind [1], so auch in den Schriften der Bundesregierung [3]. Sie scheinen den Treibhauseffekt perfekt zu beweisen, weil sie die Differenz von $+33^{\circ}\text{C}$ zwischen berechneter (-18°C) und tatsächlicher Globaltemperatur ($+15^{\circ}\text{C}$) mathematisch exakt erklären. Nach Kondratyev sollen die strahlungsaktiven Spurengase der Atmosphäre die Globaltemperatur um folgende Beiträge erhöhen: Wasserdampf $+20,6^{\circ}\text{C}$, Kohlendioxyd $+7,2^{\circ}\text{C}$, Ozon $+2,4^{\circ}\text{C}$, Lachgas $+1,4^{\circ}\text{C}$, Methan $0,8^{\circ}\text{C}$ und alle weiteren Spurengase um $+0,8^{\circ}\text{C}$, so dass sich in Summe die fehlenden $+33^{\circ}\text{C}$ ergeben. So wandelte sich die Hypothese in eine gesichert scheinende physikalische Theorie.

Aber alle genannten Rechenergebnisse sind physikalisch falsch. Und damit entspricht die Hypothese eines natürlichen Treibhauseffektes in dieser Form sicher nicht der Wirklichkeit.

Das Rechenergebnis von -18°C ist deshalb physikalisch falsch, weil die Erdoberfläche bei dieser Rechnung behandelt wird, als sei sie ein "Schwarzer Strahler". Dieses Konzept existiert nur in der Theorie. Es ist so definiert, als absorbiere eine Oberfläche ankommende Strahlung zu 100% und emittiere umgekehrt Wärmestrahlung ebenfalls zu 100% (also Emissionsfaktor = 1). Keine wirkliche Oberfläche verhält sich so. Auf diese Weise wird die Globaltemperatur der Erde wissentlich falsch „so kalt“ berechnet, dass es kälter nicht geht. Wird zum Beispiel mit einem Emissionsfaktor von 0,61 gerechnet, stimmte das Ergebnis exakt mit der wirklichen Globaltemperatur von $+15^{\circ}\text{C}$ überein. Der natürliche Treibhauseffekt hätte sich „in Luft aufgelöst“.

Die Frage nach dem wirklichen Emissionsfaktor der Erdoberfläche ist alles andere als trivial. Die wirklichen thermischen Emissionsfaktoren sind sehr stark materialabhängig. Glatte Metalloberflächen emittieren extrem wenig Wärmestrahlung mit Emissionsfaktoren $<0,01$, d.h. sie emittieren nur 1 Prozent oder noch weniger eines „Schwarzen Strahlers“.

Kürzlich korrigierte die Firma Newport Electronics GmbH (www.omega.de) ihre anwendungstechnischen Tabellen mit Emissionsfaktoren beim Wert für Wasser von 0,67 auf 0,97 [4]. Die Korrektur wurde durch einen anonymen Protest ausgelöst, welcher wiederum ausgelöst wurde durch die Internetveröffentlichung des Rechenergebnisses von $+8^{\circ}\text{C}$ für die Globaltemperatur einer Planetenoberfläche nur

aus Wasser mit dem Emissionsfaktor 0,67. Nicht protestiert wurde gegen den Emissionsfaktor für Erdboden von 0,38, der eine Strahlungsbilanzglobaltemperatur einer „Erde aus Erdboden“ von 52°C liefert.

Fazit: -18°C als naturwissenschaftlich begründete Vorgabe für die Globaltemperatur der Erdoberfläche anzugeben, ist falsch.

Nun zu den Rechenergebnissen von Kondratyev. Die oben genannten Zahlen wurden 1984 im Tagungsband einer Londoner Tagung veröffentlicht [5], also nicht einer wissenschaftlichen Zeitschrift mit ‚Peer Review‘. Wissenschaftliche Literatur über die Art der Berechnung existiert nach Recherchen des Autors nicht. Aus dem Text auf der Buchseite in diesem Tagungsband ergibt sich, dass die Rechnung nur unter Berücksichtigung der Absorptivität der Gase erfolgt sein soll, also ohne Berücksichtigung ihrer Emissivität. Die Rechenergebnisse sind somit keine physikalisch korrekten Strahlungstemperaturbeiträge, weil von vorne herein auf die notwendige Bilanzierung von Einstrahlung und Ausstrahlung verzichtet wurde. Die Temperaturbeiträge von Kondratyev sind unphysikalische Artefakte.

In den Publikationen vor 1984 veröffentlichte Kondratyev Strahlungsbilanztemperaturbeiträge der Spurengase, die zumindest formal korrekt aus Bilanzen von Absorption und Emission berechnet wurden. Formal korrekt gerechnet zeigen Wasserdampf und Kohlendioxid in der Atmosphäre eine Kühlwirkung von -4°C am Boden [6]. Das bedeutet, dass die Oberflächentemperatur der Erde ohne Spurengase in der Atmosphäre +19°C betragen könnte, was einer globalen Emissivität von ca. 58% entspräche. Eine solche Emissivität in der Mitte der Emissivitäten wirklicher Materialien [4] zwischen 1% und 90% ist nicht gerade unwahrscheinlich in Anbetracht der materiellen Vielfalt der Erdoberfläche.

Die genannten Rechenfehler sind trivial. Um so erstaunlicher ist es, wie unkritisch viele Lehrbuchautoren diese Fehler übernommen haben. Noch viel erstaunlicher ist aber, dass die thermodynamischen Zustandgleichungen der Materie bei der Globaltemperaturberechnung nicht berücksichtigt werden. Der thermodynamische Zustand der Materie ist aber entscheidend für die Temperaturverhältnisse im Inneren von Materie, die so massereich ist, dass sie einen messbaren Gravitationsdruck aufgebaut hat.

Ein Planet in der Tiefe des Weltalls fernab jeder Sonne sollte ganz sicher eine Oberflächentemperatur von ca. 4K haben, also Weltraumkälte. Die Gravitationskraft in seinem Innern verursacht einen nach innen zunehmenden Druck. Nach der thermodynamischen Zustandgleichung seiner Materie steigen damit die Temperaturen im Inneren mit zunehmenden Drucken immer weiter an. Deshalb ist das Erdinnere „glutflüssig“, und die Erde behält ihre „Glutflüssigkeit“ im Innern auch dann noch, wenn die Sonne in Milliarden Jahren nicht mehr strahlen sollte. [7]

Der Anstieg der Temperatur mit dem Gravitationsdruck gilt auch im Fall reiner Gasplaneten wie dem Jupiter. Dieser vergleichsweise sonnenferne Riesenplanet erreicht in seinem Inneren mindestens 20 000 K ([7], Seite 517). Und im Fall unserer Sonne muss die Gravitationskraft vor Milliarden Jahren so hohe Innentemperaturen erzeugt haben, dass bei >100 Mio K die Kernfusion „zündete“.

Die Oberfläche der Erde liegt zwar nur unter einer Gasatmosphäre von ca. 1 bar Luftdruck. Doch auch dieses 1 bar entspricht einer zugehörigen „Zustandstemperatur“, die nicht einfach vernachlässigt werden darf. Die Globaltemperatur der Erdoberfläche ist die Summe aus „Zustandstemperatur“ und Strahlungsbilanztemperatur. Diese „Temperatur des physikalischen Zustandes“ ist

auch maßgebend für die vergleichsweise hohe Temperatur auf der Venusoberfläche unter einem Atmosphärendruck von 90 bar [8].

Eigentlich kennt jeder „Bildungsbürger“ die Temperatureffekte des „physikalischen Zustandes“ auf unserer Erde. Jeder Bergsteiger kennt die Regel, dass mit 100 m Höhe die Lufttemperatur um ca. $-0,6^{\circ}\text{C}$ abnimmt und jeder Bergmann weiß, dass pro 33 m Tiefe die Bodentemperatur um ca. $+1^{\circ}\text{C}$ zunimmt. Die Gravitationskraft, damit der Druck und damit wiederum die Temperatur nehmen nach oben ab und nach unten zu. Diesen Zusammenhang beschreiben die „Zustandsgleichungen der Materie“. Sie sind Lehrinhalt im Fach Wärmelehre bzw. Thermodynamik, betreffen aber auch Planeten ([7], Seiten 448 ff.: „Zustandsgleichung für planetare Materie“)

Fazit. Die beiden falschen Rechengänge zu den -18°C (als Lehrbuchvorgabe für die Globaltemperatur ohne Treibhauseffekt) und zu den $+33^{\circ}\text{C}$ (als Lehrbuchvorgabe für den Treibhauseffekt) sollten mit wissenschaftlicher Sorgfalt richtig gestellt werden. Die im Titel genannten falschen Zahlenwerte sollten in Lehrbüchern nicht länger verwendet werden.

Dr. rer. nat. Gerhard Stehlik, Diplomchemiker, Hanau

Literaturverzeichnis

[1] Erhart Kemnitz: Chemie (Gymnasium Sekundarstufe 2), Verlag Duden Paetec GmbH, Berlin 2005, Seite 503

[2] Helmut Kraus: Die Atmosphäre der Erde – Eine Einführung in Meteorologie, Springer-Verlag, Berlin 2001 (ISBN 3-540-41844-X), Seite 125

[3] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Herausforderung Klimawandel, Berlin 2003, Seite 16

[4] <http://www.omega.de/pdf/ir-book/ti1008.pdf> (auf der Homepage der Firma Newport Electronics GmbH, Daimlerstraße 26, 75392 Deckenpfronn, unter den Überschriften: „Literaturübersicht - Technische Informationen – IR-Messtechnik - Emissionsfaktor-Tabellen für metallische und nicht-metallische Werkstoffe.) Die frühere Tabelle mit dem Wert 0,67 für Wasser ist dort nicht mehr verfügbar. Sie kann aber noch auf der Homepage des Autors eingesehen werden: http://gerhard.stehlik-online.de/Mailanhaenge/Emissionsvermoegen_Tabelle_Materialien_Omega_070115.pdf

[5] Houghton, John T.: The Global Climate, Verlag Cambridge University Press, Cambridge (UK) 1985, Seite 226 (Konferenzbeitrag: K.Ya. Kondratyev and N.I. Moskaleno; The role of carbon dioxide and other minor gaseous components and aerosols in the radiation budget)

[6] K.Ya. Kondratyev: Radiation in the Atmosphere, Verlag Academic Press Inc., New York 1969, Seite 805 und [dto.](#): Radiation Processes in the Atmosphere, Verlag der WMO (WMO – No. 309), Genf 1972, Seite 202

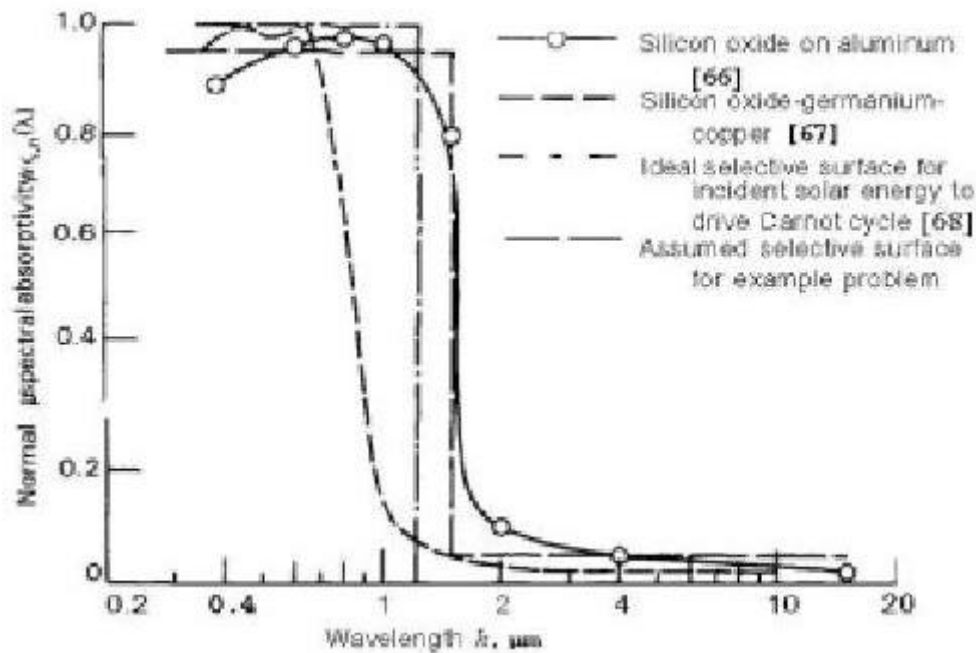
[7] Bergmann-Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7, Erde und Planeten, Verlag Walter de Gruyter & Co., Berlin 2001, Seite 694 „Aggregatzustand: äußerer Kern = flüssig“, Seite 517, Seiten 448 ff.: „Zustandsgleichung für planetare Materie“)

[8] Andrew P. Ingersoll: Venus: Express dispatches, Nature 450, 617, Fig. 1

Ergänzende Literatur:

Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik – Chemie – Astronomie – Geophysik und Technik, IV. Band „Technik“, 4. Teil „Wärmetechnik“, Bandteil b „Thermodynamische Eigenschaften“, 4922 „Wärmeübertragung“, 492292 „Emission der Wärmestrahlung von festen Oberflächen“, 1972 Berlin

Siegel, Robert; Howell, John R: Thermal Radiation Heat Transfer, 1992 Washington, ISBN: 0-07-057316-6 (Besonders informativ sind die Seiten 166 – 167 mit „Figure 5-29 - Characteristics of some spectrally selective surfaces“



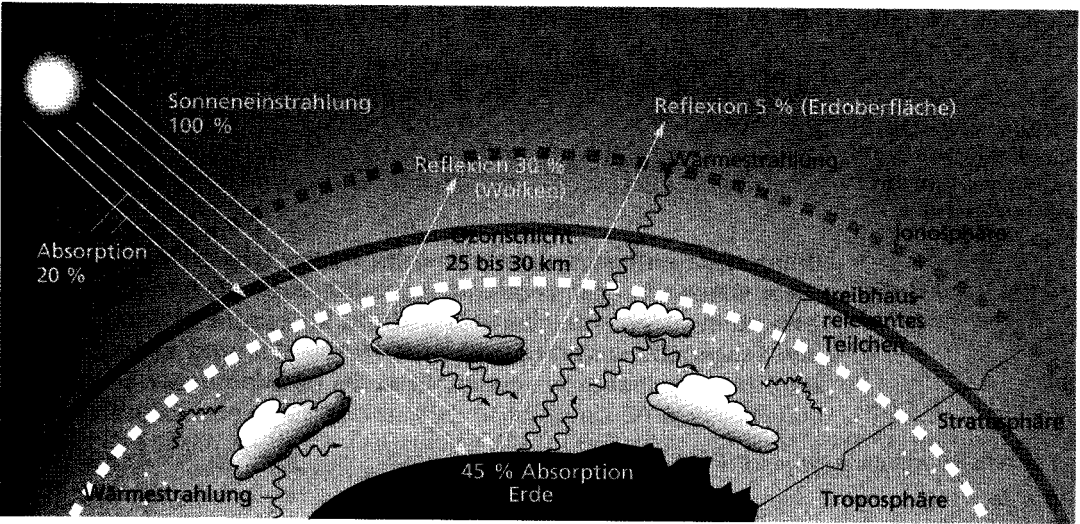
und der dazu gehörenden Tabelle:

Cutoff wavelength	Equilibrium temperature
μm	$^{\circ}\text{C}$
0.6	1811
0.8	1523
1.0	1334
1.2	1210
1.5	1041
	393

Sie nennt Strahlungsgleichgewichtstemperaturen unterschiedlicher technischer Oberflächen von Materialien für solarthermische Anlagen. Ein andauernd von der Sonne beschienener Körper, dessen Absorptionsfaktor identisch ist mit seinem Emissionsfaktor (Zeile: ? 8) hat eine Oberflächentemperatur von ca. 120°C (393 K), was in etwa der Oberflächentemperatur der Sonnenseite des Mondes entspricht.)

Die Kernaussagen der zitierten Literatur [1] bis [8] folgen auf den Folgeseiten.

Kemnitz_Simon_Duden_Chemie_Oberstufe_2005



Die Sonnenstrahlung umfasst den Wellenlängenbereich von 200 bis 3000 nm. Kurzwelliges UV-Licht ($\lambda < 300$ nm) wird in der Stratosphäre fast vollständig absorbiert. Langwelliges UV- und sichtbares Licht können die Atmosphäre dagegen passieren. Diese Strahlung erwärmt die Erdoberfläche und wird hauptsächlich als Wärmestrahlung im Infrarotbereich ($\lambda > 750$ nm) wieder reflektiert. Die IR-Strahlung wird in der Atmosphäre von einigen Spurengasen, z. B. Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan teilweise absorbiert. Daraus resultiert eine Erwärmung der Erde um ca. 33 K, die als **natürlicher Treibhauseffekt** bezeichnet wird.

Gase, die infrarote Strahlung absorbieren und so die Luft erwärmen, nennt man Treibhausgase. Ohne die natürlichen Treibhausgase in der Atmosphäre würde die mittlere Oberflächentemperatur der Erde nur -18 °C betragen.

Die Erwärmung der unteren Atmosphäre infolge Energieabsorption durch klimarelevante Spurengase nennt man **Treibhauseffekt**.

Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe ist jedoch der Kohlenstoffkreislauf (S. 499) gestört. Die Konzentration an CO_2 in der Atmosphäre hat sich in den letzten 100 Jahren um ca. 25 % erhöht. Die Konzentration anderer **Treibhausgase** in der Luft hat sich durch den Menschen verursachte Einflüsse ebenfalls erhöht, z. B. hat sich die CH_4 -Konzentration im gleichen Zeitraum etwa verdoppelt. Dadurch wird mehr IR-Strahlung in der Atmosphäre absorbiert und der natürliche Treibhauseffekt anthropogen verstärkt.

Da sich die Emissionen von Treibhausgasen fortsetzen, steigen damit auch ihre atmosphärischen Konzentrationen künftig weiter an. Zudem haben einige anthropogene Treibhausgase wie die Halogenkohlenwasserstoffe eine viel stärkere Wirkung als z. B. CO_2 . Somit ist eine weitere globale Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten vorprogrammiert.



Der Name Treibhauseffekt ist abgeleitet vom Treibhaus, in diesem ist das Glas durchlässig für eingestrahltetes sichtbares Licht, aber undurchlässig für reflektierte IR-Strahlung.

Der Anstieg der globalen Jahresdurchschnittstemperatur um ca. 0,7 °C in den letzten 100 Jahren wird als anthropogene Verstärkung des Treibhauseffektes angesehen.

dem Empfänger-Querschnitt πR_{Erde}^2 einen Strahlungsfluß $I_K \cdot \pi R_{\text{Erde}}^2$. Bezieht man diesen Strahlungsfluß auf die gesamte Erdoberfläche, dann ergibt sich als globales Mittel der extraterrestrischen Strahlungsflußdichte

$$I_K \frac{\pi R_{\text{Erde}}^2}{4\pi R_{\text{Erde}}^2} = \frac{I_K}{4}$$

D. Die Strahlungsgleichgewichtstemperatur der Erde

Der **energetische** Austausch zwischen Erde und Weltraum findet nur durch die Strahlungsflüsse statt. Soll die Temperatur der Erde dabei konstant bleiben, die Erde sich **also** weder erwärmen noch abkühlen, dann müssen sich hinausgehende und hereinkommende Strahlung genau kompensieren.

Wir beschreiben dies mit Hilfe des **Begriffs der Strahlungsbilanz Q** , den wir zunächst ganz allgemein definieren als die **resultierende Strahlungsflußdichte** einer (wirklichen oder gedachten) Bezugsfläche:

$$Q = Q_{\downarrow} - Q_{\uparrow} \quad \text{mit} \quad Q_{\downarrow} = \text{gesamte Strahlungsflußdichte von oben (positiv definit)} \\ \text{und} \quad Q_{\uparrow} = \text{gesamte Strahlungsflußdichte von unten (positiv definit)}$$

In dem hier vorliegenden Problem betrachten wir die extraterrestrische Strahlungsbilanz im globalen Mittel und benutzen zur Kennzeichnung den Index (ex, gm). Mit

a = Albedo = Reflexionsvermögen für solare Strahlung und

a_g = **globale Albedo** = global repräsentativer Wert der Albedo extraterrestrisch betrachtet gilt:

$$Q_{\downarrow, \text{ex, gm}} = \frac{I_K}{4} \quad Q_{\uparrow, \text{ex, gm}} = \sigma T_{\text{Erde}}^4 \quad \frac{1}{4} I_K + a$$

$$\text{Mit} \quad Q_{\text{ex, gm}} = 0 \quad \text{ist} \quad Q_{\downarrow, \text{ex, gm}} - Q_{\uparrow, \text{ex, gm}}$$

$$\text{und} \quad \frac{I_K}{4} - \sigma T_{\text{Erde}}^4 + a_g \frac{I_K}{4} \quad \text{oder} \quad \sigma T_{\text{Erde}}^4 = (1 - a_g) \frac{I_K}{4}$$

$$\text{Fall 1: } a_g = 0 \quad \rightarrow \quad \sigma T_{\text{Erde}}^4 = I_K/4 = 343 \text{ W/m}^2 \quad \rightarrow \quad T_{\text{Erde}} = 279 \text{ K} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Fall 2: } a_g = 30\% \quad \rightarrow \quad \sigma T_{\text{Erde}}^4 = 0,7 \cdot I_K/4 = 240 \text{ W/m}^2 \quad \rightarrow \quad T_{\text{Erde}} = 255 \text{ K} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$$

Das sind die entsprechenden **Gleichgewichtstemperaturen** oder **effektiven Strahlungstemperaturen** des Systems Erde-Atmosphäre, also Strahlungsgrößen als Aussage über die von der Erde in den Weltraum gehende Strahlungsflußdichte σT_{Erde}^4 . Sie werden angegeben als Temperatur. Wir können uns aber auch fragen, **an welcher Fläche oder in welcher Höhe** diese Temperaturen im globalen Mittel auftreten.



DER TREIBHAUSEFFEKT, KLIMAWIRKUNG VON GASEN UND AEROSOLEN

Von entscheidender klimatischer Bedeutung bei den Strahlungsvorgängen in der Atmosphäre ist, dass die langwellige Wärmestrahlung der erwärmten Erdoberfläche die Atmosphäre größtenteils nicht auf direktem Wege verlässt, sondern von atmosphärischen Spurengasen, den natürlichen Treibhausgasen, und von Wolken zunächst teilweise absorbiert wird. Spurengase und Wolken emittieren diese Energie einerseits in den Weltraum und andererseits in Richtung Erdoberfläche zurück, die dadurch zusätzlich aufgeheizt wird. Der auf diese Weise hervorgerufene Wärmestau in der unteren Atmosphäre bewirkt einen Temperatureffekt von $+33^\circ\text{C}$ bzw. eine Erwärmung von -18°C (bei Annahme einer Atmosphäre ohne Wolken und Spurengase) auf $+15^\circ\text{C}$ und ermöglicht damit überhaupt erst Leben auf der Erde. In Anlehnung an das Garten-Treibhaus bezeichnet man den Wärmestau in der unteren Atmosphäre als „Treibhauseffekt“.

Die eigentlichen Verursacher des Treibhauseffekts sind eine Reihe von Spurengasen wie Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), Ozon (O_3) u.a., deren Anteil an der Gesamtmasse der Atmosphäre zusammen weniger als 1% ausmacht. Diese Treibhausgase lassen die kurzwellige Solarstrahlung weitgehend passieren, absorbieren aber die langwellige Wärmestrahlung der Erdoberfläche im Infrarotbereich in

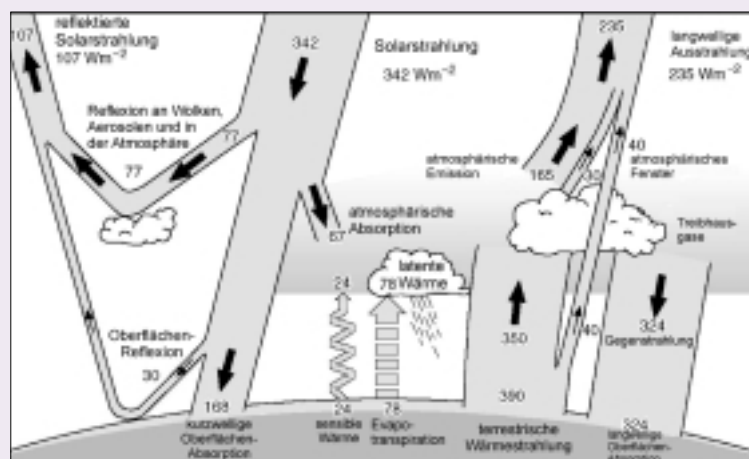


Abbildung 3

Mechanismus des Treibhauseffekts

(Quelle: IPCC, Third Assessment Report, 2001)

Tabelle 2 Beitrag von natürlichen Spurengasen der Atmosphäre zum natürlichen Treibhauseffekt

Treibhausgas	Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt [%]
Wasserdampf (H_2O)	62
Kohlendioxid (CO_2)	22
Ozon, bodennah (O_3)	7
Distickstoffoxid (N_2O)	4
Methan (CH_4)	2,5
andere	2,5

Quelle: Kondratyev und Moskalkenko (1984)

Wellenlängenbereichen ab etwa $3\ \mu\text{m}$. Dabei absorbieren die einzelnen Spurengase in unterschiedlichen Absorptionsbanden.

Das wichtigste natürliche Treibhausgas ist Wasserdampf, das für fast zwei Drittel des natürlichen Treibhauseffekts verantwortlich ist. Es absorbiert in breiten Spektralbereichen um $3\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$ nahezu vollständig. Es lässt aber in anderen Wellenlängenbereichen wie um $4\ \mu\text{m}$ und um $10\ \mu\text{m}$ die Infrarotstrahlung nahezu ganz passieren. In diesen Spektren setzen die anderen Treibhausgase an. So absorbiert das zweitwichtigste natürliche Treibhausgas, das Kohlendioxid, gerade

Beton			
Rauh	0 bis 1090	0,94	
Ziegel, unbehandelt	1370 bis 2760	0,62	
		bis 0,63	
Ziegel, braun	1370 bis 2760	0,83	
		bis 0,87	
Ziegel, schwarz	1370 bis 2760	0,91	
		bis 0,94	
Bleimennige	100	0,93	
Bronzefarbe	niedrig	0,34	
		bis 0,80	
Dolomitskalk	20	0,41	
Eis, glatt	0	0,97	
Eis, rau	0	0,98	
Erde			
Erde allgemein	40	0,38	
Dunkler Lehmboden	20	0,66	
Gepflügtes Feld	20	0,38	
Farben			
Blau, Cu ₂ O ₃	25	0,94	
Schwarz, CuO	25	0,96	
Grün, Cu ₂ O ₃	25	0,92	
Rot, Fe ₂ O ₃	25	0,91	
Weiß, Al ₂ O ₃	25	0,94	
Weiß, Y ₂ O ₃	25	0,90	
Weiß, ZnO	25	0,95	
Weiß, MgCO ₃	25	0,91	
Weiß, ZrO ₂	25	0,95	
Weiß, ThO ₂	25	0,90	
Weiß, MgO	25	0,91	
Weiß, PbCO ₃	25	0,93	
Weiß, PbO	25	0,90	
Weiß, PbCrO ₄	25	0,93	
Gips	20	0,80	
		bis 0,90	
Glimmer	40	0,75	
Glas			
Planes Flachglas	0 bis 90	0,92	
		bis 0,94	
Convex D	100	0,80	
Convex D	315	0,80	
Convex D	500	0,76	
Nonex	100	0,82	
Nonex	315	0,82	
Nonex	500	0,78	

Aluminium auf Meibler	430 bis 1090	0,95	
		bis 0,45	
Porzellan	20	0,92	
Steingut, glasiert	20	0,90	
Steingut, matt	20	0,93	
Zirkonia auf Inconel	430 bis 1090	0,62	
		bis 0,45	
Kies	40	0,28	
Kohlenstoff			
Flammruß	25	0,95	
Nicht oxidiert	25	0,81	
Nicht oxidiert	100	0,81	
Nicht oxidiert	500	0,79	
Kerzenruß	120	0,95	
Fasern	260	0,95	
Graphitiert	100	0,76	
Graphitiert	300	0,75	
Graphitiert	500	0,71	
Lack			
Blau, auf Aluminium-Folie	40	0,78	
Gelb, 2 Schichten auf Alum-Folie	40	0,79	
Klar, 2 Schichten auf Alum-Folie	90	0,09	
Klar, auf hellem Kupfer	90	0,65	
Klar, auf angelaufenem Kupfer	90	0,64	
Rot, 2 Schichten auf Alu-Folie	40	0,74	
Schwarz	90	0,96	
Weiß	90	0,95	
Weiß, 2 Schichten auf Alu-Folie	40	0,88	
Lehm	20	0,39	
– gebrannt	70	0,91	
Schiefer	20	0,69	
Ziegel, hellrot	1370 bis 2760	0,32	
		bis 0,34	
Ziegel, rot	1370 bis 2760	0,40	
		bis 0,51	
Ziegel, dunkelviolett	1370 bis 2760	0,78	
Leinöl			
Auf Aluminiumfolie, unbeschichtet	120	0,09	
Auf Aluminiumfolie, 1 Schicht	120	0,56	
Auf Aluminiumfolie, 2 Schichten	120	0,51	
Auf poliertem Eisen, 0,02 mm	40	0,22	
Auf poliertem Eisen, 0,05 mm	40	0,45	
Auf poliertem Eisen, 0,10 mm	40	0,65	
Auf poliertem Eisen, starke Schicht	40	0,83	
Marmor, weiß	40	0,95	
Glatt, weiß,	40	0,56	
Poliert, grau	40	0,75	

Quartzglas			
1,98 mm	280	0,90	
1,98 mm	840	0,41	
6,88 mm	280	0,93	
6,88 mm	840	0,68	
Opakglas	300	0,92	
Opakglas	840	0,68	
Ruß			
Azetylen	25	0,97	
Kampfer	25	0,94	
Kerzen	120	0,95	
Kohle	20	0,95	
Sand	20	0,76	
Sandstein	40	0,67	
Sägemehl	20	0,75	
Schiefer	20	0,69	
Schnee			
Fein	-7	0,82	
Große Flocken	-8	0,89	
Schmirgel	80	0,86	
Seide	20	0,78	
Siliziumkarbid	150 bis 650	0,83	
		bis 0,96	
Wasser	40	0,67	
Wasserglas	20	0,96	
Zellstoffkleber, 2 Schichten	20	0,34	
Ziegel			
Kalksandstein	1370 bis 2760	0,59	
		bis 0,63	
Luftgetrocknet	20	0,90	
Rot, rau	20	0,93	
Schamottsteine	1370	0,75	

2007

Beton		
Rauh	0 bis 1090	0,94
Ziegel, unbehandelt	1370 bis 2760	0,62
		bis 0,63
Ziegel, braun	1370 bis 2760	0,83
		bis 0,87
Ziegel, schwarz	1370 bis 2760	0,91
		bis 0,94
Bleimennige	100	0,93
Bronzefarbe	niedrig	0,34
		bis 0,80
Dolomitkalk	20	0,41
Eis, glatt	0	0,97
Eis, rauh	0	0,98
Erde		
Erde allgemein	40	0,38
Dunkler Lehmboden	20	0,66
Gepflühtes Feld	20	0,38
Farben		
Blau, Cu ₂ O ₃	25	0,94
Schwarz, CuO	25	0,96
Grün, Cu ₂ O ₃	25	0,92
Rot, Fe ₂ O ₃	25	0,91
Weiß, Al ₂ O ₃	25	0,94
Weiß, Y ₂ O ₃	25	0,90
Weiß, ZnO	25	0,95
Weiß, MgCO ₃	25	0,91
Weiß, ZrO ₂	25	0,95
Weiß, ThO ₂	25	0,90
Weiß, MgO	25	0,91
Weiß, PbCO ₃	25	0,93
Weiß, PbO	25	0,90
Weiß, PbCrO ₄	25	0,93
Gips	20	0,80
		bis 0,90
Glimmer	40	0,75
Glas		
Planes Flachglas	0 bis 90	0,92
		bis 0,94
Convex D	100	0,80
Convex D	315	0,80
Convex D	500	0,76
Nonex	100	0,82
Nonex	315	0,82
Nonex	500	0,78

Porzellan	20	bis 0,45
Steingut, glasiert	20	0,90
Steingut, matt	20	0,93
Zirkonia auf Inconel	430 bis 1090	0,62
		bis 0,45
Kies	40	0,28
Kohlenstoff		
Flammruß	25	0,95
Nicht oxidiert	25	0,81
Nicht oxidiert	100	0,81
Nicht oxidiert	500	0,79
Kerzenruß	120	0,95
Fasern	260	0,95
Graphitiert	100	0,76
Graphitiert	300	0,75
Graphitiert	500	0,71
Lack		
Blau, auf Aluminium-Folie	40	0,78
Gelb, 2 Schichten auf Alum-Folie	40	0,79
Klar, 2 Schichten auf Alum-Folie	90	0,09
Klar, auf hellem Kupfer	90	0,65
Klar, auf angelaufenem Kupfer	90	0,64
Rot, 2 Schichten auf Alu-Folie	40	0,74
Schwarz	90	0,96
Weiß	90	0,95
Weiß, 2 Schichten auf Alu-Folie	40	0,88
Lehm	20	0,39
- gebrannt	70	0,91
Schiefer	20	0,69
Ziegel, hellrot	1370 bis 2760	0,32
		bis 0,34
Ziegel, rot	1370 bis 2760	0,40
		bis 0,51
Ziegel, dunkelviolet	1370 bis 2760	0,78
Leinöl		
Auf Aluminiumfolie, unbeschichtet	120	0,09
Auf Aluminiumfolie, 1 Schicht	120	0,56
Auf Aluminiumfolie, 2 Schichten	120	0,51
Auf poliertem Eisen, 0,02 mm	40	0,22
Auf poliertem Eisen, 0,05 mm	40	0,45
Auf poliertem Eisen, 0,10 mm	40	0,65
Auf poliertem Eisen, starke Schicht	40	0,83
Marmor, weiß	40	0,95
Glatt, weiß,	40	0,56
Poliert, grau	40	0,75

Quartzglas		
1,98 mm	280	0,90
1,98 mm	840	0,41
6,88 mm	280	0,93
6,88 mm	840	0,68
Opakglas	300	0,92
Opakglas	840	0,68
Ruß		
Azetylen	25	0,97
Kampfer	25	0,94
Kerzen	120	0,95
Kohle	20	0,95
Sand	20	0,76
Sandstein	40	0,67
Sägemehl	20	0,75
Schiefer	20	0,69
Schnee		
Fein	-7	0,82
Grobe Flocken	-8	0,89
Schmirgel	80	0,86
Seide	20	0,78
Siliziumkarbid	150 bis 650	0,83
		bis 0,96
Wasser	40	0,97
Wasserglas	20	0,96
Zellstoffkleber, 2 Schichten	20	0,34
Ziegel		
Kalksandstein	1370 bis 2760	0,59
		bis 0,63
Luftgetrocknet	20	0,90
Rot, rauh	20	0,93
Schamottsteine	1370	0,75

2008

The globally averaged thermal emission of the planet is characterised by the equilibrium temperature, T_e . In the absence of interior heat sources, the average value of T_r is the equilibrium temperature, T_e which is determined from the balance averaged over the planet between the absorbed solar energy and outgoing thermal emission, i.e.

$$T_e = [q_0 (1 - A)/4\sigma]^{1/4}, \quad (13.3)$$

where q_0 is the solar constant for the planet and A is its total albedo.

Calculations of the atmospheric greenhouse effect are presented below. For these calculations the absorption of radiation by atmospheric gases was deduced both from the results of complex measurements of absorption spectra and from direct line-by-line calculations, taking account of the fine structure of the absorption spectra [11]. Optical characteristics of atmospheric aerosols and cloudiness (spectral coefficients of absorption, scattering, and phase function) have been calculated for models of aerosol distributions, both with regard to the chemical composition and the multi-modal size distribution of the aerosol [13, 22].

At present, the radiative regime of the cloudless atmosphere is mainly determined by its water vapour, carbon dioxide, ozone and aerosol, the effect of water vapour in the greenhouse effect being most important.

In between the main absorption bands of CO₂, H₂O and O₃ are 'window' regions where the atmosphere is partially transparent. The most important 'window region' situated near the peak of the black-body curve at terrestrial temperatures is in the region 8–13 μm in wavelength, where continuous absorption due to water vapour occurs and also where absorption bands of minor constituents such as NH₃ and the freons occur. Although these gases are only present in very small quantities, the absorption bands lead to a noticeable greenhouse effect.

Many processes taking place in the atmosphere are mutually correlated. For instance, an increase in tropospheric temperature is followed by increased water content. The major absorbing components – carbon dioxide and water vapour – exhibit a strong temperature dependence of their spectral transmission functions,

and with growing temperature their absorptivity strongly increases. Thus, a rise in the temperature of the troposphere and the surface is followed by intensification of the greenhouse effect mechanism [13].

Calculations show that for a standard model atmosphere, the total greenhouse effect amounts to 33.2 K, with the following contributions from optically active gaseous components: H₂O - 20.6 K; CO₂ - 7.2 K; N₂O - 1.4 K; CH₄ - 0.8 K; O₃ - 2.4 K; NH₃ + freons + NO₂ + CCl₄ + O₂ + N₂ - 0.8 K.

13.2

Evolution of the greenhouse effect in the earth's atmosphere

It is of interest to follow the evolution of the greenhouse effect and climate on the earth, by modelling the process of radiative heat exchange at different stages of the evolution of the atmosphere's chemical composition.

For these calculations, the data on the vertical ozone profile have been taken from Hart [5], Morss & Kuhn [18], and the vertical profiles for NH₃ have been drawn from the data on photochemical reactions [12]. The vertical profiles of water vapour concentration have been inferred from that of temperature on the assumption that the atmospheric relative humidity does not exceed 50% at $T_s > 298$ K. Pressure-induced absorption by CO₂, O₃, N₂, NH₃ were taken from the data of Kondratyev *et al.* [13].

In the early stage of the earth's evolution, its atmosphere contained a large amount of methane and other hydrocarbons reaching 106 atm cm per vertical column. The measurement data of Moskalenko & Parzhin (see [11]) obtained with a multi-path cell with an optical path up to 1 km, have been used in calculations of the spectral transmission functions for such amounts of hydrocarbons. All the absorption bands for methane in the 0.1–25 μm region have been taken into account in calculations.

The mean-global temperature T_s of the planetary surface and the globally averaged greenhouse effect ΔT are given in Table 13.1 for the models of the chemical composition of the atmosphere given in the same table. According to these models and assuming no variation in the solar constant, the earth's surface was considerably warmer at various stages in its evolution than it is currently, largely due to the increased greenhouse effect arising from substantial

Table 13.1. Evolution of the greenhouse effect, ΔT , of the earth's atmosphere from the moment of the planet's formation

Time, 109years	0	0.2	0.8	1	2	2.5	3.5	4	4.50	5b
A	0.15	0.5	0.53	0.53	0.43	0.25	0.29	0.28	0.3	0.33
T_e (K)	235	216	218	219	225	246	253	258	256	253
$C(O_2)$	0	0	.24	.23	.22	.21	0.04	0.05	0.2	0.33
$C(N_2)$	0.03	0.1	0.04	0.04	0.40	0.95	0.95	0.95	0.78	0.65
$C(NH_3)$.35	.14	.34	.254	.34	.56	.257	.28	.19	.39
$C(CO_2)$	0.9	0.5	0.1	0.08	0.04	0.02	.52	.12	.323	.322
$C(CH_4)$	0.05	0.4	0.83	0.85	0.57	.22	1.5	.184	.135	.135
$W_{\perp}(O_3)$ (atm cm)	0	0	.36	.34	.33	.32	.31	0.17	0.3-0.56	0.15
$C(N_2O)$	0	0	0	0	0	.17	.18	.26	.36	.66
$C(CO)$	0	0	.33	.83	.43	.23	.34	.85	.15	.14
$W_{\perp}(H_2O)$ (g/cm ²)	2	8.1	22	16	7.1	2	1.4	1.2	1.4	4
P_s (atm)	0.4	1	1.4	1.32	0.73	0.75	0.78	0.8	1	1.18
T_s (K)	296	318	336	328	316	298	288	285	282	306
ΔT (K)	63	102	116	109	91	52	35	27	32	53

.24 stands for 0.2×10^{-4} C is the volume concentration; W_{\perp} is the content of a component in vertical air column; P_s and T_s are the surface pressure and temperature; T_e is the effective temperature of the planet.

(a) Conditions as at present.

(b) A hypothetical model, 5, corrected for possible anthropogenic effect.

Kurve b: Absorption - Erwärmung

Kurve c: Emission - Kühlung

Kurve e: Gesamtbilanz

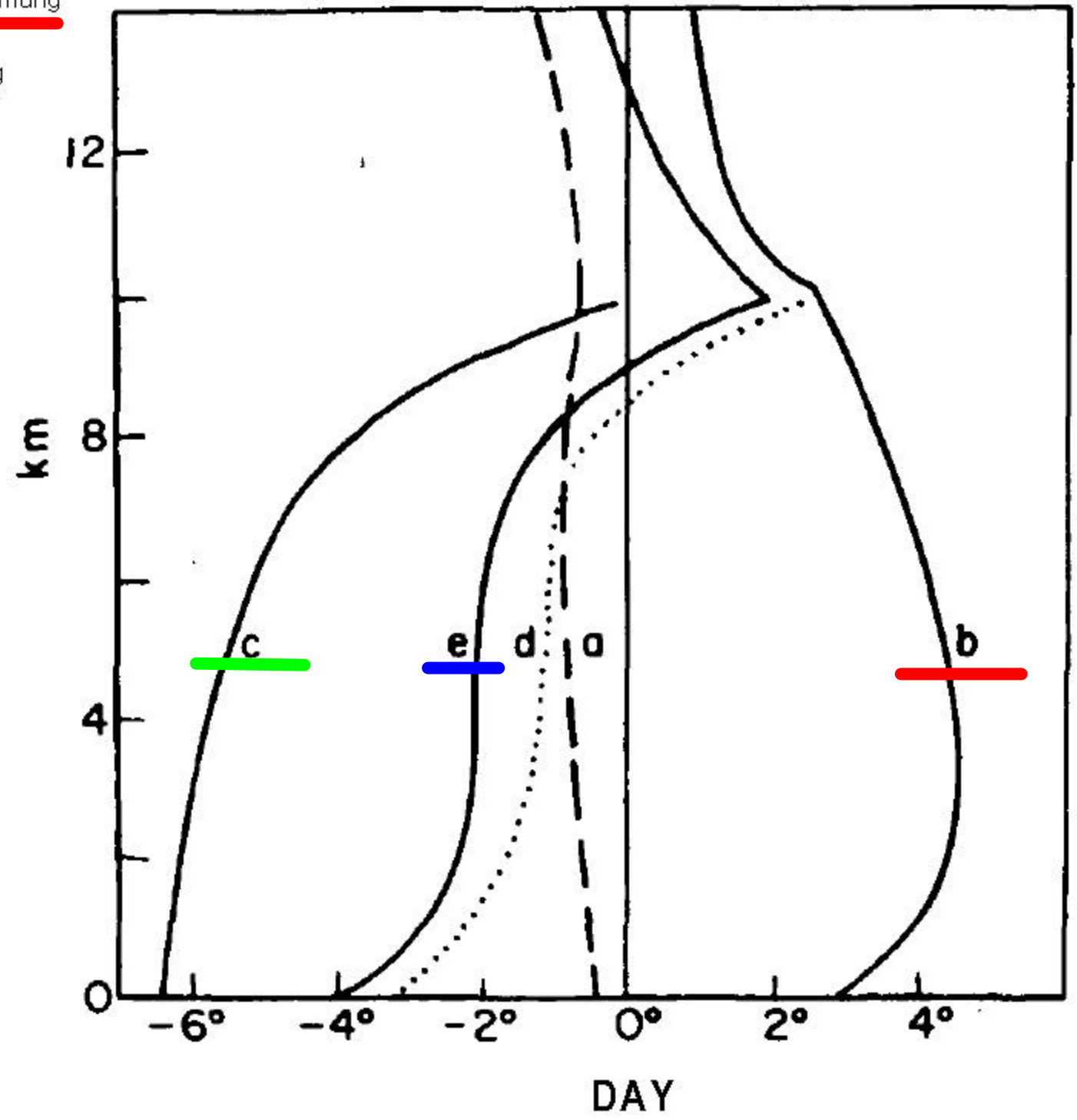


FIG. 11.4 Radiative cooling at different levels in the atmosphere.

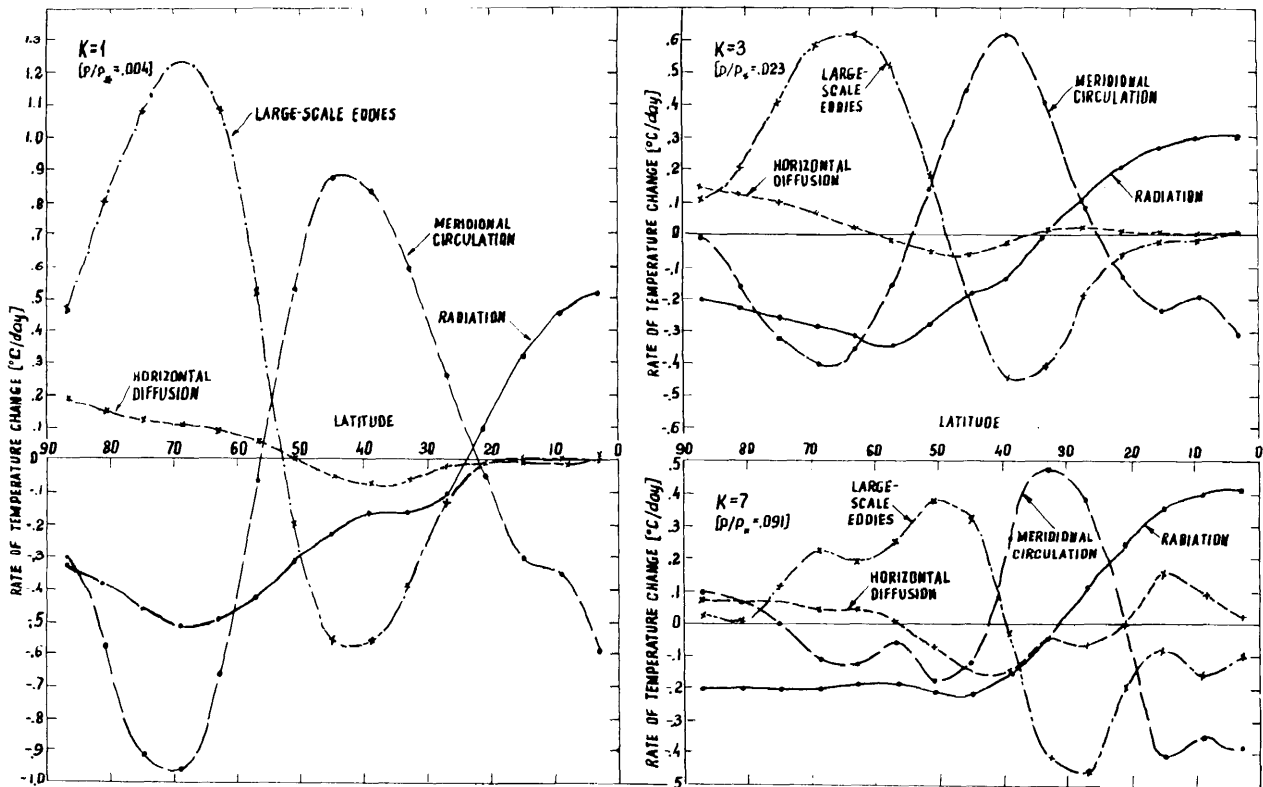


Figure 5.20 — The variation with latitude of the various heat-balance Components at different heights in the stratosphere (After Manabe and Hunt, 1968)

the radiative flux divergence not only does not maintain but actually favours the destruction of the observed latitudinal temperature gradient in the stratosphere (in winter the maximum of the stratospheric temperature occurs in middle latitudes, and in summer at the pole), since in middle and high latitudes radiative cooling is observed. If, however, dynamical factors are taken into consideration, it is easy to discover the sources of heat for the stratosphere of middle and high latitudes.

Figure 5.20 clearly shows that in the tropics the radiative source of heat is compensated by the sink due to the transfer of heat by the meridional circulation to the subtropical latitudes (not by way of direct exchange, since heating in the subtropics is caused by descending motions). The adiabatic heating of the air in the subtropics is a source for the transfer of heat to the middle and high latitudes by large-scale vortices originating in the troposphere.

The latitudinal temperature gradient decreases with height: the temperature maximum disappears in middle latitudes, and a monotonous temperature fall from the equator to the pole is observed. This picture is very well accounted for by the results of Manabe and Strickler (1964), according to which in the middle stratosphere radiative factors dominate the dynamic factors. At first sight, this contradicts the data of Figure 5.20. Actually, there is no paradox at all: it should be remembered that the total radiative temperature changes at the level $\frac{p}{p_*} = 0.004$ (Figure 5.20) are a small difference between the two much larger components of radiative cooling and heating which completely “suppress” the other components of the thermal balance and control the temperature field. The gradual transition to the zone where radiation dominates is determined by the increasing role of solar radiation absorption by ozone. **The long-wave radiation of carbon dioxide is the factor of cooling.**

Radialbereiche des Erdkörpers

Name	Radialbereich (R_1 – R_2)	Dichte (g cm^{-3})	Aggregatzustand
Kruste	1 – 0.997	2.7 – 2.9	fest, starr
Mantel	0.997 – 0.55	3.3 – 5.6	fest, unter starker Belastung zähflüssig
äußerer Kern	0.55 – 0.2	10.0 – 12.1	flüssig
innerer Kern	0.2 – 0	12.7 – 13.0	fest

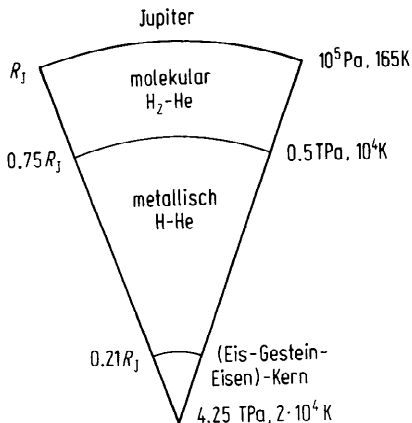


Abb. 5.43 Schalenaufbau des Jupiter nach [33].

Zustandsgleichungen. Zur Beschreibung der Dichteänderungen durch Kompression und thermische Ausdehnung werden Zustandsgleichungen für planetare Materie benötigt, die die Änderung der Dichte als Funktion von Druck- und Temperaturänderungen beschreiben. In allgemeiner, impliziter Form lautet die Zustandsgleichung

$$F(P, T, \rho) = 0 \quad (5.22)$$

wobei P den Druck, T die Temperatur und ρ die Dichte bezeichnen. (In der Planetenphysik wählt man meist die Dichte anstelle des spezifischen Volumens als Zustandsvariable.) Eine vielfach verwendete explizite Form der Zustandsgleichung ist

$$P(\rho, T) = P(\rho)|_T + P(T)|_\rho. \quad (5.23)$$

In dieser Form ist der Druck die abhängige Zustandsvariable und die Druckänderung wird in einen isothermen und einen isochoren Anteil zerlegt.

Andrew P. Ingersoll: "Venus Express dispatches", Nature 450, 617-618 (29 November 2007), Fig. 1

