Internationale Zeitschrift für moderne Physik B
©World Scientific Publishing Company

arXiv:2004.00708v2 [physics.ao-ph] 5. August 2020

Sättigung der Infrarotabsorption durch Kohlendioxid in der Atmosphäre

DIETER SCHILDKNECHT

Fakultät für Physik, Universität Bielefeld D-33501 Bielefeld, Deutschland
schild@physik.uni-bielefeld.de

Eingegangen am Tag Monat Jahr
Überarbeitet am Tag Monat Jahr

Basierend auf neuen numerischen Bewertungen des Strahlungstransfers überprüfen wir eine von Schack 1972 vorgebrachte These, wonach die Sättigung der Absorption von Infrarotstrahlung durch Kohlendioxid in der Atmosphäre einsetzt, sobald die relative Konzentration von Kohlendioxid eine Untergrenze von etwa 300 ppm überschreitet. Wir liefern eine prägnante, kurze und anschauliche Darstellung des Treibhauseffekts der Erdatmosphäre. Wir ermitteln eine Gleichgewichts-Klimasensitivität (Temperaturanstieg ΔT aufgrund einer Verdopplung der atmosphärischen CO_2-Konzentration) von $\Delta T \simeq 0{,}5^0\,C$. Wir gehen näher auf die Konsistenz dieser Ergebnisse zu ΔT mit den Ergebnissen, die durch satellitengestützte Messungen des kurzfristigen Strahlungsfluss im Vergleich zu Änderungen der Oberflächentemperatur.

Schlüsselwörter: Treibhauseffekt; Strahlungstransfer; Gleichgewichtsklima.

1. Einleitung

Angesichts der umfangreichen Literatur über die Auswirkungen eines (anthropogenen) Anstiegs der relativen Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre auf das Klima der Erde ist es angebracht, ein einfaches Argument zu diesem Thema wieder aufzugreifen, das Schack[1] 1972 vorgebracht hat. Der dreiseitige Artikel, der in deutscher Sprache in der Zeitschrift der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, damals „Physikalische Blätter" genannt, unter dem Titel „Der Einfluß des Kohlendioxid-Gehalts der Luft auf das Klima der Welt" erschien. Der Autor Schack, ein Experte für Wärmeübertragung in Verbrennungsanlagen, hatte 1923 die Rolle entdeckt, die die Wechselwirkung von infraroter elektromagnetischer Strahlung mit Kohlendioxid ($_{CO_2}$)und Wasserdampf ($_{H_2O}$) in solchen Anlagen spielt[2].

Die Intensität von (monochromatischer) Strahlung, die ein absorbierendes Medium durchquert, nimmt gemäß dem sogenannten Lambert-Beer-Gesetz exponentiell mit der Entfernung ab

$$I(z) = I(z=0)e^{-\kappa z}\,. \tag{1.1}$$

Unabhängig vom numerischen Wert der Absorptionskonstante κ in (1.1) gilt für ausreichend große Entfernungen z der Grenzwert der „vollständigen Absorption" oder der Intensität Null

der ausgehenden Strahlung, $I(z \to \infty) \to 0$, erreicht wird. Für endliche Werte des Exponenten $-\kappa z$ in (1.1) bestimmt der numerische Wert von κ den Abstand $z_{(\varrho)}(\kappa)$ für die „annähernde Sättigung", $\exp(-\kappa z_{(\varrho)}(\kappa)) = \varrho \ll 1$, oder gleichbedeutend, die „fast vollständige Absorption",

$$\frac{I(z=0) - I(z=z_\varrho(\kappa))}{I(z=0)} = 1 - \frac{I(z=z_\varrho(\kappa))}{I(z=0)} = 1-\varrho. \tag{1.2}$$

Im Fall von CO_2 in der Luft hängt die Breitbandabsorptionskonstante κ für die infrarote elektromagnetische Strahlung von der Konzentration oder dem Partialdruck des CO_2 ab, und es stellt sich natürlich die Frage, welche CO_2 -Konzentration zu einer annähernden Sättigung in der Troposphäre der Erde führt.

In seinem Artikel[1] von 1972 weist Schack darauf hin, dass bei einer Konzentration von 0,03 % Kohlendioxid in der Luft eine annähernde Sättigung innerhalb einer Entfernung erreicht wird, die ungefähr der Höhe der Troposphäre entspricht. Die Absorption erreicht Werte nahe 100 % bei einem realistischen CO_2-Gehalt von 0,03 %. Daraus wird geschlossen[1], dass ein weiterer Anstieg des (anthropogenen) CO_2 nicht zu einer nennenswert stärkeren Absorption von Strahlung führen und somit das Erdklima nicht beeinflussen kann.

Es ist sinnvoll, das von Schack vorgebrachte Argument im Detail zu erläutern, um die Einfachheit und Allgemeingültigkeit der zugrunde liegenden Konzepte, die zu einer parameterfreien Vorhersage der Absorption von Infrarotstrahlung durch CO_2 führen, deutlich zu machen. Unter Anwendung des Planckschen Strahlungsgesetzes für eine von Schack mit T = 293 K gewählte Temperatur an der Erdoberfläche und unter Berücksichtigung des bekannten Absorptionsspektrums des $CO_{(2)}$-Moleküls stellt man fest, dass die Strahlung mit Wellenlängen $\lambda_{(CO)(2)}$ im Intervall $13\ \mu m \leq \lambda_{CO_2} \leq 17{,}6\ \mu m$ für die Absorption durch CO_2 relevant ist. Die Gesamtabsorption durch CO_2 in der Atmosphäre wird durch die Gesamtmasse des $CO_{(2)}$, das von einem Infrarotstrahl auf seinem Weg von der Oberfläche bei $z = 0$ zum oberen Ende der Atmosphäre oder $z \to \infty$ durchquert wird.

Im Gravitationsfeld der Erde nimmt der Druck p eines Gases mit zunehmender Höhe z gemäß $dp = -\rho g\, dz$ ab, wobei ρ die Dichte des Gases und g die Erdbeschleunigung bezeichnet. Für ein ideales Gas der Temperatur T gilt mit $p = \rho RT/M$ oder $\rho = pM/RT$, wobei R die Gaskonstante, T die absolute Temperatur und M das Molekulargewicht des Gases ist. Die Gesamtmasse pro Flächeneinheit, die ein Infrarotstrahl auf seinem Weg durch die Atmosphäre durchquert, wird durch eine Integration über die Dichte $\rho(p, T)$ von der Oberfläche bis zum oberen Ende der Troposphäre bestimmt. Das Ergebnis der Integration kann als effektive Höhe $z_{(0)}$ einer fiktiven Atmosphäre mit homogenem konstantem Druck $p_{(0)}$, konstanter Temperatur T und konstanter Dichte ρ dargestellt werden. Der Wert von $z_{(0)}$ hängt (natürlich) davon ab, ob die Atmosphäre isotherm behandelt oder, was realistischer ist, adiabatisch beschrieben wird.

Unter der Annahme T = const entspricht die Abnahme des Drucks mit zunehmender Höhe

$$p(z) = p_0 \exp\left[-\frac{Mg}{RT} z\right], \tag{1.3}$$

was die bekannte barometrische Formel ist. Die Dichte $\rho = \rho(z)$ nimmt entsprechend ab, da

$$\rho(z) = \frac{M}{RT} p_0 \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right) \equiv \rho_0 \exp\left(-\frac{(z)}{z_0}\right), \tag{1.4}$$

wo

$$z_0 = \frac{RT}{Mg} \tag{1.5}$$

bezeichnet die Skalenhöhe der Atmosphäre, die Höhe einer fiktiven Atmosphäre mit homogenem Druck p_0 , Temperatur T und Dichte ρ_0 sowie einer Masse pro Flächeneinheit M_0 , die aus (1.4) erhalten wird.

$$M_0 \equiv \int_0^\infty \rho(z)dz = \rho_0 z_0 = \frac{Mp_0}{RT} z_0. \tag{1.6}$$

Die Bestimmung der Absorption der Atmosphäre reduziert sich dementsprechend auf die Bewertung der Absorption durch ein Gasrohr der Länge z_0 aus (1.5), das homogen mit Luft gefüllt ist, und mit CO_2 mit einem Partialdruck $p_0 \equiv p_{CO_2}$ bei einem Gesamtdruck von 1 atm bei einer Temperatur $T = 293\ K$.

Für den realistischen Fall einer adiabatisch behandelten Atmosphäre bleibt die Beziehung (1.6) mit einem entsprechend gewählten Wert von z_0 gültig, der sich von (1.5) unterscheidet. In unserem Ansatz in Abschnitt 2 wird der Wert von z_0 aus der Höhenabhängigkeit der Absorption von Infrarotstrahlung für eine gegebene Temperaturabnahme in der Atmosphäre bestimmt.

Die Absorption aufgrund von (1.1) bei Einführung der Abhängigkeit von CO_2 Konzentration über den Partialdruck p_{CO_2} , wird

$$A(p_{CO_2}, z_0) = 1 - \exp(-ap_{CO_2} z_0), \tag{1.7}$$

wobei der Koeffizient a aus dem bekannten Absorptionsspektrum von CO_2 bestimmt werden muss. Da der Absorptionsquerschnitt von CO_2 von der Wellenlänge der absorbierten Strahlung abhängt, entwickelt die Absorptionskonstante a in (1.7), die durch Summierung über ein Spektrum einer großen Anzahl von Spektrallinien erhalten wird, tatsächlich eine Abhängigkeit vom Partialdruck p_{CO_2} .

Tabelle 1. Die Ergebnisse in den ersten vier Zeilen stammen aus Ref. [1] , die Ergebnisse in der letzten Zeile wurden anhand von (1.7) berechnet.

CO_2 [%]	0,03 %	0,06 %	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta_{2\times CO_2}$ [Wm^{-2}]
$p_{CO_2} z_0$ [$atm \times m$]	2,1	4,2		
A [%]	98,5	99,3	0,8 %	0,70
1 - A [%]	1,5	0,7		
a[$(atm \times m)^{-1}$]	2,0	1,73		

In seinem Artikel[1], in dem er sich mit der Frage nach den Auswirkungen eines Anstiegs der CO_2-Konzentration auf das Klima der Erde befasst, vergleicht Schack die Absorption durch CO_2 , durch ein CO_2-Luftrohr, wie erwähnt, für einen Partialdruck, der einem realistischen Wert entspricht

Wert von 300 ppm = 0,03 % mit der Absorption aufgrund eines erhöhten Wertes von 600 ppm = 0,06 % [a], jeweils entsprechend $p_{CO_2} = 3\times10^{-4}$ atm und $p_{CO_2} = 6\times10^{(-4)}$atm bei T = 293 K und einem Gesamtdruck der Atmosphäre von 1 atm. Unter Annahme von $z_0 = 7000\ m$ für die äquivalente Höhe der Troposphäre, für die Absorption A [%] und die Zunahme der Absorption, $\Delta_{2\times CO_2}$, erhält Schack die in Tabelle 1 angegebenen Ergebnisse.

Sättigung der Infrarotstrahlung durch den realistischen CO_2-Gehalt der Atmosphäre von 0,03 % innerhalb von ca. 1 % gemäß Tabelle 1 erreicht ist, führt ein weiterer Anstieg des CO_2-Gehalts nicht zu einer wesentlichen Erhöhung der Strahlungsabsorption und hat somit keinen Einfluss[1] auf das Klima auf der Erde.

Die Ergebnisse zu $\Delta_{2\times CO_2}$ [%] in Tabelle 1 beziehen sich auf die Strahlung im CO_2-Band von $13\ \mu m < \tilde{\lambda}_{CO_2} < 17{,}6\ \mu m$ ($568\ cm^{-1} < 1/\tilde{\lambda}_{CO_2} < 769\ cm^{-1}$). Unter der Annahme einer Schwarzkörperstrahlung bei $T = 293\ K$ beträgt die Eingangsstrahlung im CO_2 Band $87\ W/m^2$. Die zusätzliche Absorption aufgrund der Verdopplung von CO_2 ergibt sich aus $\Delta_{2\times CO_2} \times 87\ W/m^2 = 0{,}8\times10^{-2} \times 87\ W/m = 0{,}70\ W/m$, wie in Tabelle 1 aufgeführt. Dies Die Zunahme der Absorption von Infrarotstrahlung in der Atmosphäre ist in der Tat vernachlässigbar im Vergleich zum Gleichgewichtswert der gesamten ausgehenden langwelligen Infrarotstrahlung (LWIR) an der Obergrenze der Atmosphäre (TOA), gegeben durch $S_0 = 239 W/m^2$. [b]

2. Absorption von Infrarotstrahlung: CO_2-Luftleitung im Vergleich zur Atmosphäre

Anhand der derzeit verfügbaren detaillierten Daten zu den spektralen Absorptionslinien von CO_2, compare[5], lassen sich der Absorptionskoeffizient [c] a und die daraus resultierende Absorption durch ein zuvor definiertes CO_2-Luftrohr zuverlässig vorhersagen. In diesem Abschnitt vergleichen wir die Ergebnisse zur Absorption durch ein $CO(_2)$-Luftrohr bei fester Temperatur und festem Druck als Funktion der Länge des $CO(_2)$-Luftrohrs mit der Absorption durch eine adiabatisch behandelte Atmosphäre. Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus einer aktuellen Auswertung von Clark[7] nur für das Molekül $(^{12})\,C(^{16})\,0_{(2)}$ mit Linienstärken $> 10(^{-})\,^{(23)}$. Weitere Details finden Sie in Anhang A.

Die Ergebnisse[7] für die Absorption einer CO_2-Luftleitung für den Spektralbereich von $13\ \mu m < \tilde{\lambda}_{CO_2} < 17{,}6\ \mu m$ (568 cm^{-1} bis 769 cm^{-1}), als Funktion ausgewählter Werte der Weglänge (Rohrlänge) und den relevanten CO_2-Konzentrationen von 0,03 % und 0,06 % sind in Tabelle 2 aufgeführt. Es wird angenommen, dass das Rohr eine konstante Temperatur von $T = 293\ K$ und einen Gesamtdruck von $p = 1\ atm$ hat. Die eingehende Infrarotstrahlung des schwarzen Körpers bei $T = 293\ K$ ergibt sich dementsprechend zu $87\ Wm^{-2}$. Die Ergebnisse in Tabelle 2

[a] Ein realistischer Wert für den Anstieg der CO_2-Konzentration pro Jahr beträgt 2 ppm/Jahr, d. h. 3, was bedeutet, dass es 150 Jahre dauert, bis sich die CO_2-Konzentration von 300 ppm verdoppelt.

[b] Der bekannte empirische Wert der Sonnenstrahlung von 1365 W/m^2 bei einem Albedo von 0,3 ergibt 9 56 W/m^2 Absorption. Durch Division durch 4 zur Berücksichtigung der Erdoberfläche ergibt sich der Durchschnittswert der Sonnenstrahlung, der durch die ausgehende durchschnittliche LWIR von $S_0 = 239\ W/m^2$. [4] Eine 1%ige Abnahme der Albedo auf $\varrho = 0{,}297$ ergibt $S_0 = 240 W/m^2$, das .

[c] Vergleiche z. B. Ref. [6] für eine aktuelle Bewertung der Absorptionskoeffizienten

-Luftrohr-Absorption A und Anstieg $\Delta_{2\times CO_2}$ für ausgewählte Weglängen und CO_2 -Konzentrationen für das Spektrum Bereich 568 bis 769 cm^{-1} (Eingangsstrahlung des schwarzen Körpers 87 Wm^{-2}) und $T = 293\ K, p = 1\ atm$. Vergleiche Anhang A Tabelle A2.

	A 300 ppm	A 600 ppm	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta_{2\times CO}$ [Wm^{-2}]
1 km	0,63	0,71	8	7,00
2 km	0,71	0,78	7 %	6,09
3 km	0,75	0,82	7 %	6,09
5 km	0,81	0,87	6 %	5,22
7 km	0,84	0,89	5 %	4,35

Tabelle 3. Wie Tabelle 2, jedoch für den Spektralbereich von 600 cm^{-1} bis 750 cm^{-1} (Eingangsstrahlung des schwarzen Körpers 65 Wm^{-2}). Vergleiche Anhang A Tabelle A3.

	A 300 ppm	A 600 ppm	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta_{2\times CO}$ [Wm^{-2}]
1 km	0,79	0,87	8	5,20
2 km	0,87	0,93	6 %	3,90
3 km	0,91	0,96	5 %	3,25
5 km	0,95	0,98	3 %	1,95
7 km	0,97	0,99	2 %	1,30

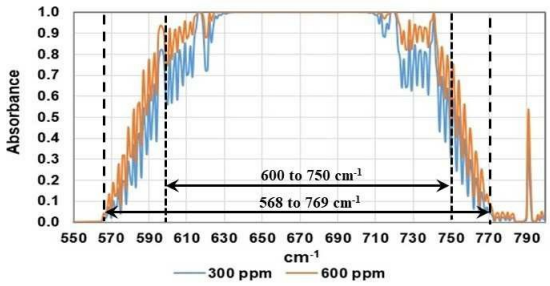


Abb. 1: Die Absorption von 0,03 % und 0,06 % CO_2-Konzentrationen in trockener Luft bei 293 K für eine 3 km lange CO_2-Luftleitung. Die Spektralbereiche von 568 bis 769 $cm^{(-)\,(1)}$ und 600 bis 750 $cm^{(-)\,(1)}$, die bei den Berechnungen der Absorptionsbanden verwendet wurden, sind angegeben. Die Berechnung $^{(7)}$ wurde bei einer spektralen Auflösung von 0,01 $cm^{(-)\,(1)}$ durchgeführt aber die Daten sind bei 1 $cm^{(-)\,(1)}$ aufgetragen.

Zeigen Sie explizit den erwarteten Anstieg der Absorption A mit zunehmender Rohrlänge (Weglänge) sowie den Rückgang der relativen Absorption bei einer Verdopplung$_{\text{des}}$ $CO_{(2)}$-$_{\text{Gehalts}}$, $\Delta_{2\times CO_2}$ [%]. Das Ergebnis von $\Delta_{(2)\,(\times)\,(CO)\,(2)} = 5$ % bei einer Rohrlänge von 7 km ist erheblich größer als das Ergebnis von $\Delta_{(2)\,(\times)\,(CO)\,(2)} = 0{,}8$ % aus dem Jahr 1972, das in Tabelle 1 angegeben ist. In Tabelle 3 zeigen wir zur Veranschaulichung den Effekt der Beschränkung des Spektralbereichs der eingegebenen Schwarzkörperstrahlung auf den Spektralbereich von 600 $cm^{(-)\,(1)}$ bis 750 $cm^{(-)\,(1)}$ (Gesamt-Schwarzkörperstrahlung 65 $Wm^{(-)\,(2)}$). Beim Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 3 mit denen in Tabelle 2 fällt auf, dass mit zunehmender Weglänge der Infrarotstrahlung eine schnellere Annäherung an eine (größere) asymptotische Absorptionsgrenze erfolgt. Dies ist eine Folge

der Änderung der Absorption als Funktion der spektralen Wellenlänge berücksichtigt.

In Abb. 1 zeigen wir das berechnete Spektrum der Absorption für den Fall einer Weglänge von 3 km und einer CO_2-Konzentration von 0,03 % und 0,06 %. Die den Tabellen 2 und 3 entsprechenden Spektralbereiche sind in Abb. 1 angegeben.

Wir gehen von einer festen Temperatur T in der CO_2-Luftleitung zu *einer* abnehmenden *Temperatur* T und einem abnehmenden Druck p in der Atmosphäre über und gehen dabei in zwei Schritten vor. In einem ersten Schritt modellieren wir e i n e trockene Atmosphäre und betrachten die Wirkung von $CO(_2)$ (in Konzentrationen von 0,03 % und 0,06 %), und in einem zweiten Schritt fügen wir Wasserdampf mit einer festen relativen Luftfeuchtigkeit (RH) hinzu, die mit $RH =$ 85 % gewählt wurde.

Tabelle 4. Höhenabhängigkeit der Infrarotabsorption A durch die Atmosphäre für ausgewählte Höhen und CO_2-Konzentrationen für den Spektralbereich von 568 bis 769 cm^{-1}(Eingangsstrahlung des schwarzen Körpers 87 Wm^{-2}). Die Oberflächentemperatur und der Oberflächendruck betragen T = 293 K und p = 1 atm,
und die für die Atmosphäre angenommene Temperaturabnahme beträgt $-6{,}5\ ^0 Ckm^{-1}$. Vergleiche Anhang A Tabelle A4.

	A 300 ppm	A 600 ppm	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta_{2\times CO}$ [Wm^{-2}]
Atm 5 km	0,74	0,81	7 %	6,09
Atm 9 km	0,76	0,83	7	6,09
Atm 11 km	0,76	0,83	7	6,09

Tabelle 5. Wie Tabelle 4, jedoch für einen Spektralbereich von 600 bis 750 cm^{-1} (Eingangsstrahlung des schwarzen Körpers 65 Wm^{-2}). Vergleiche Anhang A Tabelle A4.

	A 300 ppm	A 600 ppm	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta_{2\times CO}$ ^{2}[Wm^{-2}]
Atm 5 km	0,90	0,95	5	3,25
Atm 9 km	0,91	0,96	5 %	3,25
Atm 11 km	0,91	0,96	5	3,25

In Tabelle 4 zeigen wir die Ergebnisse für die Absorption A der Atmosphäre in mehreren ausgewählten Höhen für einen CO_2-Gehalt von 0,03 % und 0,06 %. Der Spektralbereich des LWIR von 568 $cm(^{-})\ ^{(1)}$ bis 769 $cm(^{-})\ ^{(1)}$ ist identisch mit dem Spektralbereich, der für die Ergebnisse in Tabelle 2 verwendet wurde. Die Bewertung der Absorption wurde für eine Oberflächentemperatur von T = 293 K und einen Oberflächendruck p = *1 atm* sowie eine realistische feuchte adiabatische Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe und einen Durchschnittswert durchgeführt.
von $-6{,}5\ ^0 C\ km^{-1}$ wurde verwendet (vergleiche Anhang A, Abb. A6). Das Absorptionsspektrum bei einer Auflösung von 0,01 cm^{-1} wurde unter Verwendung einer räumlichen Auflösung von 100 m berechnet. Das Absorptionsspektrum für jede 100-m-Ebene wurde unter Verwendung des aus der Temperaturabnahme abgeleiteten Drucks und der Temperatur für diese Ebene berechnet. Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen eine schnelle Konvergenz zu einem annähernd konstanten, quasi-asymptotischen Verhalten der Absorption A, das oberhalb einer Höhe von etwa 5 km erreicht wird. Durch

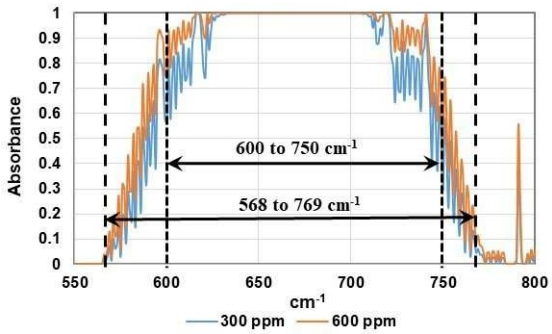


Abb. 2. Die Absorption von 0,03 % und 0,06 % CO_2-Konzentrationen in einer trockenen Atmosphäre für eine vertikale Weglänge von der Oberfläche bis zu einer Höhe von 7 km. Die Oberflächentemperatur beträgt 293 K. Die Temperaturabnahme beträgt - 6,5 K km(⁻) (1) und die räumliche Auflösung beträgt 100 m. Die Berechnung (7) wurde mit einer spektralen Auflösung von 0,01 cm(⁻) (1) durchgeführt aber die Daten sind mit einer Auflösung von 1 cm(⁻) (1) dargestellt.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 4 mit denen in Tabelle 2 schließen wir, dass eine CO_2-Luftleitung mit einer gewählten Länge von 2 bis 3 km die Absorption der Atmosphäre darstellt, die in Höhen von etwa 5 km eine quasi-asymptotische Grenze erreicht. Die Werte der Absorption und der Anstieg der Absorption bei einer Verdopplung des CO_2-Gehalts um

$\Delta_{2\times CO_2}$ = 7 % entsprechend $6\ Wm^{-2}$ in den Tabellen 2 und 4 stimmen mit . Ähnliche Schlussfolgerungen lassen sich aus dem Vergleich der Ergebnisse für den eingeschränkten Spektralbereich in den Tabellen 3 und 5 miteinander ziehen.

In Abb. 2 zeigen wir die Absorption der Oberflächenemission bei 293 K von 300 und 600 ppm CO_2 für die trockene Atmosphäre, gesehen aus einer Höhe von 7 km. Der gesamte Spektralbereich reicht von 550 bis 800 cm^{-1} und die Spektralintervalle sind angegeben. Diese sind identisch mit denen in Abb. 1. Die spektrale Auflösung der Berechnung betrug 0,01 $cm(^{-})$ (1) bei einer räumlichen Auflösung von 100 m. Die spektrale Auflösung der Darstellung beträgt jedoch 1 $cm(^{-})$ (1) .Dieses Spektrum berücksichtigt die Auswirkungen des mit der Höhe abnehmenden Temperaturs und Drucks, wie in Anhang A , Abb. A6 dargestellt. In diesem Fall findet der größte Teil der Absorption in der Nähe der Oberfläche statt, und der Wert der Gesamtabsorption tendiert mit zunehmender Höhe zu einem asymptotischen Wert. Dies ist in Anhang A, Abb. A4 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die CO_2 -Luftleitung mit einer Weglänge von etwa 3 km die Absorption in der Atmosphäre einer quasi-asymptotischen Höhe von 5 km darstellt.

Die wichtige Rolle von Wasserdampf – semiquantitativ diskutiert in Ref. [1] – ist
Dies wird durch einen Vergleich der Ergebnisse in den Tabellen 4 und 5 mit den Ergebnissen in den Tabellen 6 und 7 veranschaulicht. Die Ergebnisse in den Tabellen 6 und 7 berücksichtigen neben CO_2 auch Wasserdampf mit einer relativen Luftfeuchtigkeit (RH) von RH = 85 %. Das Vorhandensein von Wasserdampf verringert(d) die Auswirkung einer Verdopplung der $CO(_2)$ -Konzentration von 6,09 $Wm(^{-})$ (2) drastisch.

[d] Beachten Sie, dass (offensichtlich) das Vorhandensein von Wasserdampf die Absorption von Strahlung erhöht. Das p s Vorhandensein von Wasserdampf verringert jedoch den Effekt einer Erhöhung der CO_2-Konzentration.

Tabelle 6. Wie Tabelle 4, jedoch einschließlich der Absorption durch Wasserdampf bei einer relativen Luftfeuchtigkeit (RH) von 85 %. Vergleiche Anhang A, Tabelle A5.

	A 300 ppm	A 600 ppm	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta_{2\times CO_2}$ [Wm^{-2}]
Atm 5 km 85 RH	0,89	0,92	3 %	2,6
Atm 9 km 85 RH	0,90	0,93	3 %	2,6
Atm 11 km 85 RH	0,90	0,93	3 %	2,6

Tabelle 7. Wie Tabelle 5, jedoch unter Berücksichtigung der Absorption durch Wasserdampf bei einer relativen Luftfeuchtigkeit (RH) von 85 %. Vergleiche Anhang A, Tabelle A5.

	A 300 ppm	A 600 ppm	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta_{2\times CO_2}$ [Wm^{-2}]
Atm 5 km 85 RH	0,94	0,97	3 %	2,0
Atm 9 km 85 RH	0,95	0,98	3 %	2,0
Atm 11 km 85 RH	0,95	0,98	3 %	2,0

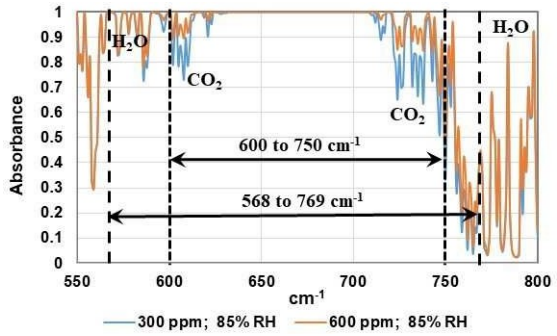


Abb. 3. Die Absorption von CO_2in Konzentrationen von 0,03 % und 0,06 % in einer feuchten Atmosphäre für eine vertikale Weglänge von der Oberfläche bis zu einer Höhe von 7 km. Die Oberflächentemperatur beträgt 293 K. Die relative Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche beträgt 85 %. Die Temperaturabnahme beträgt - 6,5 K km(⁻) (1) bis zur Sättigungsgrenze, die räumliche Auflösung beträgt 100 m. Die Berechnung (7) wurde mit einer spektralen Auflösung von 0,01 cm(⁻) (1) durchgeführt die Daten sind jedoch mit einer Auflösung von 1 cm(⁻) (1) dargestellt.

auf etwa 2,6 $W\,m^{\wedge(-1)}2$ für den Infrarotspektralbereich von 568 bis 769 $cm^{\wedge(-1)}1$. Ein ähnlicher Effekt zeigt sich beim Vergleich der Ergebnisse in den Tabellen 5 und 7 miteinander.

Zum Vergleich mit Abb. 2 zeigen wir in Abb. 3 das Absorptionsspektrum in der Atmosphäre für das Vorhandensein von Wasserdampf zusätzlich zu Kohlendioxid.

Vergleichen Sie Ref. [1] für eine semiquantitative Diskussion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine CO_2-Luftleitung mit einer Weglänge von 2 bis 3 km den Effekt des CO_2-Anstiegs in der Atmosphäre widerspiegelt, der in einer Höhe von etwa 5 km seine quasi-asymptotische Sättigungsgrenze erreicht hat. Die Einbeziehung von Wasserdampf reduziert den Effekt auf die Absorption eines Anstiegs der $CO_{(2)}$-Konzentration von 0,03 % auf 0,06 % drastisch von etwa 6 W $m^{(-)(2)}$auf 3 W $m^{(-)(2)}$.

Der Wert von 3 Wm^{-2} zusätzlicher Absorption entspricht 3/418 ≃ 0,7 % der Gesamtstrahlung an der Erdoberfläche, kommen wir zu dem Schluss, dass die Verdopplung der CO_2-Konzentration für den relevanten Zeitraum von etwa einem Jahrhundert eine ziemlich vernachlässigbar ist. Auch wenn die Zunahme der Absorption von $\Delta_{2\times CO_2} \simeq 3Wm^{-2}$ ist erheblich größer ist als der Wert von 1972 für $\Delta_{2\times CO_2} \simeq 1Wm^{-2}$, bleibt die Hauptschlussfolgerung aus Ref. [1] gültig.

3. CO_2 Verdopplung und Oberflächentemperatur

In Abschnitt 2 kamen wir zu dem Schluss, dass die Absorption von Infrarotstrahlung aus dem CO_2-Band in der Atmosphäre für Höhen über etwa 5 km (annähernd) unabhängig von der Höhe wird; die Absorption erreicht eine quasi-asymptotische Sättigungsgrenze in einer Höhe von etwa 5 km. Die Größe der quasi-asymptotischen Absorption stimmt mit der Absorption eines $CO_{(2)}$-Luftrohrs bei konstanter Temperatur T = 293 K, konstantem Druck p = 1 atm und einer Länge von etwa 2 bis 3 km überein.

Die Bewertung[7] der Absorption durch die Atmosphäre (Details siehe Anhang A) basiert auf den bekannten spektroskopischen Eigenschaften der absorbierenden Gase.

basiert auf den bekannten spektroskopischen Eigenschaften der absorbierenden Gase,

H_2O, CO_2 und die empirisch bekannte durchschnittliche Temperaturabnahme der Atmosphäre von etwa $-6,5\ Kkm^{-1}$. Die Absorption erreicht in einer Höhe von 6 km einen annähernd konstanten Wert. In dieser Höhe und darüber hinaus wird ein konstanter Wert an Infrarotstrahlung

frei in den Weltraum abgestrahlt. In dieser Höhe bietet die Atmosphäre ein „freies Fenster" (vergleiche Anhang B) für die Emission von Infrarotstrahlung bei einer Temperatur von

$T_{TOA} = (293 - 6 \times 6,5)\ K = 254\ K \simeq 255\ K$. Die ausgehende Intensität ergibt sich aus $S_{Raum} = S(T)|_{T=255K} = \sigma T^4|_{T=255} = 240\ Wm^{-2}$.

Die annähernde Stabilität des Klimas auf der Erde, eine notwendige Voraussetzung für Leben auf der Erde, erfordert ein Gleichgewicht zwischen der ausgehenden Infrarotstrahlung, vorhergesagt durch $S_{Raum} = S(T)|_{T=255K}$,und der effektiven Strahlung der Sonne. Die effektive Strahlung der Sonne beträgt [e] $S_0 = 240Wm^{-2}$. Die Übereinstimmung der obigen

Parameterfreie Vorhersage der Strahlungstransferberechnung mit der effektiven Strahlung der Sonne,

$$S_{Raum} = S(T)|_{T=255K} = S_0, \tag{3.1}$$

liefert eine nicht triviale Unterstützung der Strahlungstransferberechnung auf der Grundlage der empirischen Temperaturabnahme von $6,5\ km^{-2}$. Tatsächlich erklärt die Strahlungstransferanalyse die annähernde Stabilität des Klimas auf der Erde.

Für eine prägnante Darstellung des strahlungsbedingten „Treibhauseffekts" in Bezug auf die Strahlung der Sonne, S_0, und die LWIR der Erde innerhalb sowie außerhalb von

[e] Siehe Fußnote 3

des „atmosphärischen Fensters", quantifiziert durch S_W , und der fraktionellen Durchlässigkeit, $f \ll 1$, siehe Anhang B.

Wir wenden uns nun der Auswirkung einer Verdopplung *des* $CO_{(2)}$*-Gehalts* auf die Oberflächentemperatur zu. Wir gehen davon aus, dass

Existenz eines Strahlungsgleichgewichts der emittierten Schwarzkörper-LWIR, gegeben durch $S(T)$, für jeden gegebenen CO_2-Gehalt (innerhalb der derzeit diskutierten Grenzen). Die Absorption bei

Verdopplung der CO_2-Konzentration, $\Delta_{2\times CO_2}$, erfordert zur Kompensation eine Erhöhung der Strahlung $S(T) \rightarrow S(T) + \Delta S$, d. h.

$$S(T) + \Delta S = S(T + \Delta T) = S(T) + \left(\frac{dS}{dT}\right)_T \Delta T, \tag{3.2}$$

wobei $\Delta S \equiv \Delta_{2\times CO_2}$ und T die Oberflächentemperatur bezeichnet, die in unserer Betrachtung mit $T = 293\ K$ gewählt wurde. Beachten Sie, dass der detaillierte Mechanismus, der in der Atmosphäre abläuft

, der zu der erforderlichen Erhöhung von $\Delta S = \Delta_{2\times CO_2}$ führt, nichtnäher spezifiziert werden muss. Gemäß (3.2) muss die Temperatur um

$$\Delta T = \frac{\Delta 2\times CO2}{\left(\frac{dS}{dT}\right)_T} = \frac{T\Delta_{2\times CO_2}}{4S(T)}, \tag{3.3}$$

wobei $S(T) \sim T^4$ für einen Planck-Strahler im letzten Schritt verwendet wird. Beziehung (3.3) spezifiziert den Anstieg der Oberflächentemperatur im Zusammenhang mit der Wiederherstellung des Gleichgewichts bei

das Ende einer CO_2-Luftleitung oder, gleichbedeutend, in der Höhe der Atmosphäre, in der die quasi-asymptotische Grenze der Absorption erreicht wurde. Durch Einsetzen von $T = 293\ K$ und $S(T = 293\ K) = 418\ Wm^{(-)(2)}$ sowie $\Delta(2)_{(\times)_2(CO)} = 6{,}09$ W $m(^{-)(2)}$ aus den Tabellen 2 und 4 in (3.3) einsetzen, erhalten wir einen Anstieg der Oberflächentemperatur von $\Delta T = 1{,}07$ K, vergleiche Tabelle 8. Durch Einsetzen von $\Delta(2)_{(\times)(CO)} = 2{,}6$ W $m(^{-)(2)}$ aus Tabelle 6 in (3.3) wird der starke Einfluss von Wasserdampf bei *einer relativen Luftfeuchtigkeit von* 85 % deutlich. Die starke Absorption durch $H(2)_O$verringert die Änderung der Oberflächentemperatur auf $\Delta T = 0{,}46$ K für den angenommenen Anstieg der $CO(_2)$ -Konzentration von 0,03 % auf 0,06 %.

Tabelle 8. Anstieg der Oberflächentemperatur, der die Infrarotabsorption durch CO_2 und durch $CO_2 + H_2O$ bei *einer* relativen *Luftfeuchtigkeit* von 85 % kompensiert

	$\Delta_{2\times CO_2}$ [Wm^{-2}]	ΔT [K]
3 km CO_2 -Luftleitung 9 km Atmosphäre	6,09	1,07
9 km Atmosphäre $RH = 85$ %	2,6	0,46

4. Strahlungsabsorption unter veränderten atmosphärischen Bedingungen.

Eine sehr aufwendige Strahlungstransferberechnung, die kürzlich von Harde[10] vorgestellt wurde, untersucht innerhalb eines zweischichtigen Klimamodells die Infrarotabsorption durch $_{CO_2}$unter

[f] Vergleiche Ref. [8, 9] für alternative dynamische Klimamodelle.

verschiedenen atmosphärischen Bedingungen, wie Oberflächentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Wolken usw. Die Ergebnisse[10] zur Strahlungsabsorption für CO_2-Gehalte von 380 ppm und 760 ppm unter variierenden atmosphärischen Bedingungen sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9. Die ersten drei Spalten geben die von Harde erzielten Ergebnisse wieder [10] für die Absorption von Infrarotstrahlung bei CO_2 -Konzentrationen von 0,038 % und 0,076 % sowie den Anstieg $\Delta_{2\times CO_2}$ [%] unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen wie Oberflächentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung usw. In den übrigen vier Spalten stellen wir den damit verbundenen Anstieg dar, $\Delta_{2\times CO_2}$ [Wm^{-2}], den Anstieg der Oberflächentemperatur ΔT und die Durchschnittswerte $\overline{\Delta_{2\times CO_2}}$ und $\overline{\Delta T}$.

0,038 %	0,076 %	$\Delta_{2\times CO_2}$ [%]	$\Delta 2\times CO_2$ [Wm^{-2}]	ΔT [K]	$\overline{\Delta 2\times CO_2}$ [Wm^{-2}]	$\overline{\Delta T}$ [K]
82,57 %	83,84 %	1,27 %	5,03	0,92		
82,57 %	83,31 %	0,74 %	2,93	0,53	3,45	0,63
89,77 %	90,48 %	0,71 %	2,81	0,51		
81,55 %	82,05 %	0,50 %	1,98	0,36		
84,08 %	85,22 %	1,14 %	4,51	0,82		

Wir stellen fest, dass die Ergebnisse für die Absorption in Tabelle 9 die Absorption aufgrund der Verdopplung von CO_2 als Bruchteil der gesamten LWIR von $S(T)$ = 396 $Wm^{(-)\,(2)}$ bei T = 289 K, die von Harde verwendet wird, angegeben, während die Tabellen 2, 3 bis 6 und 7 die Ergebnisse für die Zunahme der Absorption durch die Verdopplung von $CO_{(2)}$ als Bruchteil der Strahlung im $CO_{(2)}$ -Band angeben. Für eine ausführliche Erörterung verweisen wir auf Ref. 10.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Diskussion ist der wesentliche und wichtige Punkt der Ergebnisse in Tabelle 9 die annähernde Unabhängigkeit der Absorption aufgrund der CO_2-Verdopplung, $\Delta_{2\times CO_2} \eqsim 1$ %, aus den verschiedenen atmosphärischen Bedingungen

Die Ergebnisse für $\Delta_{2\times CO_2}$ in Spalte 3 von Tabelle 9 vergleichen. *Die* Streuung der Ergebnisse für ΔT in Spalte 5 von Tabelle 9 zwischen ΔT = 0,36 K und ΔT = 0 ,92 K und der Durchschnittswert von ΔT = 0 ,63 K stimmen mit dem Ergebnis unserer direkten Bewertung von ΔT = 0 ,46 K in Tabelle 8 überein.

Die Übereinstimmung bzw. annähernde Übereinstimmung unseres Ergebnisses von ΔT = 0,46 ≃ 0,5 K in Tabelle 8 und des Ergebnisses von $\Delta T \eqsim 0{,}6\ K$ in Tabelle 9 erfordert zusätzliche Anmerkungen.

Die Übereinstimmung stärkt die Gültigkeit unseres Ergebnisses, das auf einem sogenannten Einlagenmodell (Oberflächenmodell) basiert, was insbesondere aus der Äquivalenz der Atmosphäre und der CO_2-Luftleitung bei Oberflächentemperatur und Oberflächendruck hervorgeht. Andererseits kommen wir zu dem Schluss, dass viele der beteiligten Details verschiedener Flussbegriffe eines Zweischichtmodells offenbar durch unsere einfache Strahlungsgleichgewichtsannahme für ΔT in (3.3) zusammengefasst werden können. Eine ergänzende Erörterung zu ΔT finden Sie im letzten Teil von Anhang B.

5. Zur Beobachtungsprüfung der Strahlungstransferergebnisse

Die experimentellen Tests von Vorhersagen zur Klimasensitivität erfordern im Allgemeinen Zeitskalen von Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten. In wegweisenden Arbeiten von Lindzen und Choi [14] wurde darauf hingewiesen, dass Daten zu Schwankungen der (Meeres-)Oberflächentemperatur der Erde auf kurzen Zeitskalen in Kombination mit satellitengestützten Strahlungsflussmessungen [15, 16] wichtige empirische Informationen über die Klimasensitivität der Erde liefern können. Als Reaktion auf unmittelbare Reaktionen in der Literatur [17,] [18,] [19] auf ihre Ergebnisse [14] wurde von Lindzen und Choi [20] eine zusätzliche, erweiterte und verfeinerte Untersuchung vorgelegt· Vergleiche auch Ref. [21] für eine neuere verwandte Untersuchung.

Im Folgenden werden wir darauf hinweisen, dass die Ergebnisse aus der Kombination der Daten zu Schwankungen der Meeresoberflächentemperatur mit Daten zur Strahlungsflussintensität aus den
den Experimenten ERBE [15] und CERES [16] empirisch unsere Ergebnisse zu ΔT
aus der Strahlungstransferanalyse in den Abschnitten 2 bis 4 empirisch bestätigen. Wir beschränken uns darauf, die zugrunde liegenden Annahmen und die daraus resultierende Schlussfolgerung näher zu erläutern. Eine Diskussion der technischen Details der Analyse der experimentellen Daten würde weit über unser Fachwissen hinausgehen.

Bei den Strahlungstransferberechnungen in den Abschnitten 2 und 3 sind wir in zwei getrennten Schritten vorgegangen. Im ersten Schritt haben wir eine trockene Atmosphäre (Luftfeuchtigkeit Null) betrachtet, im zweiten Schritt wurde der realistische Fall einer Luftfeuchtigkeit ungleich Null untersucht. Es ist sinnvoll, eine Notation einzuführen, die sich explizit auf diese beiden Fälle bezieht. Durch Spezialisierung von (3.3) auf die Fälle von Luftfeuchtigkeit Null und ungleich Null definieren wir

$$\Delta T^{(0)} = \frac{\Delta^{(0)}_{2\times CO2}}{\frac{dS}{dT}_T} \equiv G(T)\Delta^{(0)}_{2\times CO2} \quad , \tag{5.1}$$

und

$$\Delta T^{(H)} = \frac{\Delta^{(H)}_{2\times CO2}}{\frac{dS}{dT}_T} \equiv G(T)\Delta^{(H)}_{2\times CO2} \quad , \tag{5.2}$$

bezogen auf Null- bzw. Nicht-Null-Luftfeuchtigkeit. Wir erinnern an die numerischen Werte von $G = G(T = 293\ K) = \frac{293}{4\times 418} = 0{,}175\ kW^{-1}m^2$ sowie $\Delta^{(0)}_{2\times CO2} = 6{,}09\ Wm^{-2}$ und $\Delta^{(H)}_{2\times CO2} = 2{,}6\ Wm^{-2}$ angegeben in Abschnitt 3.

Identische Umschreibung von $\Delta T^{(H)}$ als

$$\Delta T^{(H)} = \Delta T^{(0)} + \Delta T^{(H)} - \Delta T^{(0)} \equiv \Delta T^{(0)} + f\Delta T^{(H)}, \tag{5.3}$$

erhalten wir, dass der häufig verwendete sogenannte Rückkopplungsfaktor f mit (5.1) und (5.2) gegeben ist durch

$$f = 1 - \frac{\Delta T^{(0)}}{\Delta T^{(H)}} = 1 - \frac{\Delta^{(0)}_{2\times CO2}}{\Delta^{(H)}_{2\times CO2}}, \tag{5.4}$$

oder äquivalent

$$\Delta T^{(H)} = \frac{\Delta T^{(0)}}{1 - f}. \tag{5.5}$$

Numerisch finden wir aus (5.4) und Tabelle 8 den Wert von f aus der Strahlungstransferberechnung, fortan als theoretischer Wert von $f = f_{th}$ bezeichnet, gegeben durch

$$f_{th} = 1 - \frac{6{,}09}{2.6} = -1{,}34 \tag{5.6}$$

Der negative Rückkopplungsfaktor gibt bei Einsetzen in (5.5) somit identisch wieder

$$\Delta T^{(H)} = \frac{\Delta T^{(0)}}{2{,}34} = \frac{1{,}07}{2{,}34} = 0{,}46\ K < 1{,}07\ K \tag{5,7}$$

aus Tabelle 8.

Ersetzen von $\Delta^{(H)}_{2\times CO2}$ in (5.4) durch $\Delta T^{(H)}$ ersetzt wird, kann unter Verwendung von (5.2) der Faktor f umgeschrieben werden als

$$f = 1 - G(T)\ \frac{\Delta^{(0)}_{2\times CO_2}}{\Delta T^{(H)}} \tag{5,8}$$

Gemäß (5.8) wird der Faktor f durch Division der Strahlungszunahme $\Delta^{(0)}_{2\times CO2}$, die sich aus der Verdopplung von CO_2 bei null Luftfeuchtigkeit ergibt, durch die Oberflächentemperaturerhöhung $\Delta T^{(H)}$, die für das Gleichgewicht der Erdatmosphäre erforderlich ist, um eine Verdopplung *des* CO_2 Verdopplung bei einer Luftfeuchtigkeit ungleich Null.

Identifizierung $_{2\times CO2}/\Delta T^{(H)}$ in (5.8) mit der experimentell gemessenen Steigung von $\Delta^{(0)}$ $(\Delta\ Flux/\Delta T)_{exp}$ der ausgehenden Strahlung an der TOA, gemessen als Funktion der Meeresoberflächentemperatur,

$$\frac{\Delta^{(0)}_{2\times CO2}}{\Delta T^{(H)}} = \left(\frac{\Delta\ Flux}{\Delta T}\right)_{exp}, \tag{5.9}$$

stellen wir fest, dass der Faktor f durch

$$f \equiv f_{exp} = 1 - G(T)\ \left(\frac{\Delta Flux}{\Delta T}\right)_{exp}. \tag{5.10}$$

Die Beziehung (5.10) stammt von Lindzen und Choi [20] [(g)]. Sie ermöglicht es, die Klimasensitivität für eine Luftfeuchtigkeit ungleich Null, $\Delta T^{(H)}$, siehe (5.5), aus dem experimentell bestimmten Strahlungsfluss abzuleiten, indem $f = f_{exp}$ gemäß (5.10) und der Wert von $\Delta T = \Delta T^{(0)} \simeq 1{,}1\ K$ für eine Verdopplung *des* CO_2 bei Nullfeuchte abzuleiten.

Unter Verwendung von Satellitenmessungen der ERBE [15]- und CERES [16]-Kollaborationen, Die detaillierte Analyse in Ref. [20] ergab einen Wert von

$$\left(\frac{\Delta Flux}{\Delta T}\right)_{exp} = 6{,}9 \pm 1{,}8\ Wm^{-2}\ K^{-1} \tag{5.11}$$

[g] Vergleichen Sie die Gleichungen (5) und (6) in Ref. [20]. Gleichung (6) enthält einen zusätzlichen Faktor c über $f \to cf$ i , der für die gemeinsame Nutzung tropischer Rückkopplungen über den Globus eingeführt wurde. Der Wert von c hängt davon ab, wie die Steigung $\Delta\ Flux/\Delta T$ aus den Messungen extrahiert wird. In Ref. [20] wird ein Wert von c = 2 verwendet. Für einen globalen Wert von Δ Flux/ΔT hat man c¬1.

(siehe Tabelle 2 in Ref. [20]). Wenn wir diesen Wert in (5.10) einsetzen, erhalten wir

$$f_{exp} \sim= 1 - 0{,}175 \times 6{,}9 \sim= -0{,}21, \tag{5.12}$$

mit $1 - f_{exp} =\sim 1{,}21$ und $\Delta T^{(0)} \sim= 1{,}07\ K$ aus Tabelle 8, aus (5.5) erhalten wir

$$\Delta T_{exp} = \frac{1{,}07}{1.21} \simeq 0{,}9\ K. \tag{5.13}$$

Unter Einführung des Teilungsfaktors $c = 2$ aus Ref. [20], vergleiche Fußnote g, erhalten wir $f_{exp} \sim= -0{,}1$ und ΔT_{exp} wird zu

$$\Delta T_{exp} = \frac{1{,}07}{1{,}1} \simeq 1{,}0\ K. \tag{5.14}$$

Lindzen und Choi, [20], verwenden $c = 2$ und erhalten $f_{exp} = -0{,}5$ und folglich $\Delta T_{exp} =\sim 0{,}7\ K$ (Konfidenzintervall $0{,}5\ K$ bis $1{,}3\ K$ bei einem Konfidenzniveau von 99 %).[h]

Angesichts der Komplexität des Themas kommen wir zu dem Schluss, dass eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen dem theoretischen Ergebnis von

$$\Delta T_{th} = 0{,}46\ K \simeq 0{,}5\ K \tag{5.15}$$

aus Tabelle 8,[i] und $T_{exp} \simeq 0{,}9\ K$ bis $1{,}0\ K$, empirisch ermittelt durch Identifizierung des Verhältnisses $\Delta^{(0)}_{2\times CO2} / \Delta T^{(H)}$ mit den satellitengestützten Strahlungsflussmessungen, von $\Delta\ Flux/\Delta T$. Tatsächlich kommen wir zu dem Schluss, dass die Ergebnisse der satellitengestützten Strahlungsflussmessung die Ergebnisse zur Klimasensitivität aus den detaillierten und zuverlässigen Strahlungstransferberechnungen stützen.

Wie in den Referenzen [14] und [20] dargelegt, besteht eine eindeutige Diskrepanz zwischen den Ergebnisse aus den Strahlungsflussmessungen von $f_{exp} < 0$ und den Vorhersagen einer Vielzahl von Atmosphärenmodellen, die zu einem positiven Rückkopplungsfaktor $f > 0$ und einem erhöhten Wert der Klimasensitivität von ΔT (Atmosphärenmodelle) $\gg 1K$ gelangen.

Wir fügen einen Verweis auf eine aktuelle Veröffentlichung [22] hinzu, die auf die Behauptung [11] von empirischen

Unterstützung für eine signifikante Klimasensitivität, $\Delta T \gg 1K$, aufgrund der Verdopplung des CO_2-Gehalts, basierend auf der Analyse der beobachteten Veränderungen von ΔT im 25-Jahres-Zeitraum von 1983 bis 2008. Es wird darauf hingewiesen [22], dass die für diese Analyse verwendeten Klimamodelle [11]

den wichtigen Einfluss der niedrigen Wolkendecke auf ΔT im untersuchten Zeitraum nicht korrekt berücksichtigen. Bei korrekter Berücksichtigung des Wolkendeckeeffekts ergibt sich eine Übereinstimmung mit $\Delta T < 1K$ [22], was im Widerspruch zu den Ergebnissen von $\Delta T \gg 1K$ [11].

---

[h] Der Unterschied zwischen unserem Ergebnis von $f_{exp} = -0{,}1$ für $c = 2$ und $\Delta T_{exp} \simeq 1\ K$ und dem Ergebnis aus Ref. [20], nämlich $f_{exp} \simeq -0{,}5$ für c = 2 und $\Delta T_{exp} \simeq 0{,}7$ K, ist auf den Unterschied zwischen unserem Wert von $G = G(T = 293\ K) =\sim 0{,}175\ W m^{-2}$ [(1)] [m(2)] und $G(T = 255\ K) = \sim 0{,}3$ aus Ref. [20] zurückzuführen, oder

äquivalent $C^{(0)}_{2\times CO_2} = 6{,}09\ Wm^{-2}$ gegenüber $C^{(0)}_{2\times CO_2} = \Delta Q = 3{,}7\ Wm^{-2}$ was bedeutet, dass $T^{(0)} \simeq 1{,}1\ K$ in beiden Fällen.

[i] Vergleichen Sie auch die Variation der theoretischen Ergebnisse in Tabelle 9 unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen.

6. Schlussfolgerungen

Das Ziel dieses Artikels war es, den Temperaturanstieg ΔT („Klimasensitivität“) der Erdoberfläche aufgrund einer Verdopplung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre zu schätzen. Die Schätzung wurde auf prägnante und transparente Weise ohne übermäßige Vereinfachung vorgenommen. Alle erforderlichen Schritte wurden ausführlich erläutert.

Die Grundannahme, dass die Erdoberfläche eine gleichmäßige konstante Temperatur T aufweist und eine langwellige Infrarotstrahlung $S(T)$ eines schwarzen Körpers abgibt, ist keineswegs trivial, wird jedoch implizit oder explizit in den meisten Untersuchungen zu diesem Thema zugrunde gelegt. Unsere Ergebnisse basieren auf einer neuen Strahlungstransferbewertung, deren Einzelheiten in Anhang A dargestellt sind. Die Absorption der Atmosphäre im $CO(_2)$-Spektralbereich kann zuverlässig bestimmt werden und führt zu einem annähernd konstanten Wert oberhalb einer Höhe von etwa 5 km oder einer Länge der horizontalen $CO(_2)$-Luftleitung von etwa 3 km bei Oberflächentemperatur und -druck.

Unter der Annahme einer Wiederherstellung des Gleichgewichts bei einer Verdopplung der CO_2-Konzentration
durch einen damit verbundenen Temperaturanstieg lässt sich dann eine eindeutige Schätzung des Anstiegs der Oberflächentemperatur ΔT ableiten, gegeben durch $\Delta T =\sim 0{,}5\ ^0 C$ (vergleiche Abschnitte
3 und 4).

In Bezug auf den weit verbreiteten Rückkopplungsparameter f ergibt sich $\Delta T \sim= 0{,}5^0 C$ entspricht einer negativen Rückkopplung von $f < 0$. Dieses Ergebnis wird empirisch durch satellitengestützte Messungen der kurzfristigen Schwankungen des ausgehenden Strahlungsflusses an der TOA als Funktion der (Meeres-)Oberflächentemperatur gestützt. Durch die Kombination theoretischer Strahlungstransferergebnisse mit Strahlungsflussmessungen ergibt sich ein konsistentes Bild (vgl. Abschnitt 5). Dieses Bild steht im Widerspruch zu einer Vielzahl von Vorhersagen aus Klimamodellen, die positive Rückkopplungen, $f > O,$ implizieren.

Das quantitative Ergebnis von $\Delta T \simeq 0{,}5$ bis $0{,}6\ ^0 C$ gilt für den drastischen Anstieg von
Eine Verdopplung des CO_2-Gehalts in der Luft von 380 ppm auf 760 ppm entspricht einem
Jahrhundert in Verbindung gebracht wird, bestätigt, dass die Auswirkungen eines anthropogenen CO_2-Anstiegs auf das Klima der Erde ziemlich vernachlässigbar sind.
Diese Schlussfolgerung steht in starkem Kontrast zu den Werten von $\Delta T \sim 1{,}5 - 4{,}5\ ^0 C,$ die im IPCC-Bericht von 201311 genannt werden. Die veröffentlichten Ergebnisse zu
ΔT füllt ein noch größeres Intervall zwischen $\Delta T \simeq 0{,}4^0 C$ und $\Delta T \simeq 8^0 C$ aus. Es gibt eine systematische Tendenz, dass die zwischen 2000 und 2018 veröffentlichten Ergebnisse zu ΔT mit zunehmendem Veröffentlichungsdatum abnehmen[12] und sich unserem Ergebnis von $\Delta T \simeq 0{,}5\ ^0 C$ annähern. [j]

Wir fanden eine prägnante und kurze Herleitung des Treibhauseffekts der Erde (vergleiche Anhang B, insbesondere Abb. B1). Der Treibhauseffekt wird explizit abgeleitet. Er wird als eine Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts von der Erdoberfläche auf eine atmosphärische Höhe von etwa fünf Kilometern verstanden.

[j] Vergleiche z. B. Abb. 1 in Ref. [12] und die dazugehörige Liste mit Dutzenden von Referenzen.

Danksagungen

Der Autor dankt Konrad Kleinknecht für die Diskussionen, die den Anstoß zu dieser Untersuchung gaben. Der Autor dankt Peng-Sheng Wei für den nützlichen Schriftwechsel. Besonderer Dank gilt Roy Clark für die Bereitstellung der Strahlungstransferergebnisse in Anhang A, für seine große Hilfe bei der Suche nach einschlägiger Literatur zu diesem Thema sowie für die kritische Durchsicht des vorliegenden Artikels.

Anhang A. CO_2 Absorption 568 bis 770 cm^{-1} , 7 km Weglänge, 296 K, 300. 600 ppm

Die für die Berechnungen der Rohr- und atmosphärischen Absorption verwendeten Konfigurationen sind in den Abbildungen A1a und A1b dargestellt.

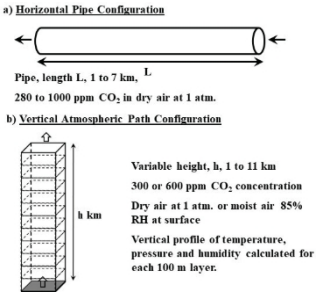


Abb. A1. Konfigurationen, die für die Berechnungen der Rohr- und atmosphärischen Absorption verwendet wurden.

Für die „Rohr"-Konfiguration wurde eine variable horizontale Weglänge L von 1 bis 7 km verwendet. Die CO_2-Konzentration wurde von 280 bis 1000 ppm variiert. Es wurde ein Gesamtdruck von 1 Atmosphäre trockener Luft bei 293 K verwendet.

Für die Berechnung der atmosphärischen Absorption wurde eine vertikale Weglänge h von 1 bis 11 km verwendet. Die Oberflächentemperatur wurde auf 293 K bei 1 Atmosphäre Druck festgelegt.

Es wurden zwei Berechnungssätze durchgeführt. Der erste verwendete trockene Luft mit einer Temperaturabnahme von - 6,5 K km^{-1} . Die zweite verwendete eine relative Oberflächenfeuchtigkeit von 85 % mit einem Temperaturgradienten von - 6,5 K km^{-1} bis zum Sättigungsniveau. Oberhalb des Sättigungsniveaus wird die meteorologische Formel für die gesättigte Temperaturabnahme verwendet[23]. Die verwendeten Temperaturabnahmen sind unten in Abb. A6 dargestellt. Das vertikale Atmosphärenprofil wurde mit einer räumlichen Auflösung von 100 m berechnet.

Die hochauflösenden CO2-Absorptionsspektren wurden anhand von Spektraldaten berechnet. aus der HITRAN-Datenbank[5], $^{12}C^{16}O_2$ nur mit Linienstärken > 1e-23. Die spektrale Auflösung betrug 0,01 cm^{-1} . Die Temperatur wurde auf 293 K eingestellt. Für die „Rohr"-Berechnungen wurden die großen Spektraldatendateien in sieben Spektralbereiche unterteilt, wobei der Absorptionskoeffizient für jeden Spektralbereich berechnet wurde. Die Berechnungen wurden mit Excel-Arbeitsmappen durchgeführt, wobei jeder Spektralbereich in einer separaten Arbeitsmappe enthalten war. Anschließend wurden die gewichteten Durchschnittswerte über die Spektralbereiche 568 bis 770 cm(−) (1) und 600 bis 750 cm(−) (1) berechnet. Die „Rohr"-Berechnung ist in Tabelle A1 dargestellt. Pfad

Es wurden Längen von 1, 2, 3, 5 und 7 km verwendet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen A2 und A3 aufgeführt. Die Daten sind in den Abbildungen A2 und A3 dargestellt.

Tabelle A1. Die gewichteten Durchschnitte von sieben sieben Spektralbereiche werden kombiniert, um die durchschnittliche Absorption des Bandes zu erhalten.
R. Clark, 28 April *th* 2019

Bereich cm^{-1}	Start/Ende	300 ppm	600 ppm
32	568 bis 600 cm^{-1}	0,51	0,64
20	600 bis 620 cm^{-1}	0,94	0,99
20	620 bis 640 cm^{-1}	0,99	1,00
60	640 bis 700 cm^{-1}	1,00	1,00
25	700 bis 725 cm^{-1}	0,99	1,00
25	725 bis 750 cm^{-1}	0,89	0,97
20	750 bis 770 cm^{-1}	0,39	0,53
Banddurchschnitt			
202	568 bis 770 cm^{-1}	0,84	0,89
	Absn-Koeffizient -ln(1-A)	1,83	2,21
	a (atm^{-1} m^{-1})	0,870	0,527

Tabelle A2. „Rohr"-Absorption für ausgewählte Weglängen von 1 bis 7 km, CO_2-Konzentrationen von 280 bis 1000 ppm, 568 bis 769 cm^{-1} Spektralbereich, 293 K.

ppm	280	300	380	400	600	760	1000
1 km	0,62	0,63	0,66	0,66	0,71	0,73	0,76
2 km	0,70	0,71	0,73	0,74	0,78	0,81	0,83
3 km	0,75	0,75	0,78	0,78	0,82	0,84	0,87
5 km	0,80	0,81	0,83	0,83	0,87	0,88	0,90
7 km	0,83	0,84	0,86	0,86	0,89	0,90	0,92

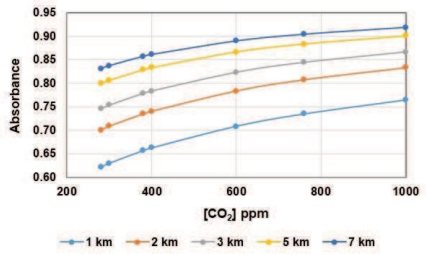


Abb. A2. Daten aus Tabelle A2.

„Rohr"-Absorption für ausgewählte Weglängen und Konzentrationen, 1 bis 7 km und 280 bis 1000 ppm, 600 bis 750 cm^{-1} Spektralbereich

ppm	280	300	380	400	600	760	1000
1 km	0,78	0,79	0,82	0,83	0,87	0,89	0,92
2 km	0,86	0,87	0,89	0,90	0,93	0,95	0,97
3 km	0,90	0,91	0,93	0,93	0,96	0,97	0,98
5 km	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99
7 km	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00

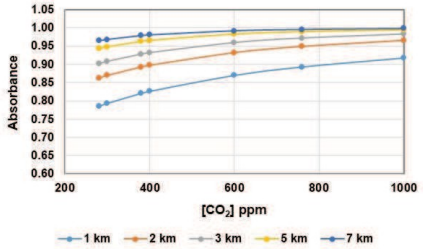


Abb. A3. Daten aus Tabelle A3.

Die Berechnungen zum Strahlungstransfer in der Atmosphäre wurden unter Verwendung derselben CO_2-Linien durchgeführt die auch für die „Rohr"-Berechnungen verwendet wurden, wobei für die Fälle mit 85 % relativer Luftfeuchtigkeit $H_2{}^{16}O$-Linien mit einer Linienstärke von > 1e-23 hinzugefügt wurden. Die Berechnungen wurden mit Excel-VBA-Makros bei einer spektralen Auflösung von 0,01 $cm^{(-1)}$ durchgeführt Die Daten wurden jedoch für die Darstellung in Intervalle von 1 $cm^{(-1)}$ unterteilt. Die Bedingungen für Temperatur und $CO_{(2)}$ -Konzentration sowie die Spektralbereiche waren dieselben wie für die „Rohr"-Daten. Die $H_{(2)}O$-Konzentration wurde für die erste 100-m-Schicht auf eine relative Luftfeuchtigkeit von 85 % bei 293 K festgelegt. Die vertikale Weglänge wurde in Schritten von 1 km von 1 bis 11 km variiert. Die Ergebnisse sind in den Tabellen A4 und A5 aufgeführt. Die Daten sind in den Abbildungen A4 und A5 dargestellt.

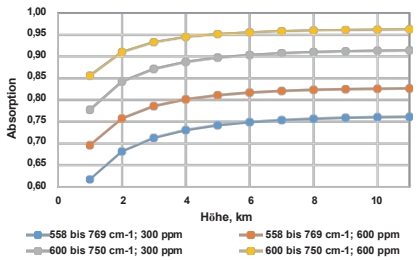


Abb. A4. Daten aus Tabelle A4.

Tabelle A4. Atmosphärische Absorptionsdaten für den Spektralbereich von 568 bis 769 cm^{-1} und von 600 bis 750 cm^{-1} . Die vertikalen Höhen über der Oberfläche variierten zwischen 1 und 11 km.

	568 bis 769 cm^{-1}	568 bis 769 cm^{-1}	600 bis 750 cm^{-1}	600 bis 750 cm^{-1}
Höhe km	300 ppm	600 ppm	300 ppm	600 ppm
1	0,618	0,696	0,777	0,856
2	0,682	0,758	0,842	0,910
3	0,713	0,786	0,872	0,933
4	0,731	0,802	0,888	0,945
5	0,742	0,811	0,897	0,952
6	0,749	0,817	0,904	0,956
7	0,754	0,821	0,908	0,958
8	0,757	0,823	0,910	0,960
9	0,759	0,825	0,912	0,961
10	0,761	0,826	0,913	0,962
11	0,761	0,827	0,914	0,962

Tabelle A5. Daten zur atmosphärischen Absorption für den Spektralbereich von 558 bis 769 cm^{-1} und von 600 bis 750 cm^{-1} . Die vertikalen Höhen über der Oberfläche variierten zwischen 1 und 11 km.

	558 bis 769 cm^{-1}	558 bis 769 cm^{-1}	600 bis 750 cm^{-1}	600 bis 750 cm^{-1}
Höhe km	300 ppm, 85 RH	600 ppm, 85 RH	300 ppm, 85 RH	600 ppm, 85 RH
1	0,799	0,843	0,856	0,904
2	0,854	0,892	0,906	0,945
3	0,876	0,910	0,927	0,961
4	0,887	0,919	0,937	0,968
5	0,894	0,924	0,943	0,973
6	0,897	0,927	0,947	0,975
7	0,900	0,929	0,949	0,977
8	0,901	0,930	0,951	0,977
9	0,902	0,931	0,952	0,978
10	0,903	0,931	0,952	0,978
11	0,903	0,929	0,953	0,977

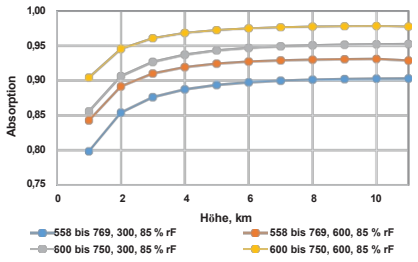


Abb. A5. Daten aus Tabelle A5.

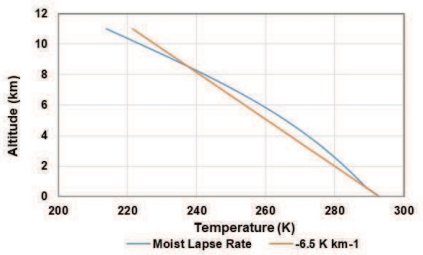


Abb. A6. Die in den Berechnungen der atmosphärischen Absorption verwendeten Temperaturabnahmen aus [23] .

Anhang B. Eine kurze Darstellung des strahlungsbedingten „Treibhauseffekts" in der Atmosphäre

Die Erdoberfläche empfängt eine Nettostrahlung von der Sonne, S_0 , von ungefähr $S_0 \simeq 240 Wm^{-2}$, siehe Fußnote b im Haupttext. Die Infrarotstrahlung von der Erdoberfläche, die LWIR, enthält eine Komponente, S_W , die in ihrem Spektrum begrenzt ist.
Bereich bis zum sogenannten „atmosphärischen Fenster" und eine zweite Komponente, S_{up} . Die zweite Komponente besteht aus einem kleinen Teil, $f' S_{up}$ $(f' \ll 1)$, der in den Weltraum abgestrahlt wird, und einem größeren Anteil, $(1 - f') S_{up}$,der von den sogenannten „Treibhausgasen", im Wesentlichen H_2O und CO_2 ,in der Atmosphäre absorbiert und anschließend teilweise wieder abgestrahlt wird
in den Weltraum, A_{up} , und teilweise zurück zur Oberfläche, A_{down} , emittiert wird, vgl. Abb. B1.

Der „Transmissionsparameter" f' , mit $0 \leq f' \leq 1$, wobei realistische Werte auf $f' \ll 1$ beschränkt sind, quantifiziert die Transmission der Strahlung der Erdoberfläche im Spektralbereich außerhalb des atmosphärischen Fensters. Vergleiche die unvollständige Sättigung der Absorption in Abb. 4a in Höhen von mehr als (ungefähr) 9 km.

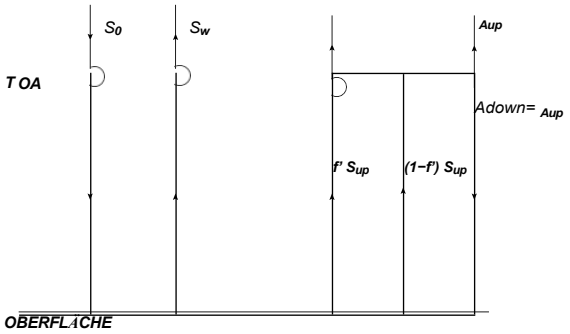


Abb. B1. Schematische Darstellung der Nettostrahlung der Sonne, $S_0 \simeq 240 Wm^{-2}$, der Infrarotstrahlung in den Weltraum durch das atmosphärische Fenster, S_W , der Infrarotstrahlung von der Oberfläche in den Weltraum $f' S_{up}$ und zur Atmosphäre $(1 - f') S_{up}$, wobei $f' \ll 1$, sowie die Strahlung von der Atmosphäre zum Weltraum $A_{(up)}$ und zur Oberfläche $A_{(down)}$.

Das globale Strahlungsgleichgewicht der Erde beruht auf der Gleichheit zwischen der Intensität der von der Sonne empfangenen kurzwelligen Strahlung, S_0,und der in den Weltraum abgegebenen Infrarotstrahlung, d. h.

$$S_0 = S_W + f' S_{up} + A_{up}. \tag{B.1}$$

Das Gleichgewicht in der oberen Atmosphäre (der oberen Grenze der Atmosphäre,

$$\text{TOA) erfordert } (1 - f')S_{up} = A_{up} + A_{down} = 2A_{up}, \tag{B.2}$$

wobei die Gleichheit der Aufwärts- und Abwärtsemission aus dem Treibhaus Gase wurden im zweiten Schritt verwendet. Aus (B.1) und (B.2) leiten wir die Strahlung von der Oberfläche, S_{up}, ab, die durch

$$S_{up} = \frac{2}{1+f'}(S_0 - S_W), \tag{B.3}$$

sowie die Strahlung von der TOA,

$$A_{up} = A_{down} = \frac{1-f'}{1+f'}(S_0 - S_W). \tag{B.4}$$

Sowohl S_{up} als auch A_{up} werden ausgedrückt als $S_0 - S_W$, d. h. als die Sonnenstrahlung nach Abzug der Strahlung S_W , die mit der Durchgang der Strahlung durch das atmosphärische Fenster.

Für *ein* gegebenes S_0 ergibt sich aus (B.3), dass die Gesamtemission der Oberfläche, $S_{tot,surf}\ (S_W, f')$ gegeben ist durch

$$S_{tot,surf}(S_W, f') = S_W + S_{up} = S_0 \left[\frac{2}{1+f'} - \frac{S_W}{S_0}\frac{1-f'}{1+f'}\right] \equiv S_0\, c\left(\frac{S_W}{S_0}, f'\right). \tag{B.5}$$

Unter Verwendung von (B.3) und (B.4) kann man die Gültigkeit des Gleichgewichts an der Oberfläche explizit überprüfen:

$$S_{tot,surf} = S_W + S_{up} = S_0 + A_{down} = S_0 + A_{up}. \tag{B.6}$$

Die Strahlung in den Weltraum an der TOA,

$$S_{tot,TOA}\ (S_W, f') = S_W + f' S_{up} + A_{up}, \tag{B.7}$$

Nach Einsetzen der Ergebnisse für S_{up} und für A_{up} aus (B.3) und (B.4) ergibt sich

$$S_{tot,TOA}\ (S_W, f') = S_0. \tag{B.8}$$

Das globale Strahlungsgleichgewicht (B.1) wird durch die Gleichheit der von der TOA emittierten Strahlungsintensitäten, $S_{tot,TOA}$, und der von der Sonne empfangenen Strahlungsintensitäten, S_0 ,erreicht.

Es wird aufschlussreich sein, unser Hauptergebnis, den Ausdruck für die Oberflächenstrahlung (B.5), für mehrere relevante Werte von S_W und f' bei festem $S_0 = 240 Wm^{-2}$ numerisch zu bewerten.

Unter der Annahme eines Planck-Schwarzkörperstrahlungsspektrums für die Oberflächenstrahlung (B.5) gilt

$$S_{tot,surf}\ (S_W, f') = \sigma\,(T_{surf}\ (S_W, f'))^4, \tag{B.9}$$

wobei $\sigma =\sim 5{,}670 \times 10^{\wedge -8}\ Wm^{\wedge -2}\ K^{\wedge -4}$, erhalten wir die zugehörige Oberflächentemperatur

$$T_{surf}\ (S_W\ ,f') = \frac{S0}{\sigma}\ \frac{2}{1+f'} - \frac{S_W}{S0}\frac{1-f}{1+f'}\ ,^{1\bar{4}}$$
$$= 255{,}069\ \ \overline{\frac{2}{1+f'} - \frac{S_W}{S0}\frac{1-f}{1+f'}}\ ,^{1\ 4}\ K$$
$$= 255{,}069c\ \ \overline{\frac{SW}{S0}}\ ,f'\ ^{\frac{1}{4}}\ K. \qquad \text{(B.10)}$$

Die Beziehungen (B.5) und (B.10) geben die Gleichgewichtsstrahlung und die Oberflächentemperatur für gegebene Werte von S_0 , S_W und f' an.

Die numerischen Ergebnisse für $S_{tot,surf}$ aus (B.5) und T_{surf} aus (B.10) für einige repräsentative Werte von S_W sind in Tabelle B1 zusammengefasst.

Tabelle B1. Numerische Ergebnisse für die gesamte Oberflächenstrahlung $S_{tot,surf}\ (S_W\ , f')$ gemäß (B.5) und für die Oberflächentemperatur $T_{surf}\ (S_W\ , f')$ gemäß (B.10).

$S_W\ [Wm^{-2}]\ (f')$	$c\ \frac{S_W}{S_0}\ , f'$	$S_{tot,surf}\ [Wm^{-2}]$	$T_{surf}\ [K]$
240 und/oder $f' = 1$	1,0	240	$255 = -18^0$ C
58 $(f' = 0{,}1)$	1,62	389	$288 = 15^0$ C
43 $(f' = 0{,}1)$	1,67	401	$290 = 17^0$ C
28 $(f' = 0{,}1)$	1,72	413	$292 = 19^0$ C
0 $(f' = 0{,}1)$	1,82	436	$296 = 23^0$ C
0 $(f' = 0)$	2,0	480	$303 = 30^0$ C

Wenden wir uns nun der Erörterung der Ergebnisse in Tabelle B1 zu, beginnen wir mit den Ergebnissen für den empirischen Input von $S_W = 43 \pm 15 Wm^{-2}$ oder $58 \geq S_W \geq 28 Wm^{-2}$, abgeleitet[8] aus meteorologischen Messungen der langwelligen Infrarotstrahlung (LWIR). Der Wert von $f' = 0{,}1$ folgt aus Tabelle 6 im Haupttext. An der Sättigungsgrenze (für einen CO_2-Gehalt von 300 ppm) erreicht die Absorption einen Wert von $A = 0{,}90$. Dies entspricht $(1 - f^{(\prime)})S_{(up)} = 0{,}90S_{(up)}$ oder $f^{(\prime)} = 0{,}1$. Die Ergebnisse für die Oberflächentemperatur $T_{(surf)}$, aus (B.10) gegeben durch $288 \leq T_{surf} \leq 292K$ oder 15^0 C bis 19^0 C, stimmen mit der sehr ausführlichen theoretischen Analyse in den Referenzen [4] und [10] übereinstimmen.

Der Fall $S_W = S_0 = 240 Wm^{-2}$ in der ersten Zeile von Tabelle B1 entspricht gemäß (B.3) und (B.4) $S_{up} = A_{up} = 0$. Dies ist der hypothetische Fall einer Atmosphäre, die eine direkte Gesamtemission von der Oberfläche in den Weltraum zulässt, d. h. keine Absorption und keine Treibhausgase. Vergleicht man $S_{(tot)}\ _{(surf)}$ $(S_{(W)} = S_{(0)}\ f^{(\prime)})$ mit (B.8), so erhält man die Identität

$$S_{totTOA}\ (S_W\ , f') = S_{totsurf}\ (S_W = S_0\ , f'). \qquad \text{(B.11)}$$

Die Infrarotstrahlung an der TOA, $S_{totTOA}\ (S_W\ ,\ f'\ ) = S_0$, entspricht der Oberflächenstrahlung einer nicht absorbierenden hypothetischen Atmosphäre[k] . Die zugehörige Temperatur ergibt sich aus $T_{TOA} = T_{surf} = 255K$. Der „Treibhauseffekt" der Atmosphäre, die „Treibhausgase" enthält, besteht darin, dass der Ursprung der ausgehenden Infrarotstrahlung (die für das Gleichgewicht mit der Strahlung der Sonne verantwortlich ist) von der Oberfläche zur TOA verlagert wird.

Die hypothetische Grenze von $S_W = 0$ und $f' = 0$ in der letzten Zeile von Tabelle B1 beschreibt den Fall eines hypothetischen „geschlossenen atmosphärischen Fensters", der vollständigen Absorption der emittierten Oberflächenstrahlung von $S_{(tot,surf)}\ (S(W) = 0$, f(') = 0) = 2S(0), was die maximal mögliche Gleichgewichtsoberflächentemperatur von T($_{surf)}$ = 303K = 30(0) [C]impliziert.

Eine Anmerkung zur Übereinstimmung unserer Ergebnisse mit der Strahlungs- und Energiebilanz Die Analyse in Ref. [4] ist angemessen. Trenberth et al. [4] verwenden $_0S' = 239\ Wm^{-2}$ als als Eingangswert für die Sonneneinstrahlung eine Gesamtoberflächenstrahlung von $S'_{tot\ surf} = 396Wm^{-2}$ cor-
entsprechend $T' = 289K = 16^0\ C$, übereinstimmend mit unserem Ergebnis aus Tabelle B1, $S_{totsurf} \simeq 401Wm^{-2}$ und $T = 17^0\ C$. Die Übereinstimmung ist kein Zufall, sondern lässt sich wie folgt erklären.

Gemäß Ref. [4] wird in unserer Notation die Abwärtsstrahlung durch $A'_{down} = 333Wm^{-2}$. Bezieht man die Menge von $78Wm^{-2}$ [4] der von der Atmosphäre absorbierten Sonnenstrahlung in die von der Oberfläche absorbierte Sonnenstrahlung ein, erhält man effektiv
$A''_{down} = 333 - 78 = 255\ Wm^{-2}$. Thermik und Verdunstung belaufen sich auf $97\ Wm^{-2}$ [4]. Aus unserer Sicht sollten sie als unabhängig von der
Strahlungsbilanz. Der Wert von 97 Wm^{-2} quantifiziert die Energieumwandlung einer adiabatischen Wärmekraftmaschine, die zwischen den Temperaturen $T = 289\ K$ an der Oberfläche und $T = 255\ K$ an der TOA arbeitet. Die Wärmekraftmaschine, die im Gravitationsfeld der Erde arbeitet, wandelt ausschließlich kontinuierlich die innere Energie der Luft bei T = 289 K in potenzielle Energie bei T = 255 K um und umgekehrt. Dieser Prozess hat keinen
die Strahlungsbilanz und dementsprechend wird $A'_{down} = 333\ Wm^{-2}$ auf
$A'''_{ab} = 333 - 78 - 97 = 158\ Wm^{-2}$, ein Wert, der mit $A_{down} = 161\ Wm^{-2}$
aus (B.4).

Die von Trenberth et al.[4] ermittelte Strahlungsbilanz lässt sich dementsprechend auf die einfache Darstellung in Abb. C1 reduzieren, die die wesentlichen Merkmale des Treibhauseffekts enthält.

Wir wenden uns nun der Veränderung der Oberflächenstrahlung bei einer Verdopplung des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre und der damit verbundenen Veränderung der Oberflächentemperatur ΔT zu, die in Abschnitt 3 des Haupttextes behandelt wird.

Für eine kleine Änderung des Parameters $f' \rightarrow f' + \Delta f'$, mit $S_W = konstant$, aus (B.5) und (B.6) finden wir

$$\frac{dS_{up}\ (S_W\ ,f')}{df'} = \frac{dStot,\ surf\ (sw, f')}{df'} = -\frac{2(S_0 - S_W)}{(1+f')^2}\ , \qquad \text{(B.12)}$$

[k] Entsprechend kann die nicht absorbierende Atmosphäre beschrieben werden, indem $f' = 1$ in (B.5) eingesetzt wird, wobe uf $S_{totsurf}\ (S_W\ , f' = 1) = S_0$ und $A_{up} = A_{down} = 0$ gemäß (B.4) impliziert.

oder

$$\Delta f' = -\frac{(1+f')^2}{2(S_0 - S_W)}\,\Delta S_{up} = -\frac{(1+f')^2}{2(S_0 - S_W)}\,\Delta_{2\times CO_2}\,, \qquad \text{(B.13)}$$

wobei $\Delta S_{up} = \Delta S_{tot,surf} = \Delta_{2\times CO_2}$ aufgrund der Verdopplung von CO_2 in den zweiten Schritt eingefügt. Der negative Wert von $\Delta f' < 0$ für $\Delta_{2\times CO} > 0$ impliziert weniger direkte Strahlung in den Weltraum und damit einen Anstieg der Oberflächentemperatur, $\Delta T > 0$.

Für die Änderung der Oberflächentemperatur T_{surf} erhalten wir aus (B.10)

$$\Delta T = \frac{dT}{df'}df' = -\frac{T_{surf}}{4}\,\frac{2\left(1-\frac{S_W}{S_0}\right)}{2(1+f') - \frac{S_W}{S_0}(1-f')}\,(\Delta)\;(f)\;'\,(=)\,\frac{T_{surf}\;\Delta 2\times CO_2}{S_{tot,\,surf}(s_W, f')}\,, \qquad \text{(B.14)}$$

wobei $\Delta f'$ aus (B.13) im letzten Schritt eingefügt wurde. Der aus der Einfügung resultierende Ausdruck wurde vereinfacht, um den Ausdruck für $S_{tot,surf}\;(S_W\,, f')$ in (B.5) im Nenner von (B.14) zu erhalten.

Die Übereinstimmung von ΔT in (B.14) mit ΔT in (3.3) des Haupttextes ist nicht überraschend. Wir weisen jedoch darauf hin, dass die vorliegende Herleitung von (B.14), die sich auf (B.5) und
(B.10) gewährleistet das Strahlungsgleichgewicht an der Erdoberfläche und an der TOA für beliebige Werte von $S_0\,, S_W\,, f'$ undinsbesondere für $f' \to f' + \Delta f'$. In geringfügiger Abweichung von der vorliegenden Herleitung von (B.14) haben wir uns in (3.3) auf die Wiederherstellung von
Gleichgewicht bei Verdopplung$_{\text{des}}$ $CO_{(2)}$-Gehalts. Bemerkenswert ist außerdem, dass T_{surf} in (B.10) und ΔT in (B.14) aus den empirisch bekannten Werten von $S_0\,, S_W$ und f' vorhergesagt werden, während T_{surf} in (3.3) als Eingabeparameter verwendet wurde.

Tabelle B2. Numerische Ergebnisse für die gesamte Oberflächenstrahlung $S_{tot,surf}\;(S_W\,, f')$ gemäß (B.5) und die Oberflächentemperatur gemäß (B.10) sowie die Temperaturdifferenz, die ebenfalls aus (B.14) abgeleitet wurde.

S_W [Wm^{-2}] (f')	$c\;\frac{S_W}{S_0}, f'$	$S_{tot,surf}$ [Wm^{-2}]	T_{surf} [K]
43	1,67159	401,182	290,028
$(f' = 0{,}100)$			
43	1,68250	403,800	290.500
$(f' = 0{,}092015)$			
		$\Delta S_{up} = \Delta_{2\times CO_2} = 2{,}6$	$\Delta T = 0{,}47$

Die numerischen Ergebnisse in Tabelle B2 basieren auf den Eingabeparametern S_0 $= 240\ Wm^{-2}$ und $S_W = 43 Wm^{-2}$ sowie $f' = 0{,}1$ und $f' = 0{,}1 + \Delta f' = 0{,}092015$, , die durch Auswertung von (B.13) für $\Delta_{2\times CO_2} = 2{,}6\ Wm^{-2}$ aus Tabelle 6 erhalten wurden.

In einem ersten Schritt haben wir nach Auswertung von (B.5) und (B.10) die Oberflächenstrahlung und Oberflächentemperatur ermittelt, die in der zweiten und dritten Zeile von Tabelle B2 aufgeführt sind. Die Subtraktion der beiden Oberflächentemperaturen voneinander ergibt dann
$\Delta T = 0{,}47\ K$, wie in der letzten Zeile von Tabelle B2 angegeben. In einem zweiten Schritt bestätigen wir

$\Delta T = 0{,}47\,K$[1] durch Auswertung von (B.14) entweder durch Einsetzen *von* Δf aus (B.13) oder durch direktes Einsetzen von $\Delta_{2\times CO_2} = 2{,}6\,Wm^{-2}$.

Referenzen

1. A. Schack, *Phys. Blätter* 28 26 (1972).
2. A. Schack, *Der industrielle Wärmeübergang* (Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf, 1. Auflage 1929, 8. Auflage 1983).
3. F. Gervais, Internat. Journal of Mod. Phys. B 28, 1450095 (2014);
   F. Gervais, *L'urgence climatique est un leurre* (Editions de l'Artilleur, 75008 Paris, 2018).
4. K.E. Trenberth, J.T. Fasullo und J. Kiehl, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90 311 (2009).
5. HITRAN-Datenbank.
6. Peng-Shen Wei et al., *Heliyon* 4, e00785 (2018).
7. R. Clark, Ventura Photonics, private Mitteilung, siehe Anhang A.
8. R. Clark, *Energy and Environment* 24, 319 und 341 (2013), Ventura Photonics Monograph VPM 005 (2019).
9. G.V. Chilinger et al., *Atmospheric and Climate Sciences* 4, 819 (2014);
   O.G. Sorokhatin et al., *Globale Erwärmung und globale Abkühlung: Entwicklung des Klimas auf einer Erde mit en* (Elsevier 2007).
10. H. Harde, *Internat. Journal of Atmospheric Sciences* 2017, Artikel-ID 9251034.
11. *Fünfter Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimawandel (IPCC), AR5*, hrsg. von T.F. Stocker et al., Climate Change 2013; The Physical Science Basis, (Cam- bridge University Press, New York, NY, USA, 2014).
12. F. Gervais, *Earth Sciences Reviews* 155, 129 (2016).
13. R.S. Lindzen, M.-D. Chou und A.Y. Hou, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 82, 417 (2001).
14. R.S. Lindzen und Y.-S. Choi, *Geophys. Res. Lett.* 36, L16705 (2009).
15. B.R. Barkstrom, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 65, 1170 (1984).
16. B.A. Wielicki et al., *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1127-1141 (1998).
17. E.-S. Chung, B.J. Soden, B.-J. Sohn, *Geophys. Res. Lett.* 37, L10703 (2010).
18. D.M. Murphy et al., *Geophys. Res. Lett.* 37, L09704 (2010).
19. K.E. Trenberth, J.T. Fasullo, C. O'Dell und T. Wong, *Geophys. Res. Lett.* 37, L03702 (2010).
20. R.S. Lindzen und Y.-S. Choi, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 47 (4), 377 (2011).
21. J.R. Bates, *Earth and Space Science* 3, 207 (2016).
22. J. Kauppinen und P. Malmi, „No experimental evidence for the significant anthro pogenic climate change" (Keine experimentellen Belege für einen signifikanten anthropogenen Klimawandel), arXiv: 1907.00165v1 [physics.ao-ph].
23. A. A. Tsonis, *Atmospheric Thermodynamics* (2. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge, Großbritannien, 2007).

[1]Die Diskrepanz zwischen $\Delta T = 0{,}47\,K$ in Tabelle B2 und $\Delta T = 0{,}46\,K$ in Tabelle 8 des Haupttextes ist auf die unterschiedliche Eingabe von $T = 293\,K$ im Haupttext zurückzuführen.