

Experimentelle Verifikation des Treibhauseffektes – 4. Mitteilung: die erdnahe CO₂-Strahlung

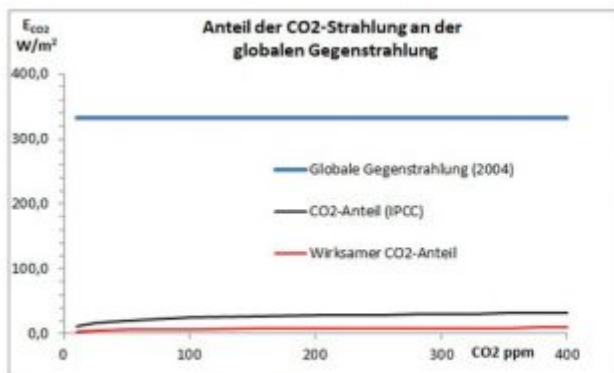
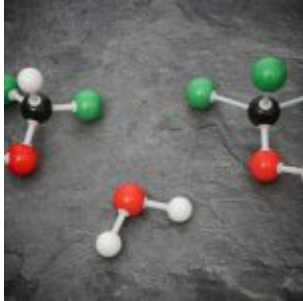


Abb. 1: Die erdnahe CO₂-Strahlung

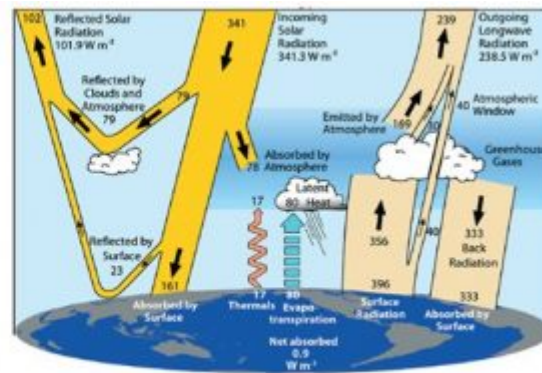


Abb. 2: Globale Energiebilanzen in W/m² nach K.E. Trenberth [1]

Dabei ist selbst dieser kleine Wert immer noch zu hoch. CO₂ ist nicht der einzige Strahler der Atmosphäre. Wasserdampf, die nicht sichtbaren Aerosole und vor allem die Wolken sind weitere Akteure der atmosphärischen Gegenstrahlung, die sich gegenseitig kontrollieren und verringern (Abb. 21). Es ist bereits bekannt, dass sich die CO₂- und Wasserdampf-Strahlungen teilweise überlagern, was in feuchter Luft den CO₂-Beitrag verringert [6], [7]. Die Wechselwirkung mit den Wolken/Aerosolen ist ein weiterer, weitaus wirksamerer Dämpfer der CO₂-Wirkung. Würde das IPCC auch diese Strahlungskonkurrenten berücksichtigen, wäre der tatsächliche CO₂-Treibhauseffekt rund 10 W/m² oder 3 % der globalen Gegenstrahlung (Abb. 1, rote Kurve).

Bei einem so geringen CO₂-Anteil muss man sich schon fragen, ob das Klima wirklich von CO₂ bedroht wird und wie die atmosphärische Gegenstrahlung überhaupt zu verstehen ist. Das Prinzip von Vorder- und Hintergrundstrahlung ist ein neuer Ansatz, die Aktionen verschiedener atmosphärischer Strahlungsquellen besser zu verstehen. Dieses Anliegen zieht sich wie ein roter Faden durch die Publikationsreihe „Experimentelle Verifikation des Treibhauseffektes“. Im Folgenden wird eine CO₂-Strahlungsformel, ausgehend von J. Stefans Erkenntnissen [8] und auf der Grundlage der eigenen Laborexperimente, Schritt für Schritt abgeleitet. Danach ergibt sich eine weitaus geringere CO₂-Wirkung als vom IPCC angenommen (Kap. 4, Seite 9).

1. Einführung

Anfang des 19. Jahrhunderts suchten verschiedene Forschergruppen einen mathematischen Zusammenhang zwischen Temperatur und IR-Strahlung eines Körpers. Unter anderen Dulong und Petit, die die Abkühlung eines heißen Thermometers (200 – 300 °C) in einem kalten Vakuumgefäß verfolgten (Abb. 3) [9]. Sie entwickelten eine einfache Formel, die hinreichend genau die zeitliche Abkühlung des Thermometers wiedergab. Die Gleichung versagte jedoch, wenn wesentlich heißere Körper, wie die der Sonne, berechnet werden sollten.

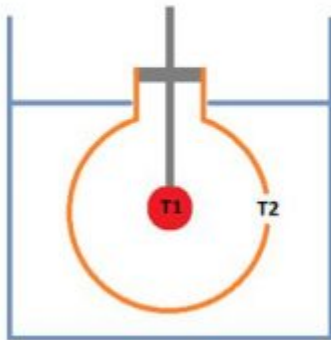


Abb. 3: Abkühlung eines heißen Thermometers T1 in einem gekühlten Kupfergefäß T2, nach Dulong und Petit (8)

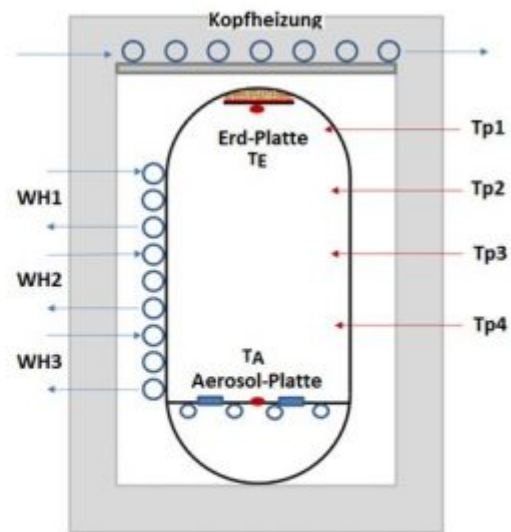


Abb. 4: Eigene Apparatur mit Erd-Platte T_E und Aerosol-Platte T_A

Josef Stefan überprüfte die Versuche von Dulong und Petit und anderer Forschergruppen und konnte rein empirisch Gl. 1 ermitteln, womit die Wärmeübertragung P paralleler Oberflächen, auch bei sehr hohen Temperaturen, berechnet werden konnte [8]. Stefan brauchte den sogenannten Strahlungsaustauschgrad „E“ für blanke, also reflektierende Oberflächen (Emissionsgrad $\epsilon \ll 1$). Geht man aber von einer Schwarz-Körper-Strahlung mit $\epsilon = 1$ aus, wird auch $E = 1$ und wir haben mit Gleichung Gl. 2 den Vorläufer des Stefan-Boltzmann-Gesetzes (Gl. 3) vor uns, das von Ludwig Boltzmann 1884, einem Schüler von Stefan, theoretisch abgeleitet wurde [10].

Gl. 1: $P = \sigma \cdot A \cdot E \cdot (T_1^4 - T_2^4)$, $E = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$, A = Fläche, ϵ = Emissionsgrad, E = Strahlungsaustauschgrad

Gl. 2: $P = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$, $P = (\sigma \cdot A \cdot T_1^4) - (\sigma \cdot A \cdot T_2^4)$, $\epsilon = 1$, $\sigma = 5,670367 \cdot 10^{-8}$, P = Energieverlust

Gl. 3: $M = \sigma \cdot A \cdot T^4$, Stefan-Boltzmann-Gesetz, $\epsilon = 1$, M = Ausstrahlung eines Schwarz-Körpers

Mit Gl. 2 legt Stefan die Grundlage für die Berechnung des Treibhauseffektes. Die Abkühlung des Thermometers (Energieverlust) hängt sowohl von der Temperatur T1 als auch von T2 ab, also von der Differenz zwischen Ausstrahlung des Thermometers und Gegenstrahlung der Kupferwand.

Will man den CO₂-Treibhauseffekt nach Gl. 2 experimentell untersuchen, benötigt man zwei schwarze Flächen mit einem ausreichenden Temperaturunterschied ($T_1 \gg T_2$). Die eigene Apparatur mit einer warmen Erd- und einer kalten Aerosol-Platte erfüllt diese Voraussetzung. Der Versuchsaufbau (Abb. 4) zeigt eine große Ähnlichkeit mit dem Kupfergefäß von Dulong und Petit, nur dass der Abstand zwischen Erd- und Aerosol-Platte vergrößert wurde. Dadurch entsteht nicht nur ein Luftraum für die potentielle Zugabe von IR-aktiven Gasen, sondern auch eine dritte Strahlungsfläche, die Seitenwand, die einen wesentlichen Einfluss auf die Gegenstrahlung hat. Um das zu verstehen, wird ein sehr einfaches Schema der Gegenstrahlung vorgestellt, das mit roten (warm = T_V) und blauen (kalt = T_H) Farben Strahlungsquellen unterschiedlicher Temperaturen angibt.

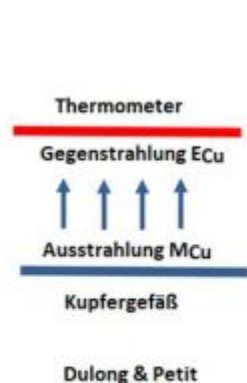


Abb. 5: Ohne Seitenwand
Gegenstrahlung: $E_{Cu} = M_{Cu}$

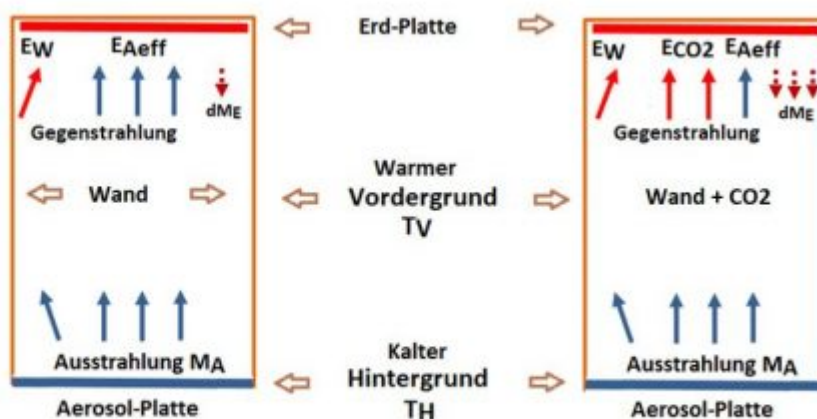


Abb. 6: Mit Seitenwand W
Gegenstrahlung: $E_W + E_{Aeff} > M_A$



Abb. 7: Mit Seitenwand W + CO₂
Gegenstrahlung: $E_W + E_{CO_2} + E_{Aeff} \gg M_A$

Abbildungen 6 und 7 zeigen die Veränderung der Gegenstrahlung, wenn zur warmen (rot) und kalten (blau) Fläche in Abb. 5 eine dritte Strahlungsquelle, die Seitenwand und CO₂, hinzukommt. Aus Sicht der Erd-Platte haben wir jetzt zwei Gegenstrahler, die als warmer Vordergrund (T_V , Seitenwand und CO₂) und kalter Hintergrund (T_H , Aerosol-Platte) definiert werden. Seitenwand und CO₂ absorbieren einen Teil der Aerosol-Platten-Strahlung (blaue Pfeile) und emittieren dafür eigene, energiereichere Strahlungen (rote Pfeile), entsprechend ihrer höheren Temperatur T_V (Abb. 6, 7). Der Eingriff von CO₂ hat vier Konsequenzen:

A: Erd-Platte: CO₂ erhöht die Gegenstrahlung (2 rote anstelle von 2 blauen Pfeilen). Dadurch kommt es zu einer verringerten Energieabgabe (Gl. 2) und es entsteht ein Wärmestau, wodurch sich die Erd-Platte solange erwärmt, bis Energieverlust und -gewinn wieder gleich sind (Abb. 8). CO₂ entnimmt die für die Strahlung erforderliche Energie ihrer Umgebung (siehe Punkte C und D). CO₂ ist **kein zusätzlicher Wärmeinput** für die Erde. Vergleichbar mit der Corioliskraft handelt es sich hier um eine Scheinwirkung.

B: Aerosol-Platte: Nicht alle Photonen der Aerosol-Platte erreichen die Erd-Platte (1 blauer Pfeil in Abb. 7). Dieser Bruchteil ist die effektive, von der Vordergrundstrahlung verdeckte, Strahlung der Aerosol-Platte E_{Aeff} [11]. Im Hintergrund ist die Aerosol-Platten-Ausstrahlung M_A jedoch ständig als latente Strahlung vorhanden.

C: Luft-Temperatur: Die Seitenwand und CO₂ verlieren Energie, da ihre

Emission E_w bzw. E_{CO_2} (rote Pfeile) größer als ihre Absorption (blaue Pfeile) ist, wodurch sich der Luftraum abkühlen müsste.

In einem bereits publizierten Demonstrations-Experiment [12], [11] wurden unter adiabatischen Bedingungen (ohne Wandheizung) die Auswirkungen von CO_2 (und anderen Treibhausgasen) untersucht. Dabei wurde eine deutliche Erwärmung der Erd-Platte beobachtet, während innerhalb der Röhre, an den Messstellen Tp1 – Tp4, die Temperaturen konstant blieben (Abb. 8 und 9). Die Konstanz der Luft-Temperatur erklärt sich durch den Ausstrahlungsanstieg dM_E der wärmer gewordenen Erd-Platte (braune gestrichelte Pfeile, Abb. 6 und 7), wodurch Erwärmungs- und Abkühlungseffekte gleich groß sind.

D: Energiebilanzen: Bei adiabatischer Versuchsdurchführung müssen Heizung Q_E (Input) und die auf die Aerosol-Platte übertragene Energie (Output) gleich groß sein (Energieerhaltungssatz), unabhängig von CO_2 . Um diese Gleichheit herzustellen, kann die trockene Erdoberfläche bei einem Wärmestau durch Treibhausgase mit einer Temperatur-Erhöhung reagieren (Abb. 8, Gl. 2). Ozeane und Feuchtgebiete können bei einem Wärmestau auch ohne IR-Strahlung die überschüssige Wärme durch Verdunstung von Wasser auf eine Wolkenschicht übertragen. Diese Wasser-Flächen würden sich nur wenig oder gar nicht erwärmen. Der CO_2 -Treibhauseffekt würde dann eine Abkühlung der Atmosphäre bewirken. Ließe sich das beweisen, würde es die CO_2 -Wirkung auf den Kopf stellen und die Wasserdampf-Rückkopplung ad absurdum führen! Eine experimentelle Untersuchung hierzu steht noch aus.

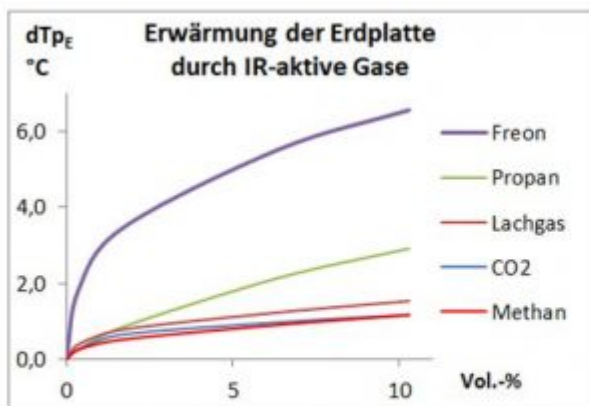


Abb. 8: Zugabe von Treibhausgasen bei konstanter Heizung Q_E ohne Wandheizungen (adiabatischer Strahlungstransport)

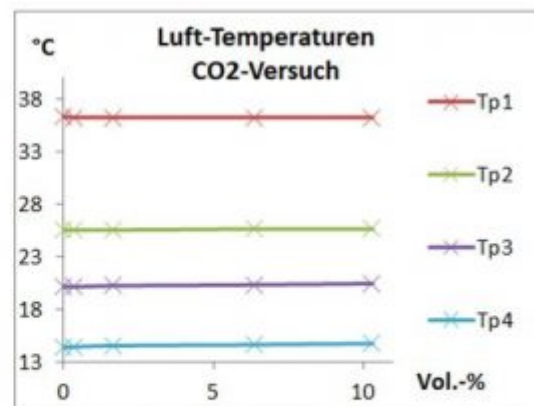


Abb. 9: Luft-Temperaturen an den Messstellen Tp1 – Tp4 vor und nach Zugabe von CO_2

Die Existenz einer effektiven Aerosol-Platten-Strahlung E_{Aeff} nach Punkt B) ließ sich experimentell beweisen (Abb. 10 und 11). Grundlage ist Gl. 4, die aussagt, dass bei konstanter Temperatur der Erd-Platte T_E (im thermisches Gleichgewicht) Energieverlust (Ausstrahlung M_E) und Energiezufuhr (Gegenstrahlung $E_A + E_w$ und Heizung Q_E) gleich groß sind. Wenn bei diesem Experiment (in Luft, ohne IR-aktive Gase) die Aerosol-Platte stufenweise abgekühlt wird, verringert sich die effektive Gegenstrahlung E_{Aeff} . Damit T_E konstant bleibt, muss nach jedem Abkühlungsschritt die Heizung Q_E erhöht werden. Trägt man Q_E über die Temperatur der Aerosol-Platte (als $T^4/10^8$) auf, erhält man als Trend eine Gerade (rot) mit dem Anstieg $dQ_E/dT_{Aeff} = -4,18$ (Abb. 10).

$$\text{Gl. 4} \quad M_E = E_{Aeff} + E_W + Q_E \quad E_{Aeff} = M_E - E_W - Q_E \quad \epsilon_{Aeff} = M_A/E_{Aeff}$$

In Gl. 4 sind M_E und E_W Konstanten, da ihre Temperaturen annähernd konstant bleiben. Heizung Q_E und die effektive Strahlung E_{Aeff} sind Variable und haben nach Gl. 4 den gleichen Anstieg aber ein umgekehrtes Vorzeichen. Der Anstieg dieser Geraden E_{Aeff} beträgt 4,18 und ist kleiner als die σ -Konstante (5,6703), die Stefan empirisch ermittelt hatte (Abb. 11, schwarze Gerade). Das Verhältnis beider Zahlen $4,18/5,67 = 0,74$ zeigt die Schwächung der Aerosol-Platten-Strahlung durch die im Vordergrund agierende Seitenwand, oder vereinfacht ausgedrückt, nur 74 % der Photonen der Aerosol-Platte erreichen die Erd-Platte [11]. Das Verhältnis von E_{Aeff}/M_A definiert den effektiven Emissionsgrad der Aerosol-Platten-Strahlung ϵ_{Aeff} .

Wenn Vorder- und Hintergrund die gleiche Temperatur ($T_V = T_H$) haben, ist $Q_E = 0$ (Abb. 10). Da man eine Gerade mit nur zwei Punkten konstruieren kann, lässt sich der Anstieg sogar aus einem einzigen Heizungswert Q_E mit der Bedingung $T_V > T_H$ durch Q_E/dT ermitteln (Einpunktkalibrierung). Diese Technik ist die Grundlage für die Bestimmung der CO_2 -Emissionsgrade (Kap. 2).

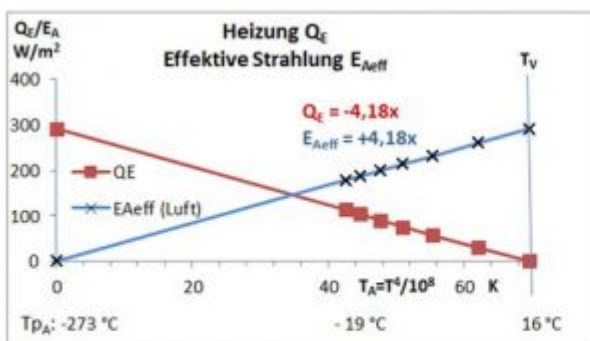


Abb. 10: Schrittweise Abkühlung der Aerosol-Platte T_A . Heizung Q_E (rot) und effektive Strahlung E_{Aeff} (blau)

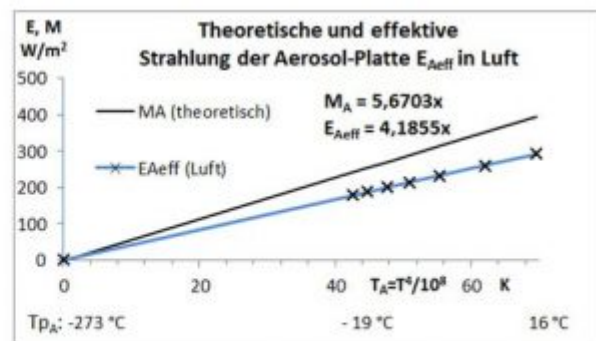


Abb. 11: Theoretische Strahlung (M_A) und effektive (E_{Aeff}) Strahlung der Aerosol-Platte

Das Abkühlungsexperiment zeigt, dass die Wirkung einer Vordergrundstrahlung E_V anhand der Heizung Q_E ermittelt werden kann. Voraussetzung ist eine Temperaturdifferenz zwischen warmem Vorder- und kaltem Hintergrund, denn bei gleicher Temperatur ($T_V = T_H$) ist $Q_E = 0$. Oder mit anderen Worten: Der Treibhauseffekt lässt sich nur vor einem kalten Hintergrund experimentell nachweisen. An dieser Anforderung sind alle bisherigen Labor-Experimente von Al Gore bis Wood gescheitert. Anstelle des Treibhauseffektes wurden andere physikalische Effekte (Verhinderung der Konvektion, Wärmeleitung oder Thermalisierung) beobachtet [13], [14], [15].

1.1 CO_2 -Emissionsgrade

Feste und flüssige Stoffe lassen sich durch einen durchschnittlichen Emissionsgrad ϵ charakterisieren, der nur durch die Art ihrer Oberfläche, glänzend oder rau/matt, beeinflusst wird. Bei Gasen ist das grundsätzlich nicht möglich, da ihre Strahlung auch von der Anzahl ihrer Teilchen (Masse) abhängig ist. Zur Charakterisierung der Teilchenzahl kann man Konzentrationsangaben (ppm oder Vol.-%) verwenden, solange Temperatur, Druck

und Volumen konstant sind. Bei der Erd-Atmosphäre ist das aber nicht der Fall. Die CO₂-Teilchenzahl /m³ nimmt jedoch mit steigender Höhe stark ab. Um die Experimente auf die CO₂-Strahlung der Atmosphäre übertragen zu können, werden zunächst aus den Versuchs-Konzentrationen (Vol.-%) mit Hilfe der idealen Gasgleichung die Anzahl der CO₂-Moleküle n (mol), die sich zwischen den 1,11 m entfernten Erd- und Aerosol-Platten bei einem Strahlungs-Querschnitt von 1 m² befinden, ermittelt (Gl. 5).

Gl. 5: $n = p \cdot V / (R \cdot T)$; $R = 8,314459 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $p = \text{Druck (Pa)}$, $V = 1,11 \cdot \text{Vol.-%} / 100 \text{ (m}^3\text{)}$, $T = \text{abs. Temperatur (K)}$

Um die CO₂-Strahlung zu ermitteln, wird die CO₂-Konzentration schrittweise erhöht und die Heizung Q_E solange verringert, bis die Erd-Platte exakt wieder die Start-Temperatur von +16,1 °C erreicht hat. Die veränderte Heizung Q_E zeigt dann die durch CO₂ verursachte Strahlungsverstärkung an. Da diese Verstärkung aber nur bei einer bereits vorhandenen, möglichst geringen Hintergrundstrahlung messbar ist, wird die Aerosol-Platte auf eine möglichst konstante Temperatur von -15 °C abgekühlt. Da die CO₂-Strahlung auch von der CO₂-Temperatur abhängt, muss der gesamte Luftraum eine einheitliche Temperatur haben (isotherme Versuchsbedingungen). Diese Aufgabe übernehmen die Wandheizungen WH1 bis WH3.

Die CO₂-Emissionsgrade lassen sich aus dem effektiven Emissionsgrad der Aerosol-Platten-Strahlung $\epsilon_{\text{Aeff}}(n)$ berechnen, da Vordergrundstrahler die effektive Strahlung des Hintergrundes verändern, wie in Kap. 1 abgeleitet wurde (Abb. 11). Dazu wird zunächst ein erster Wert (für $n = 0$, ohne CO₂) nach Gl. 6 ermittelt. Aus diesem Startwert wird dann der Emissionsgrad der Seitenwand ϵ_w bestimmt.

Gl. 6: $\epsilon_{\text{Aeff}}(0) = Q_E(0) / (dT \cdot 5,670367)$, $dT = T_V^4/10^8 - T_H^4/10^8$, $\epsilon_w = 1 - \epsilon_{\text{Aeff}}(\text{in Luft})$

Die Zugabe von CO₂ verringert die effektiven Emissionsgrade der Aerosol-Platte $\epsilon_{\text{Aeff}}(n)$, da jetzt zur Strahlung E_w die CO₂-Strahlung hinzukommt, was aus der jeweiligen Heizung $Q_E(n)$ berechnet wird (Gl. 7).

Da Seitenwand und CO₂ die gleiche Temperatur haben, tauschen sie untereinander keine Energie aus und können sich auch nicht gegenseitig schwächen, solange die Summe $\epsilon_w + \epsilon_{\text{CO}_2} < 1$ ist. Es wird deswegen angenommen, dass ϵ_w während eines Versuches konstant bleibt. Die CO₂-Emissionsgrade $\epsilon_{\text{CO}_2}(n)$ werden aus den effektiven Emissionsgraden $\epsilon_{\text{Aeff}}(n)$ und dem Emissionsgrad ϵ_w nach Gl. 7 berechnet.

Gl. 7: $\epsilon_{\text{Aeff}}(n) = Q_E(n) / (dT \cdot 5,670367)$; $\epsilon_{w+\text{CO}_2}(n) = 1 - \epsilon_{\text{Aeff}}(n)$; $\epsilon_{\text{CO}_2}(n) = \epsilon_{w+\text{CO}_2}(n) - \epsilon_w$

Die experimentelle Bestimmung der CO₂-Emissionsgrade mit der Versuchs-Apparatur hat gegenüber Rechenmodellen den großen Vorteil, dass sie alle Aspekte der komplexen CO₂-Strahlung (Einfluss der Rotationslinien, Luft-Temperaturen, Überlagerung mit der Wolken-Strahlung usw.) einschließt.

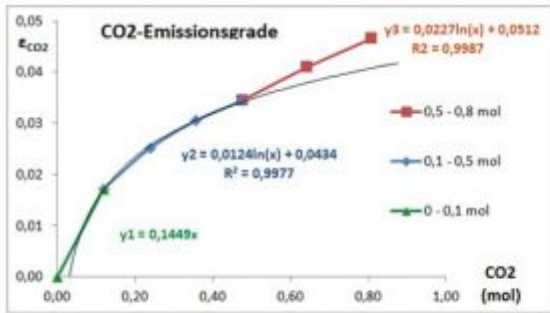


Abb. 12: Unterschiedliche Entwicklung der CO₂-Emissionsgrade bei Erhöhung der CO₂-Konzentration (Molmenge)

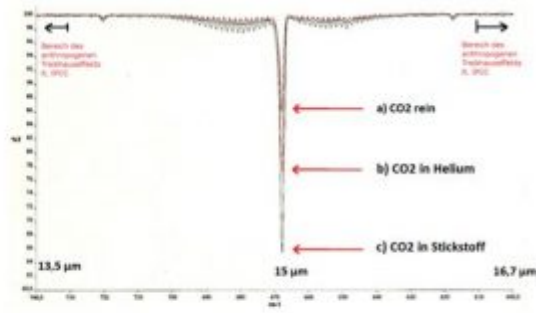


Abb. 13: Drei CO₂-Absorptionsspektren mit gleicher CO₂-Molmenge Konz.: a= 100 %, b, c = 3,5 % in He bzw. N₂ von H. Hug (16)

Die grafische Auswertung der CO₂-Emissionsgrade zeigt keinen einheitlichen Trend (Abb. 12). Der Verlauf der CO₂-Strahlung wird durch drei unterschiedliche Trendlinien (Y1, Y2 und Y3) charakterisiert. Auf den ersten Blick ein unbefriedigendes Ergebnis, aber dann entpuppt sich das Diagramm als eine Überraschung und eine kleine Sensation:

Trotz der sehr einfachen Apparatur lassen sich die Trendlinien Y1 und Y2 als das Ergebnis von Schwingungen (Y1) und Rotationen (Y2) des CO₂-Moleküls interpretieren!

Die Trendlinien geben die Strahlungsmöglichkeiten des CO₂-Moleküls wieder. CO₂ kann bei einer bestimmten Wellenlänge (Linie) keine höhere Strahlungsdichte erzeugen kann als ein Schwarz-Strahler bei gleicher Temperatur und Wellenlänge. Erreicht die CO₂-Strahlung einer bestimmten Wellenlänge den maximalen Wert, spricht man von einer Sättigung dieser Linie. Nun ist die CO₂-Valenzschwingung bei 15 µm wesentlich intensiver als die nach außen abflachenden CO₂-Rotationslinien (Abb. 13). Schon nach der ersten CO₂-Zugabe von 0,1 mol (1 Vol.-%, 2.500 ppm) ist die 15 µm Linie gesättigt und lässt sich behelfsmäßig durch eine lineare Funktion Y1 berechnen (behelfsmäßig, da zwei Datenpunkte zu wenig für eine korrekte Beschreibung sind). Der weitere Verlauf bis zu einer Molmenge von 0,5 mol CO₂ folgt aber sehr gut einer logarithmischen Funktion (Gl. 8.1). Dieser Verlauf von Y2 ist das eigentliche Ziel der Untersuchung. Hiermit lässt sich die weitere Progression der atmosphärischen CO₂-Strahlung auch oberhalb der derzeitigen 400 ppm ausrechnen.

$$\text{Gl. 8.1: } \epsilon_{\text{CO}_2}(n) = 0,0124 \cdot \ln(n) + 0,0434; \text{ für } c_{\text{CO}_2} < 1 \text{ Vol.-%}$$

$$\text{Gl. 8.2: } \epsilon_{\text{CO}_2}(n) = 0,0194 \cdot \ln(n) + 0,0481; \text{ für } c_{\text{CO}_2} > 1 \text{ Vol.-%}$$

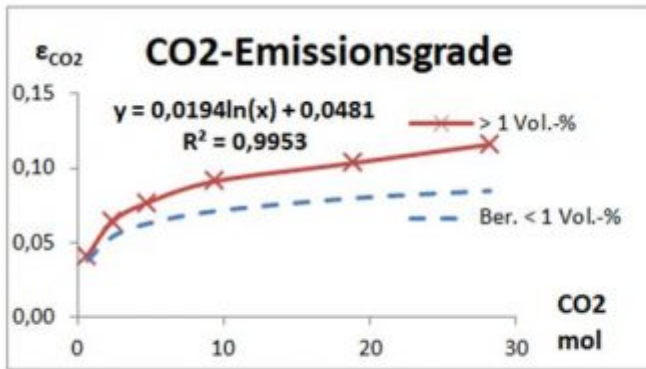


Abb. 14: CO₂-Emissionsgrade bei hohen Konzentrationen (rot) > 1 Vol.-% und Berechnung nach Gl. 8.1 (blau) für < 1 Vol.-%

Oberhalb von 1 Vol.-% (0,5 mol) endet der bis dahin logarithmische Verlauf der CO₂-Emissionsgrade und es tritt eine unerwartete Zunahme der CO₂-Strahlung mit der Trendlinie Y3 (rote Kure) auf. Ein Phänomen, das sich sehr gut reproduzieren ließ und bei allen untersuchten Treibhausgasen bei hohen Konzentrationen gefunden wurde. Ein Kontrollexperiment oberhalb von 1 % bis zu 60 Vol.-% CO₂ (30 mol) zeigt erneut einen logarithmischen Trend, nunmehr über den gesamten Bereich und mit einem etwas höheren Korrelationsfaktor (Gl. 8.2 und Abb. 14). Der auffällige Anstieg zwischen Y2 und Y3 konnte als Konzentrationseffekt geklärt werden. Da dieser Mechanismus sehr viel über die Strahlung der Treibhausgase aussagt, wird diesem Effekt ein eigenes Kapitel gewidmet.

1.2 Der CO₂-Konzentrationseffekt

Heinz Hug hatte bei der Bestimmung der CO₂-Absorption mit einem FT-IR-Spektrometer beobachtet, dass bei gleicher CO₂-Menge die Extinktion in Verdünnung mit IR-inaktiven Gasen (Helium bzw. Stickstoff) größer ist als beim reinen CO₂ (Abb. 13) [16]. Um den Effekt zu verstehen, muss man wissen, dass CO₂-Moleküle elektromagnetische Strahlung nur absorbieren, wenn sie sich im sogenannten Grundzustand befinden. Bei der IR-Bestrahlung werden die CO₂-Moleküle aber in den angeregten Vibration/Rotations-Zustand versetzt. Die Energieaufnahme (Schwächung des IR-Lichtes) würde nach kurzer Zeit zum Erliegen kommen, wenn alle CO₂-Moleküle in den angeregten Zustand übergegangen sind. Dass das nicht der Fall ist liegt daran, dass die angeregten CO₂-Moleküle nach sehr kurzer Zeit (Relaxationszeit) wieder in den Grundzustand zurückfallen und die aufgenommene Energie entweder durch Emission eines Photons oder durch Thermalisierung (Energieübertragung auf IR-inaktive Gasmoleküle oder die Küvettenwand) wieder abgeben. Letztendlich entsteht ein Gleichgewicht von angeregten und nicht angeregten Molekülen, was durch die Inertgase beeinflusst wird. Die Intensität einer Absorption ist demnach nicht nur von der formalen CO₂-Konzentration, sondern auch von diesem Anregungs-Verhältnis abhängig, was H. Hug durch sein Konzentrations-Experiment nachgewiesen hat.

Der angeregte Zustand kann jedoch auch durch Kollisionen der Gasmoleküle erfolgen. Auch ohne elektromagnetische Bestrahlung befindet sich dadurch ein Teil der CO₂-Moleküle im angeregten Zustand. Der Konzentrationseffekt findet seine Erklärung in der Art der Molekülkollisionen. In großer Verdünnung durch IR-inaktive Gase stoßen die CO₂-Moleküle ausschließlich mit den Inertgasen zusammen. Dabei wird die kinetische Energie entweder vom CO₂ oder vom Inertgas aufgenommen. Mit steigender CO₂-Konzentration steigt aber die

Wahrscheinlichkeit, dass zwei CO₂-Moleküle kollidieren, was ihre Anregungschance erhöht. Oder mit anderen Worten, mit steigender CO₂-Konzentration steigt die Zahl der angeregten CO₂-Moleküle: A) durch die Zunahme der Konzentration (Anzahl der CO₂-Moleküle) und B) durch die höhere Anregungschance. Die angeregten CO₂-Moleküle können durch eine spontane bzw. induzierte Emission in den Grundzustand zurückfallen und die freiwerdende Energie in Form von Photonen abgeben, was die höhere CO₂-Emission mit der Trendlinie Y3 (Abb. 12) erklärt. Die quantitative Auswirkung des Konzentrationseffektes zeigt Abb. 14 als Abstand zwischen blauer (gemessener) Kurve für hohe CO₂-Konzentrationen und rote Strichpunktcurve (gerechnet) für kleine CO₂-Konzentrationen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei CO₂-Konzentrationen > 1 Vol.-% die Zahl der angeregten CO₂-Moleküle überproportional ansteigt, was bei den Absorptionsspektren zu einer Schwächung der Absorption (Abb. 13), aber bei den CO₂-Strahlungs-Experimenten (Abb. 12) zu einem Anstieg der Emission führt.

Was bedeutet diese Erkenntnis? Auf das atmosphärische CO₂ ist der Effekt nicht anwendbar, da hier die Konzentration mit rund 0,04 Vol.-% weit unterhalb der kritischen Schwelle von 1 Vol.-% liegt. Im Folgenden wird deswegen der CO₂-Emissionsgrad nur mit Formel 8.1 berechnet. Beim Wasserdampf, der in der erdnahen Atmosphäre bis zu 4 Vol.-% erreichen kann, könnte ein Konzentrations-Effekt von Bedeutung sein.

2. Die CO₂-Strahlungsformel

Die CO₂-Emissionsgrade wurden aus den experimentell ermittelten CO₂-Strahlungen unter Einbeziehung der Temperaturen für den Vorder- und Hintergrund ermittelt. Es liegt deswegen nahe, diese Prozedur einfach umzudrehen und die effektive CO₂-Strahlung aus den mol-abhängigen CO₂-Emissionsgraden $\epsilon_{\text{CO}_2}(\mathbf{n})$ mit den Temperaturen für den Vorder- und Hintergrund zu berechnen. Dabei ist die CO₂-Strahlung E_{CO_2} der tatsächliche, wirksame CO₂-Beitrag zur Bestrahlung der Erde von 1 m², die sogenannte Strahlungsverstärkung einer bereits vorhandenen Hintergrundstrahlung. Die effektive CO₂-Strahlung hängt von der CO₂-Temperatur, CO₂-Molmenge und der Temperatur der Wolken/Aerosole ab. Wird die CO₂-Strahlung ohne Hintergrund ($T_{\text{H}} = 0$) gerechnet, bedeutet E_{CO_2} die theoretische, maximal mögliche CO₂-Strahlung.

$$\text{Gl. 9. } E_{\text{CO}_2}(\mathbf{n}) = \epsilon_{\text{CO}_2}(\mathbf{n}) \cdot \sigma \cdot (T_{\text{V}}^4/10^8 - T_{\text{H}}^4/10^8)$$

Diese empirisch abgeleitete Gleichung ist nahezu identisch mit Stefans Gl. 2 für den Wärmeverlust des heißen Thermometers, nur dass jetzt noch die CO₂-Emissionsgrade $\epsilon_{\text{CO}_2}(\mathbf{n})$ hinzugekommen sind. Mit den Gleichungen 9/8.1 bzw. 9/8.2 lassen sich jetzt die CO₂-Strahlungen der Labor-Experimente berechnen. Berechnete und gemessene Werte zeigen eine gute Übereinstimmung (Abb. 15 und 16).

Die Relativität der CO₂-Strahlung, also die Strahlungsverstärkung einer bereits vorhandenen Hintergrundstrahlung, wird in Gl. 9 durch die Temperaturdifferenz T_v (CO₂) und T_h (Wolken/Aerosole) ausgedrückt. Dabei ist T_v die Luft-Temperatur der erdnahen Luftschicht und T_h ist die Strahlungstemperatur der Wolken/Aerosole (in Kelvin), die sich mit einem Pyrgeometer im atmosphärischen Fenster bei rund 10 µm messen lassen. Bei tiefen Wolken oder bei Nebel, wenn T_h = T_v ist, wird der Ausdruck (T_v⁴/10⁸ – T_h⁴/10⁸) null und CO₂, egal in welcher Konzentration, verliert seinen Treibhauseffekt.

Messungen der Hintergrund- und Luft-Temperaturen in Berlin (2016 bis 2017) ergaben bei wolkenfreiem Himmel einen Temperaturunterschied von 40 °C und bei bedecktem Himmel 8 °C [12]. Natürlich sind diese Messungen nicht repräsentativ für die Erde, aber sie geben eine Vorstellung mit welcher Minderung der theoretischen CO₂-Strahlung zu rechnen ist, wenn eine Hintergrundstrahlung berücksichtigt wird (Tab. 1).

Tab. 1: Die wirksame CO₂-Strahlung in Prozent zur theoretischen Strahlung (Luft = 15 °C)

Temperatur-Differenz von Vordergrund und Hintergrund					
0 °C	8 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
Wirksame CO ₂ -Strahlung					
0%	11%	13%	25%	36%	45%

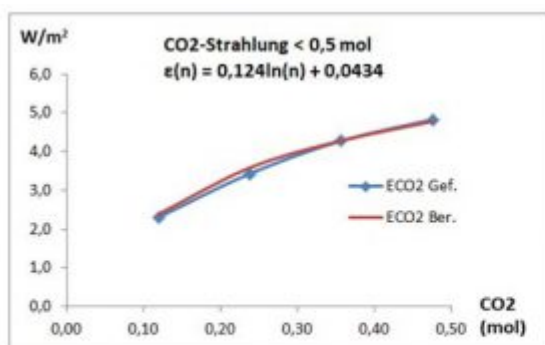


Abb. 15: Berechnete und gefundene CO₂-Strahlungswerte nach Gl. 9/8.1

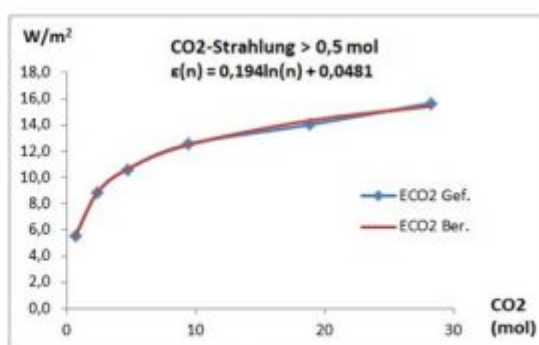


Abb. 16: Berechnete und gefundene CO₂-Strahlungswerte nach Gl. 9/8.2

2.1 Die atmosphärische CO₂-Strahlung

Klimatologen berechnen die atmosphärische CO₂-Strahlung mit komplizierten Rechenmodellen, wobei zunächst viele Hundert Linien eines hoch aufgelösten CO₂-Spektrums bewertet werden (Abb. 17). Anschließend werden mit den Temperaturen von Troposphäre, Tropopause und Stratosphäre Strahlungsgleichgewichte dieser gewichteten Linien berechnet. Ein gewaltiger Aufwand, den Normalbürger weder verstehen noch nachvollziehen können. Vielleicht aus diesem Grunde haben Ramaswamy et al. [2] mit den erhaltenen Werten für die CO₂-Gegenstrahlung eine einfache Beziehung zwischen CO₂-Konzentration und -Strahlung, dem sogenannten Strahlungsantrieb dF, aufgestellt (Gl. 10). Das Konzept des Strahlungsantriebes geht von der These aus, dass sich die Welt in einem sensiblen, thermischen Gleichgewicht befindet, das schon durch kleinste Veränderungen, durch eine Kraft (dF) aus

dem Gleichgewicht gebracht werden kann. Eine leicht messbare Veränderung ist die CO₂-Konzentration, die seit 1750 (Beginn der Industrialisierung) kontinuierlich von 278 bis auf heutige 400 ppm zugenommen hat. Mit Gl. 10 wird nun nach Ramaswamy die zusätzliche CO₂-Strahlung dieser Konzentrationszunahme berechnet.

Gl. 10: $dF = 5,35 \cdot \ln(c/c_0)$ in W/m^2 , $c_0 = 278$ ppm

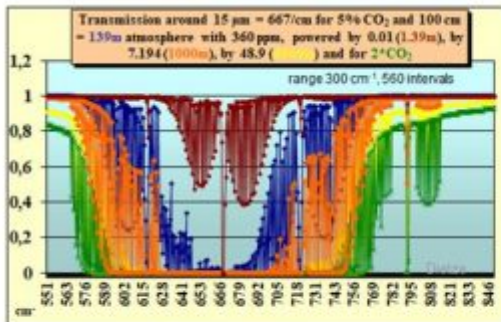


Abb. 17: Hochaufgelöste CO₂-Spektren nach P. Dietze (7)

CO ₂		dF
c	c ₀ = 278	
ppm	ln(c/c ₀)	W/m ²
278	0,00	0,00
300	0,08	0,41
325	0,16	0,84
350	0,23	1,23
375	0,30	1,60
400	0,36	1,95

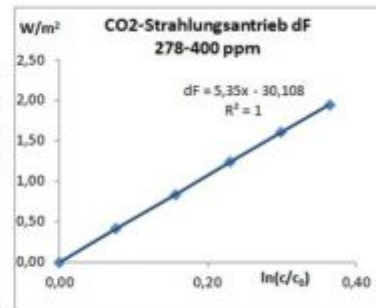


Abb. 18: Zunahme des CO₂-Strahlungsantriebs von 1,95 W/m² seit 1750 nach IPCC-Gl. 10

Die Rechnung verschleiert jedoch die absolute CO₂-Strahlung und den tatsächlichen CO₂-Anteil an der globalen Gegenstrahlung, die sich jedoch wie folgt aus Gl. 10 ableiten lassen. Hierzu wird der Strahlungsantrieb dF für die CO₂-Konzentrationen von 278 bis 400 ppm nach Gl. 10 ausgerechnet und als ln(c/278) in einem Excel-Diagramm aufgetragen (Abb. 18). Mit Hilfe der Trendlinie wird für x = 0 (278 ppm CO₂) ein Wert von minus 30,108 erhalten. Damit kann man die CO₂-Strahlung für das Jahr 1750 zu 30,11 W/m² ermitteln. Durch Addition dieses Wertes zu Gl. 10 erhält man Gl. 11, mit der sich nun die absolute CO₂-Strahlung berechnen lässt. Danach erzeugen 400 ppm CO₂ eine Gegenstrahlung von 32,1 W/m² (30,11 + 1,95) oder 9,6 % der globalen Gegenstrahlung von 333 W/m² (Abb. 1, 19).

Gl. 11: $E_{CO_2} = 5,35 \cdot \ln(c/278) + 30,11$ W/m²

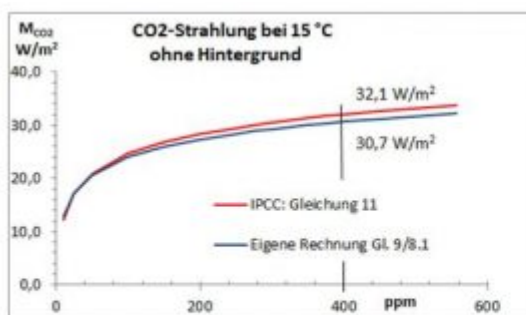


Abb. 19: Theoretische CO₂-Strahlung nach IPCC-Gl. 11 und nach Gl. 9/8.1 ohne Hintergrundstrahlung

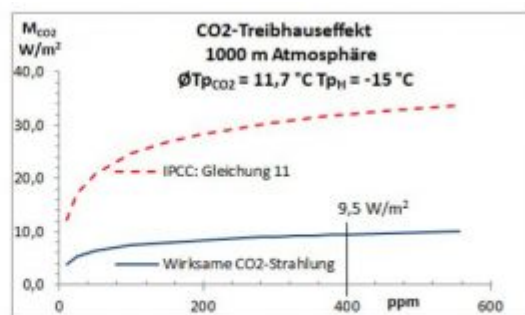


Abb. 20: Wirksame CO₂-Strahlung nach Gl. 9/8.1 unter Wolken/Aerosol-Strahlung und CO₂-Strahlung nach IPCC-Gl. 11

Kiehl und Trenberth geben für CO₂ einen Anteil an der Gegenstrahlung (ohne Wolken) von 9 bis 26 % an [17]. Die kleinere Zahl steht für die Mischung von CO₂ mit anderen Treibhausgasen und die größere Zahl für reines CO₂. Die Angabe von 9 % CO₂ deckt sich mit obiger Rechnung nach IPCC-Gleichung 11,

aber sie führt auch zu einem Konflikt, da mit diesem kleinen CO₂-Wert die Gegenstrahlung von die 333 W/m² nicht erklärt werden kann. Für Wasserdampf geben die gleichen Autoren einen Anteil von 36 – 70 % an. Rechnet man mit den kleineren Zahlen (9 und 36 % für Gasmischungen), haben Wasserdampf und CO₂ nur einen Gesamtanteil von 45 % an der atmosphärischen Gegenstrahlung. 55 % oder 183 W/m² stammen demnach nicht von diesen Treibhausgasen, sondern von den Wolken/Aerosolen (und einigen Spurengasen). Ein eklatanter Widerspruch zu dem angeblichen Wolken-Treibhauseffekt von nur 30 W/m² [3].

Nun lässt sich die CO₂-Strahlung ja auch mit der experimentell gefundenen Gl. 9/8.1 berechnen. Bei einer Rechnung unter Normalbedingungen aber ohne Hintergrund (siehe weiter unten) erhält man eine Strahlungskurve (blau), die mit der IPCC-Kurve (rot) erstaunlich gut übereinstimmt (Abb. 19, Tab. 2). Die gute Übereinstimmung ist eine weitere Bestätigung, dass 400 ppm CO₂ bei 15 °C tatsächlich nur eine Strahlung von 31 – 32 W/m² erzeugen, wenn die Wolken/Aerosol-Strahlung ausgeklammert wird.

Berücksichtigt man jedoch die Strahlung der Wolken/Aerosole, kommt es zu einer weiteren Verminderung der wirksamen CO₂-Strahlung von 32 auf nunmehr 9,5 W/m² (3 % der globalen Gegenstrahlung). Man erhält diesen Wert, wenn in Gl. 9/8.1 für den Hintergrund eine realistische Temperatur von -15 °C (statt -273 °C, ohne Hintergrund) eingesetzt wird. Diese Minderung der CO₂-Strahlung entsteht dadurch, da CO₂ die gleichen Wellenlängen nutzt, die auch Wolken/Aerosole aussenden, wodurch eine vorzeitige Sättigung eintritt. Die gemeinsame Strahlung regelt sich nach dem Prinzip der Vorder- und Hintergrundstrahlung. Demnach erhält die Erde auch ohne Treibhausgase bereits durch die Hintergrundstrahlung der Wolken/Aerosole eine Gegenstrahlung von rund 275 W/m² [4]. Die Anwesenheit von CO₂ (32 W/m²) und Wasserdampf (0,36 • 333 = 120 W/m²) als Vordergrundstrahler führt zu einer Überlagerung mit der bereits vorhandenen Hintergrund-Strahlung und zu einer Verstärkung durch CO₂ und H₂O (orange, blau), wodurch die Gegenstrahlung nur um 58 W/m² auf nunmehr 333 W/m² ansteigt (Abb. 21). Das Energieschema widerlegt die These eines fragilen Gleichgewichtes. Jede Veränderung eines IR-Strahlers führt zu einer Gegenreaktion der anderen Strahlungsquellen und deutet auf ein robustes Strahlungssystem hin.

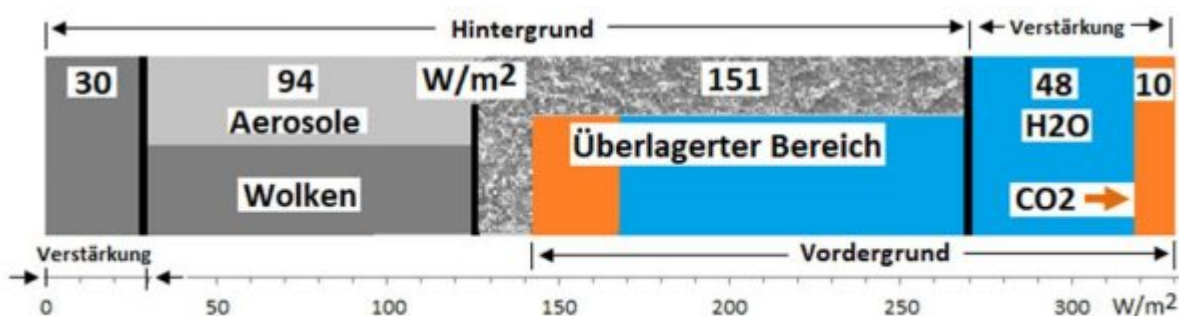


Abb. 21: Energieschema der atmosphärischen Gegenstrahlung von 333 W/m² nach dem Prinzip der Vorder- und Hintergrundstrahlung

So

ist der scheinbar geringe Wolken-Treibhauseffekt nur eine Verstärkung der Aerosol-Strahlung um 30 W/m², während der größte Teil der Wolken-Strahlung im überlagerten Bereich verborgen ist. Mit dieser Überlegung lässt sich auch das Wolken/IR-Gas-Paradoxon lösen.

Das Wolken/IR-Gas-Paradoxon [11]: Bei Messungen der atmosphärische Gegenstrahlung wurde

gegensätzliches gefunden:

A) Bei unterschiedlichen Luftfeuchten: Wolken dominant (Wasserdampf hatte geringen Effekt) [18].

B) Bei klarem und bewölktem Himmel: Wasserdampf dominant (Wolken hatten geringen Effekt) [5].

Der Widerspruch löst sich auf, wenn berücksichtigt wird, dass bei Variation einer atmosphärischen Strahlungsquelle (Wasserdampf, Bewölkungsgrad) nicht ihre Strahlung, sondern nur ihre Strahlungsverstärkung gemessen wird.

Die folgenden Rechnungen zur atmosphärischen CO₂-Strahlung nach Gl. 9/8.1 sind Übersichtsrechnungen, mit denen die Laborversuche auf die Atmosphäre übertragen werden. Zunächst benötigt man die Reichweite der CO₂-Strahlung, das ist die Schichtdicke, die gerade noch zu einer Strahlungsverstärkung der Erdoberfläche beiträgt. Hierzu werden schrittweise Luftschichten von 25 bis 2.000 m Dicke analysiert. Benötigt werden Druck, Temperatur und CO₂-Molmenge dieser Schichten, die sich aus der barometrischen Höhenformel, einem Temperatur-Gradient von 0,65 K/100 m Höhe und der idealen Gasgleichung ergeben. Temperatur und Druck werden als Mittelwert einer Schicht angesehen. Die Strahlungs-Temperatur des Hintergrundes wurde, mangels bekannter Werte, willkürlich mit minus 15 °C angenommen. Mit diesen Daten wird nun nach Gl. 9/8.1 die CO₂-Strahlung jeder Schicht (bezogen auf Höhe = 0) berechnet. Luftschichten über 1.000 m tragen demnach nicht mehr zur Erhöhung der CO₂-Strahlung bei, was hauptsächlich durch den Rückgang der Temperaturdifferenz $dT = (T_V^4/10^8 - T_H^4/10^8)$ verursacht wird. Bemerkenswert ist auch der 50%-Wert, der bei rund 25 m liegt und die kurze Reichweite der CO₂-Strahlung unterstreicht (Abb. 22).

Mit der ermittelten Reichweite von 1.000 m und den dazugehörigen Druck- und Temperatur-Werten wurden die konzentrationsabhängige CO₂-Strahlung ohne Hintergrund (Abb. 18, 23) und die CO₂-Strahlungsverstärkung (Abb. 1 und 19) berechnet.

Tab 2: CO₂-Strahlung ohne Hintergrund bei Normalbedingungen, Luftschicht = 1.000 m, nach Gl. 9/8.1 und IPCC Gl. 11

CO ₂ : ppm	25	50	100	150	200	250	278	300	325	350	375	400	450	556
CO ₂ : n	1,1	2,1	4,2	6,3	8,5	10,6	11,8	12,7	13,7	14,8	15,9	16,9	19,0	23,5
ϵ_{CO_2}	0,044	0,053	0,061	0,066	0,070	0,073	0,074	0,075	0,076	0,077	0,078	0,078	0,080	0,083
E_{CO_2}	17,2	20,6	24,0	25,9	27,3	28,4	28,9	29,3	29,7	30,0	30,4	30,7	31,2	32,3
IPCC: Gl. 11	17,2	20,9	24,6	26,8	28,3	29,5	30,1	30,5	30,9	31,3	31,7	32,1	32,7	33,8

T_{Ph} °C	T_p Luft	CO ₂	$n = pV/RT$			CO ₂ - Strahlung
-15,0	0,65 °/100 m	400 ppm	$p=1013,25(1-(0,0065 \cdot H/2)/288,15)^{5,255}$			
Höhe m	ϕ Druck hPa	ϕ $T_{p,luft}$ °C	n mol	ϵ_{CO_2} A)	dT K	E_{CO_2} W/m ²
$R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K}); V = H \cdot A \text{ (m}^3); A = 1 \text{ m}^2$						Gl. 9/8.1
0	1013	15,00	0,0	0,000	24,53	0
25	1012	14,92	0,422	0,033	24,45	4,54
50	1010	14,84	0,844	0,041	24,37	5,71
100	1007	14,68	1,684	0,050	24,22	6,85
200	1001	14,35	3,351	0,058	23,91	7,92
300	995	14,03	5,002	0,063	23,60	8,48
400	989	13,70	6,638	0,067	23,29	8,83
500	984	13,38	8,257	0,070	22,99	9,07
800	966	12,40	13,022	0,075	22,07	9,42
1000	955	11,75	16,120	0,078	21,47	9,48
1200	943	11,10	19,157	0,080	20,87	9,47
1400	932	10,45	22,133	0,082	20,28	9,41
1600	921	9,80	25,049	0,083	19,69	9,30
2000	899	8,50	30,704	0,086	18,52	9,02

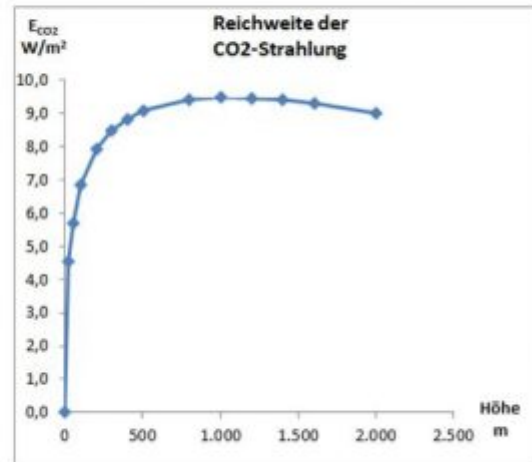


Abb. 22: Ermittlung der maximalen Reichweite der CO₂-Strahlung nach Gl. 9/8.1

CO ₂ -Strahlung: 1000 m Atmosphäre, Wolken/Aerosole = -273,15 °C						
ppm	ϕ Druck	ϕ $T_{p,luft}$ °C	n	A) ϵ_{CO_2}	dT	E_{CO_2}
10	955	11,75	0,4	0,032	65,88	12,01
25	955	11,75	1,0	0,043	65,88	16,25
50	955	11,75	2,0	0,052	65,88	19,46
100	955	11,75	4,0	0,061	65,88	22,67
150	955	11,75	6,0	0,066	65,88	24,55
200	955	11,75	8,1	0,069	65,88	25,88
250	955	11,75	10,1	0,072	65,88	26,92
278	955	11,75	11,2	0,073	65,88	27,41
300	955	11,75	12,1	0,074	65,88	27,76
325	955	11,75	13,1	0,075	65,88	28,13
350	955	11,75	14,1	0,076	65,88	28,47
375	955	11,75	15,1	0,077	65,88	28,79
400	955	11,75	16,1	0,078	65,88	29,09
450	955	11,75	18,1	0,079	65,88	29,64
556	955	11,75	22,4	0,082	65,88	30,62

CO ₂ -Strahlung: 1000 m Atmosphäre, Wolken/Aerosole = -15 °C						
ppm	ϕ Druck	ϕ $T_{p,luft}$ °C	n	B) ϵ_{CO_2}	dT	E_{CO_2}
10	955	11,75	0,4	0,032	21,47	3,91
25	955	11,75	1,0	0,043	21,47	5,30
50	955	11,75	2,0	0,052	21,47	6,34
100	955	11,75	4,0	0,061	21,47	7,39
150	955	11,75	6,0	0,066	21,47	8,00
200	955	11,75	8,1	0,069	21,47	8,44
250	955	11,75	10,1	0,072	21,47	8,77
278	955	11,75	11,2	0,073	21,47	8,93
300	955	11,75	12,1	0,074	21,47	9,05
325	955	11,75	13,1	0,075	21,47	9,17
350	955	11,75	14,1	0,076	21,47	9,28
375	955	11,75	15,1	0,077	21,47	9,38
400	955	11,75	16,1	0,078	21,47	9,48
450	955	11,75	18,1	0,079	21,47	9,66
556	955	11,75	22,4	0,082	21,47	9,98

Abb. 23: CO₂-Strahlung: Luftschicht = 1000 m nach Gl. 9/8.1: Links ohne Hintergrund (-273 °C), Rechts: Hintergrund = -15 °C

3. Anhang- Experimentelle Daten

Die Ermittlung der CO₂-Emissionsgrade ist schwieriger als die einfache Demonstration des Treibhauseffektes (Abb. 8). Nach jeder Zugabe von CO₂ wird die Spannung für die Heizung Q_E solange verringert, bis die Start-Temperatur der Erd-Platte von 16,09 °C gerade wieder erreicht ist. Da das System von Heizung und Temperatur-Messung eine gewisse Trägheit besitzt, wird das Mittel von zwei Messungen im Abstand von 0,01 bis 0,02 Volt gebildet, die beide eine Temperatur von 16,09 °C ergeben. Die Versuche wurden 3 bis 5-mal wiederholt und als Durchschnittswert gewertet.

Die Erd-Platte hat einen Durchmesser von 16,7 cm und eine Fläche $A_E = 219,04 \text{ cm}^2$. Die Heizung Q_E der Erd-Platte wird durch Multiplikation mit 45,654 auf einen Quadratmeter $A_E = 1 \text{ m}^2$ umgerechnet. Der Abstand zwischen Erd- und Aerosol-Platte beträgt 1,11 m. Die Molmenge bezieht sich somit auf fiktives Volumen von $1,11 \text{ m}^3$.

1. CO₂-Emissionsgrade bis 0,8 mol (1,7 Vol.-%).

5 Versuche (Ø) Nr. 169, 170, 194, 195, 196; ε _W = 0,268									
T _{pE} °C	T _{pA} °C	ØT _{pLuft} °C	Druck hPa	Q _E W/m ²	CO ₂ Vol.-%	CO ₂ mol	E _A	E _{W+CO₂}	E _{CO₂}
16,09	-14,52	15,45	1029,8	102,21	0,00	0,00	0,732	0,268	0,000
16,09	-14,60	15,42	1030,0	99,91	0,25	0,12	0,715	0,285	0,017
16,09	-14,60	15,42	1030,0	98,78	0,50	0,24	0,707	0,293	0,025
16,09	-14,56	15,42	1029,3	97,94	0,75	0,36	0,701	0,299	0,031
16,09	-14,57	15,41	1028,4	97,39	1,00	0,48	0,697	0,303	0,034
16,09	-14,54	15,43	1028,3	96,49	1,35	0,64	0,691	0,309	0,041
16,09	-14,59	15,45	1028,0	95,90	1,70	0,81	0,685	0,315	0,047

2. CO₂-Emissionsgrade bis 28,2 mol (60 Vol.-%)

3 Versuche (Ø) Nr. 134, 144, 152; ε _W = 0,242									
T _{pE} °C	T _{pA} °C	ØT _{pLuft} °C	Druck hPa	Q _E W/m ²	CO ₂ Vol.-%	CO ₂ mol	E _A	E _{W+CO₂}	E _{CO₂}
16,09	-14,20	15,14	1017,2	103,57	0,00	0,00	0,758	0,242	0,000
16,09	-14,29	15,09	1017,3	98,00	1,38	0,65	0,717	0,283	0,041
16,09	-14,24	15,10	1016,7	94,74	5,00	2,35	0,694	0,306	0,064
16,09	-14,21	15,08	1016,2	92,94	10,00	4,71	0,682	0,318	0,076
16,09	-14,22	15,10	1016,0	91,03	20,00	9,41	0,667	0,333	0,091
16,09	-14,29	15,10	1015,7	89,54	40,00	18,82	0,655	0,345	0,103
16,09	-14,27	15,13	1016,0	87,90	60,00	28,23	0,642	0,358	0,116

3. Effektive Strahlung E_A in Luft

Versuch Nr. 205								
T _{pE} °C	T _{p1} °C	T _{p2} °C	T _{p3} °C	T _{p4} °C	T _{pA} °C	T _A K	Q _E W/m ²	E _A W/m ²
16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	15,7	69,7	0,0	291,5
16,1	15,9	15,8	15,9	15,8	7,6	62,1	29,7	259,8
16,1	15,7	15,7	15,7	15,6	-0,4	55,4	56,9	231,8
16,1	15,6	15,7	15,6	15,5	-6,0	51,0	74,9	213,3
16,1	15,5	15,6	15,5	15,4	-10,4	47,6	90,1	199,4
16,1	15,5	15,6	15,5	15,2	-14,5	44,8	103,4	187,5
16,1	15,4	15,5	15,4	15,3	-17,6	42,6	113,3	178,4

Literaturverzeichnis

[1] K. E. Trenberth et al., „EARTH'S GLOBAL ENERGY BUDGET,“ 19 Juli 2008. [Online]. Available:

https://www.klimamanifest-von-heiligenroth.de/wp/wp-content/uploads/2016/09/Trenberth_Jones_Treibhauseffekt_TFK_bams_2009_15Grad_390Watt_SBG_gelbMark.pdf

- [2] V. Ramaswamy et al., „Radiative Forcing of Climate Change,“ März 2018. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-06.pdf> .
- [3] „Wolken im Klimasystem,“ 23 Oktober 2017. [Online]. Available: http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Wolken_im_Klimasystem .
- [4] M. Schnell, „2. Mitteilung: Die Hintergrundstrahlung der Wolken und Aerosole,“ 2018 Juni 2018. [Online]. Available: <https://eike.institute/2018/06/03/experimentelle-verifikation-des-treibhauseffektes/> .
- [5] „Atmosphärische Gegenstrahlung,“ 24 Mai 2009. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A4rische_Gegenstrahlung .
- [6] E. Roth, „Welchen Einfluss hat CO₂ auf das Klima?,“ 02 Juli 2013. [Online]. Available: <http://www.energie-fakten.de/pdf/2013-07-roth.pdf> .
- [7] P. Dietze, „Berechnung der CO₂-Klimasensitivität,“ 19 Oktober 2016. [Online]. Available: https://eike.institute/wp-content/uploads/2016/11/Dietze_Klimasensitivitaet_ECS-4.pdf .
- [8] J. Stefan, „Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur.,“ SB der Ak. d. Wiss. Wien, Math. Physikal. Kl. 79, 1879, S. 391-428, Wien, 1879.
- [9] P. Dulong, Annales de chim. de phys, Bde. %1 von %2VII. Seite 225 – 264 und 337 – 367,, 1817.
- [10] „Stefan-Boltzmann-Gesetz,“ 26 September 2018. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz> .
- [11] M. Schnell, „Experimentelle Verifizierung des Treibhauseffektes,“ 12. Internationale Klima- und Energiekonferenz (IKEK-12), München, 2018.
- [12] M. Schnell, „3. Mitteilung Labor-Experimente zur Demonstration des CO₂-Treibhauseffektes,“ 17 Juli 2018. [Online]. Available: <https://eike.institute/2018/07/17/experimentelle-verifikation-des-treibhauseffektes-2/> .
- [13] N. S. Nahle, „Repeatability of Prof. Robert Wood’s 1909 Experiment on the Theory of the Greenhouse,“ 05 Juli 2011. [Online]. Available: http://www.biocab.org/experiment_on_greenhouses__effect.pdf .
- [14] A. Watts, „Replicating Al Gore’s Climate 101 video experiment shows that his „high school physics“ could never work as advertised,“ [Online]. Available: <https://wattsupwiththat.com/2011/10/18/replicating-al-gores-climate-101-video-experiment-shows-that-his-high-school-physics-could-never-work-as-advertised/?cn-reloaded=1> .
- [15] S. Sirtl, „Absorption thermischer Strahlung durch atmosphärische Gase. Experimente für den Physikunterricht,“ 12 November 2010. [Online]. Available: <https://docplayer.org/18989667-Absorption-thermischer-strahlung-durch-atmosphaerische-gase.html> .
- [16] H. Hug, „Der anthropogene Treibhauseffekt – eine spektroskopische Geringfügigkeit,“ 20 August 2012. [Online]. Available: <https://eike.institute/2012/08/20/der-anthropogene-treibhauseffekt-eine-spektroskopische-geringfuegigkeit/> .
- [17] „Treibhauseffekt,“ 16 Januar 2019. [Online]. Available: Literatur\Treibhauseffekt Wikipedia.pdf.
- [18] F. Albrecht, Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche in

verschiedenen Klimagebieten, Bd. VIII, Berlin: Julius Springer, 1940.

Diesen Beitrag gibt es auch als PDF auf Deutsch

[Experimentelle Verifikation des Treibhauseffektes – Die erdnahe CO₂-Strahlung](#)

und auf Englisch

[Experimental verification of the greenhouse effect – The near-Earth CO₂ radiation](#)