

Die unglaubliche Physik des Treibhauseffektes

Markus Ott



Zusammen mit meinem Kollegen Tom Shula, einem Physiker aus der Halbleiterindustrie des Silicon Valley, habe ich mich intensiv mit der Physik des atmosphärischen Treibhauseffektes beschäftigt. Unsere Ergebnisse haben wir in mehreren Videos auf dem YouTube-Kanal von Tom Nelson vorgestellt <https://www.youtube.com/@tomnelson2080>. Weil ich den Eindruck habe, daß diese Ergebnisse von großem öffentlichem Interesse sind, habe ich das Wesentliche nochmal in diesem Text zusammengefaßt.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	3
Wie kommen die (nicht meßbaren) 33°C Treibhauseffekt zustande?	5
Strahlungstransfertheorie und der Treibhauseffekt	8
Karl Schwarzschilds Strahlungsgleichgewicht und das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz	10
Treibhauseffekt auf molekularer Ebene - Eine spektroskopische Betrachtung.....	18
Wie beobachtet/misst man die Wechselwirkung von IR-Strahlung mit Treibhausgasmolekülen?	21
Was sind Treibhausgase?.....	23
Bandenverbreiterung	25
Was passiert, wenn CO ₂ mit Infrarotlicht wechselwirkt?	29
Absorption und Emission von 15µm-IR-Strahlung durch CO ₂	30
Absorption und Thermalisierung von 15µm-IR-Strahlung durch CO ₂	31
Thermische Anregung und Emission von 15µm-IR-Strahlung durch CO ₂	32
Stabilität des angeregten Schwingungszustandes (01 ¹ 0) des CO ₂	34
Thermalisierung von 15µm-IR-Strahlung in der Atmosphäre	34
Anmerkung zur thermisch angeregten Emission	35
Sättigung und Reichweite der 15µm-Strahlung.....	37
Messbare atmosphärische Gegen- oder Rückstrahlung.....	44
Ein realistischeres Modell zur Berechnung der mittleren Erdoberflächentemperatur (ohne Treibhauseffekt).....	50
Wieso funktioniert Uli Webers hemisphärischer Stefan-Boltzmann-Ansatz so gut?.....	54
Fehler in der Argumentation der Treibhauseffekttheorie	58
Strahlungstransportgleichungen.....	58
Strahlungsantrieb oder Radiative Forcing	59
Stratospheric Cooling (S.Manabe).....	65
Welche Auswirkungen hat eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen in der realen Welt?	68
Ein einfaches Gedankenexperiment von Paul Linsay	69
Wie kam dieser Unsinn zustande?.....	70

Einleitung

Der atmosphärische Treibhauseffekt ist das zentrale Dogma der modernen Klimawissenschaft. Er wird vom Kindergarten bis ins Altenheim gepredigt (Abbildung 1). Er soll Deindustrialisierung, Energiewende und andere Eingriffe in unsere Freiheit rechtfertigen.

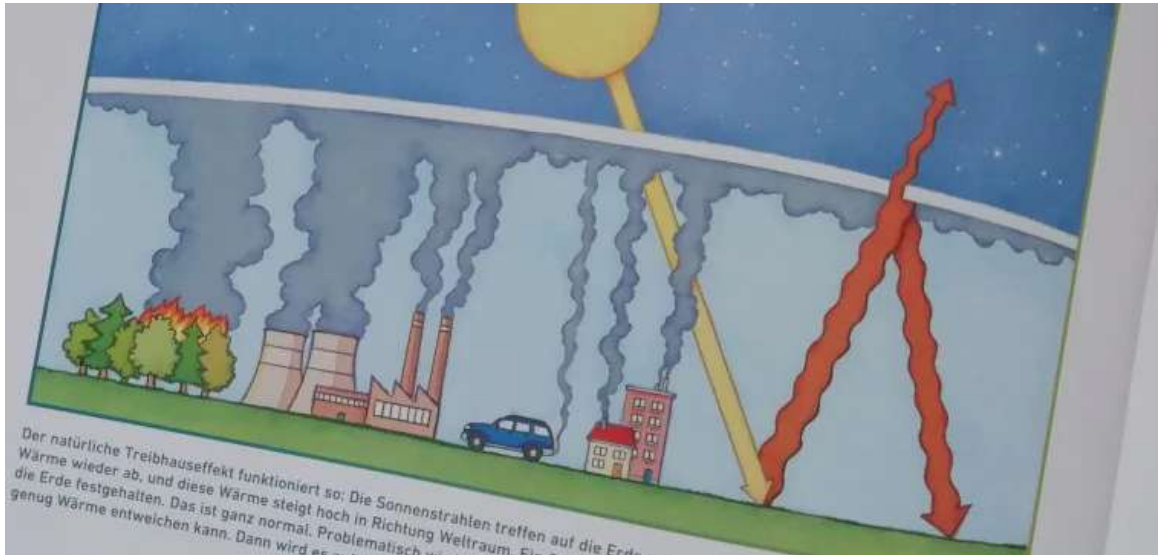


Abbildung 1: Quelle: „Frag doch mal die Maus!: Umwelt und Energie (Illustriert von Igor Dolinger Autor / Autorin Gabi Neumayer; Verlag: Carlsen; Preis: 14,99 € ; ISBN: 978-3-551-25268-5)

<https://www.leseliebe.de/buchvorstellung/umwelt/frag-doch-mal-die-maus-umwelt-und-energie>

Der schlichte Name dieses Effektes und seine Allgegenwärtigkeit in unseren Leitmedien lassen bei Laien keine Zweifel daran aufkommen, daß es sich hier um solide und vollständig verstandene Naturwissenschaft handelt.

3

Wie funktioniert dieser Effekt? Wie wird dieser Effekt von physikalischen Grundprinzipien hergeleitet? Wie kann man den Effekt messen?

Diese einfachen Fragen sollten klar und einfach zu beantworten sein.

Ich muss den Leser enttäuschen. Der atmosphärische Treibhauseffekt ist und bleibt ein Mysterium.

Er unterscheidet sich von allen anderen physikalischen Effekten dadurch, daß er nicht meßbar ist. Deshalb eröffnet die **deutsche meteorologische Gesellschaft** (1999) eine Stellungnahme in der sie, unter Berufung auf die Argumentation des IPCC, der Öffentlichkeit versichert, dass es den Treibhauseffekt wirklich gibt, mit dem Satz: „**Es ist unstrittig, daß der anthropogene Treibhauseffekt noch nicht unzweifelhaft nachgewiesen werden konnte**“ (https://www.dmg-ev.de/wp-content/uploads/2023/12/1999_Treibhauseffekt.pdf)

Das ist erstaunlich. Ein mit vielen Steuergeldmilliarden gesponserter Wissenschaftszweig ist nicht in der Lage seine Grundprämisse auf grundlegende physikalische Prinzipien zurückzuführen oder gar zu messen.

Vor diesem Hintergrund sollte man sich auch nicht darüber wundern, daß es in der Klimawissenschaft eine Vielzahl von Erklärungen für den atmosphärischen Treibhauseffekt gibt. Diese Erklärungen widersprechen sich auch teilweise. Eine gute Übersicht über die diversen Erklärungsversuche findet man in **“Falsification Of The Atmospheric CO2 Greenhouse Effects Within The Frame Of Physics” Version 4.0 (January 6, 2009) Prof. Dr. Gerhard Gerlich, Dr.**

Ralf D. Tscheuschner <https://de.scribd.com/document/337186171/Falsification-of-the-Atmospheric-CO2-Greenhouse-Effects-Within-the-Frame-of-Physics>).

In diesem Artikel zeigen die Theoretiker Gerlich und Tscheuschner, daß der atmosphärische Treibhauseffekt eine physikalische Unmöglichkeit ist. Weil ihre Erklärungen doch recht abstrakt sind und wenig Aufschluß darüber geben wie Treibhausmoleküle in der Atmosphäre mit Wärmestrahlung wechselwirken und welche Auswirkungen das auf den Wärmetransport in der Atmosphäre hat, habe ich beschlossen das Thema Treibhauseffekt trotzdem nochmal anzugehen. Dabei will ich dem Leser einen realistischen Eindruck davon vermitteln was bei der Wechselwirkung zwischen Strahlung und der Erdatmosphäre auf Molekülebene vor sich geht und wie das Verhalten der Luftmoleküle den Wärmefluß durch die Atmosphäre bestimmt. Meine wichtigste Literaturquelle bei dieser Expedition in den Mikrokosmos des Treibhauseffektes ist eine Veröffentlichung von Heinz Hug, dessen Labormessungen schon Ende der 90er Jahre die CO₂-Diskussion hätten beenden müssen. H. Hug, *Chemische Rundschau*, 20. Febr., S. 9 (1998) ; 10. August 2012 Der anthropogene Treibhauseffekt – eine spektroskopische Geringfügigkeit von Heinz Hug <https://www.eike-klima-energie.eu/wp-content/uploads/2016/12/Hug-pdf-12-Sept-2012.pdf>

Ich habe versucht den Text so leichtverständlich und anschaulich zu halten, daß Leser mit einem technisch/naturwissenschaftlichen Hintergrund der Argumentation, auch abends nach getaner Arbeit, noch folgen können.

Lesern, die nicht so sehr ins Detail gehen wollen und einfach nur verstehen wollen weshalb der Treibhauseffekt Unsinn ist, kann ich eine Abkürzung anbieten. Am Ende des Textes finden sie ein von Paul Lindsay vorgeschlagenes Gedankenexperiment, das es Ihnen erlaubt mehr oder weniger sofort zu verstehen, warum es einen von Treibhausgasen verursachten atmosphärischen Treibhauseffekt nicht geben kann.

4

Auch der sicher sehr kleinen Gruppe der Okkultisten unter meinen Lesern kann ich einen einfachen Schnellzugang zum Verständnis des Treibhauseffektes anbieten. Wenn dieses Klientel sieht, daß die angeblich klimawirksame Absorption des CO₂ ihr Maximum dicht bei 666cm⁻¹ hat, daß der Treibhauseffekt 33°C betragen soll und daß auf alten Thermometern 0°C und 33°F sich direkt gegenüberstehen (Abbildung 2), wissen sie sofort, daß hier jemand einen derben Spaß mit dem Rest der Welt treiben will.

Treibhauseffekt: 33°C oder 33°F ?

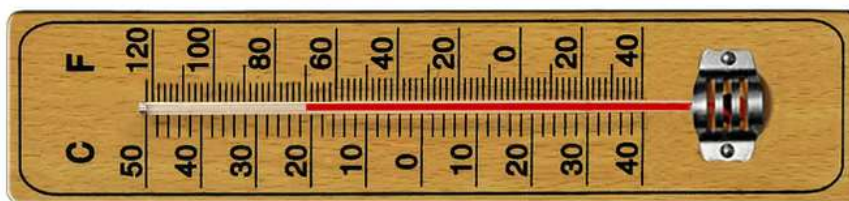


Abbildung 2

Getreu dem Prinzip „hidden in plain sight“ sieht man jedes Mal, wenn man das Thermometer abliest, 0 ≈ 33.

Nach dieser etwas abschweifenden Einleitung zurück zum atmosphärischen Treibhauseffekt.

Wie kommen die (nicht meßbaren) 33°C Treibhauseffekt zustande?

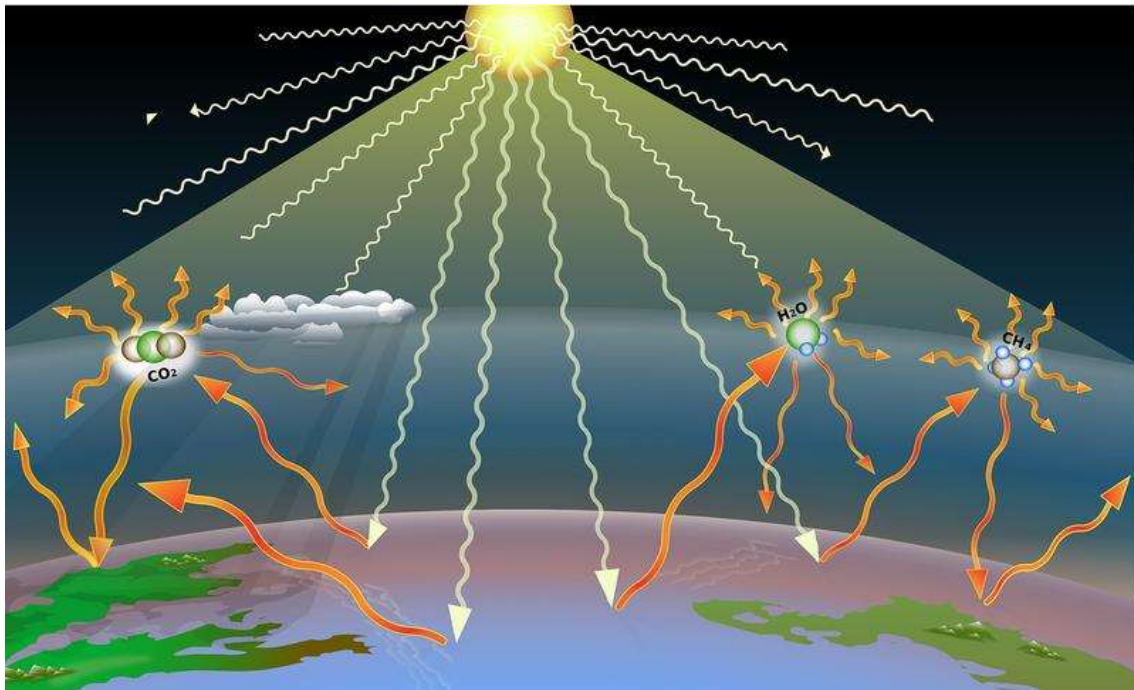


Abbildung 3: Visualisierung des atmosphärischen Treibhauseffektes, Quelle: Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas

Laut IPCC soll der Treibhauseffekt folgendermaßen zustande kommen.

Die Erdoberfläche wird durch einfallende, kurzwellige Sonnenstrahlung erwärmt. Diese Wärme wird von der Erdoberfläche wieder in Form von Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) in den Weltraum abgegeben. Ein Teil der von der Oberfläche ausgesandten Infrarotstrahlung wird von atmosphärischen Treibhausgasen auf die Oberfläche zurückreflektiert. Diese Rückstrahlung vermindert die Abkühlung der Erdoberfläche (Abbildung 3).

D.h. je höher die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre sind, desto weniger Wärmestrahlung kann in den Weltraum entweichen und desto wärmer wird die Erdoberfläche werden.

Bei den aktuellen Treibhausgaskonzentrationen in unserer Atmosphäre soll dieser Rückstrahlungseffekt dazu führen, daß die Erdoberfläche ca. 33°C wärmer ist als sie ohne die durch die Treibhausgase verursachte Rückstrahlung wäre. D.h. ohne die Treibhausgase sollte sich auf der Erdoberfläche eine mittlere Temperatur von -18°C statt der, gemessenen Durchschnittstemperatur von 15°C, einstellen.

Auffällig ist, daß populärwissenschaftliche Magazine und Sendungen der Klimawissenschaft sehr große Aufmerksamkeit widmen, aber nie darauf eingehen wie die Größe des atmosphärischen Treibhauseffektes, die berühmten 33°C, ermittelt wurden. Wenn wir wissen wollen, wie diese 33°C zustande kommen, bleibt uns nichts anderes übrig, als uns anzusehen wie laut IPCC dieser Wert berechnet wird.

Im Fourth Assessment Report Climate Change 2007 The Physical Science Basis Chapter 1: Historical overview of climate change science page 97

(https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf) findet man so zu sagen im Nebensatz einen Hinweis darauf, wie man beim IPCC das Ausmaß des Treibhauseffektes bestimmt (Abbildung 4).

The energy that is not reflected back to space is absorbed by the Earth's surface and atmosphere. This amount is approximately 240 Watts per square metre (W m^{-2}). To balance the incoming energy, the Earth itself must radiate, on average, the same amount of energy back to space. The Earth does this by emitting outgoing longwave radiation. Everything on Earth emits longwave radiation continuously. That is the heat energy one feels radiating out from a fire; the warmer an object, the more heat energy it radiates. To emit 240 W m^{-2} , a surface would have to have a temperature of around -19°C . This is much colder than the conditions that actually exist at the Earth's surface (the global mean surface temperature is about 14°C). Instead, the necessary -19°C is found at an altitude about 5 km above the surface.

The reason the Earth's surface is this warm is the presence of greenhouse gases, which act as a partial blanket for the longwave radiation coming from the surface. This blanketing is known as the natural greenhouse effect. The most important greenhouse gases are water vapour and carbon dioxide. The two most abundant constituents of the atmosphere – nitrogen and oxygen – have no such effect. Clouds, on the other hand, do exert a blanketing effect similar to that of the greenhouse gases; however, this effect is offset by their reflectivity, such that on average, clouds tend to have a cooling effect on climate (although locally one can feel the warming effect: cloudy nights tend to remain warmer than clear nights because the clouds radiate longwave energy back down to the surface). Human activities intensify the blanketing effect through the release of greenhouse gases. For instance, the amount of carbon dioxide in the atmosphere has increased by about 35% in the industrial era, and this increase is known to be due to human activities, primarily the combustion of fossil fuels and removal of forests. Thus, humankind has dramatically altered the chemical composition of the global atmosphere with substantial implications for climate.

Abbildung 4, Quelle: IPCC Fourth Assessment Report Climate Change 2007 The Physical Science Basis Chapter 1: Historical overview of climate change science page 97 <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/historical-overview-of-climate-change-science-2/>

Auch beim IPCC vermeidet man es genauer darauf einzugehen wie diese 33°C berechnet werden. Weil die Beschreibung der Rechnung hier doch recht kryptisch ist, vermuten wir, daß hier etwas verborgen werden soll und sehen uns deshalb den Gang der Berechnung im Detail an.

Als Treibhauseffekt bezeichnet man die Differenz zwischen der aktuell auf der Erde gemessenen Durchschnittstemperatur von ca. 15°C (288K) und der für eine Erde ohne Atmosphäre berechneten Durchschnittstemperatur von -18°C (255K).

Treibhauseffekt = 288k – Berechnete Temperatur der Erde ohne Atmosphäre (255k)

Unter Zuhilfenahme des Stefan-Boltzmann-Gesetzes und der Annahme, daß die Erde durch Sonneneinstrahlung pro Zeiteinheit so viel Wärme aufnimmt wie sie gleichzeitig auch wieder abstrahlt, berechnet man dann, wie im Folgenden beschrieben, die Oberflächentemperatur einer Erde ohne Rückstrahlung durch Treibhausgase.

Die von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Leistung ist recht konstant. Sie wird als Solarkonstante $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ bezeichnet. Der Wert der Solarkonstanten wurde durch Satellitenmessungen ermittelt. Für die folgenden Berechnungen geht man davon aus, dass die Erde von der Sonnenstrahlung getroffen wird, die durch eine Kreisfläche mit dem Radius der Erdkugel senkrecht hindurchtritt. Durch jeden Quadratmeter dieser Fläche geht eine Strahlungsleistung von 1367 W hindurch.

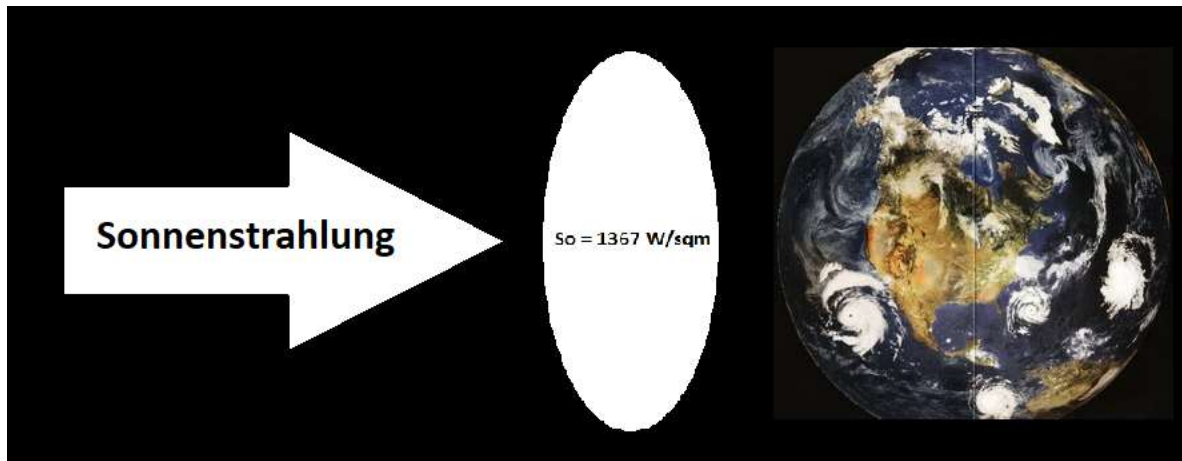


Abbildung 5: Solarkonstante; („Satellitenbild“ wurde der Innenseite des Umschlags von Al Gore´s Buch „An Inconvenient Truth“ entnommen. Interessanterweise drehen sich die Wirbelstürme auf der Südhalbkugel falschrum.)

Wie in Abbildung 5 dargestellt wird die Erde von der Sonnenstrahlung getroffen, die senkrecht durch eine Kreisfläche mit dem Radius der Erdkugel (r) hindurchgeht. Diese Kreisfläche berechnet sich zu

$$A_k = \pi r^2.$$

Mit der Solarkonstante S_0 erhält man für die auf die Erde eingestrahelte Leistung.

$$P = A_k S_0 = \pi r^2 S_0$$

Jetzt korrigieren wir noch mit der Albedo (Reflexionsvermögen der Erde $\approx 0,3$) für die von der Erde reflektierte Strahlung/Leistung und erhalten die von der Erde absorbierte und in Wärme umgewandelte Leistung.

$$P = (1 - \alpha) \pi r^2 S_0$$

Diese Leistung soll von der ganzen Oberfläche der Erde $A_E = 4\pi r^2$ (Kugeloberfläche) absorbiert werden und dann wieder als Wärmestrahlung abgestrahlt werden.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz ($P = A\sigma T^4$, mit $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) sieht dann so aus (eingestrahelte Leistung = ausgestrahelte Leistung).

$$P = (1 - \alpha) \pi r^2 S_0 = 4\pi r^2 \sigma T^4 \quad , \pi r^2 \text{ kürzt sich raus}$$

$$(1 - \alpha) S_0 = 4\sigma T^4$$

$$\frac{(1 - \alpha) S_0}{4\sigma} = T^4$$

Nach T aufgelöst:

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha)S_0}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{(1-0,3)*1367}{4*5,67*10^{-8}}} \approx 255\text{K} \approx -18^\circ\text{C} \quad \text{Temperatur der Erde ohne Treibhauseffekt}$$

Mit der gemessenen globalen Durchschnittstemperatur von etwa 15°C ergibt sich so ein atmosphärischer Treibhauseffekt von ca. 33°C . Nach dieser Rechnung wäre die Erde ohne Treibhausgase ca. 33°C kälter als sie mit Treibhausgasen wirklich ist.

Nachdem der Gang der Rechnung geklärt ist, erinnern wir uns an unsere Schulzeit oder sehen in der Wikipedia nach wie das Stefan-Boltzmann-Gesetz anzuwenden ist. Dabei fällt auf, **daß das**

Stefan-Boltzmann-Gesetz nur im thermischen Gleichgewicht gilt. D.h. es darf nur auf Körper angewendet werden, die auf ihrer ganzen Oberfläche die gleiche Temperatur haben. Diese Randbedingung ist auf der Erdoberfläche nicht erfüllt. Der für den Treibhauseffekt berechnete Wert von 33°C muß deshalb falsch sein.

Wie falsch die 33°C Treibhauseffekt sind werden wir später sehen, wenn ich auf ein realistischeres Modell zur Berechnung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur etwas genauer eingehe.

Strahlungstransfertheorie und der Treibhauseffekt

Den groben arithmetischen und physikalischen Fehler in dieser Herleitung des Treibhauseffektes schenkt man seitens der Klimawissenschaft einfach keine Aufmerksamkeit und schustert sich eine andere Theorie zurecht mit der man den 33°C-Treibhauseffekt herbeirechnet.

Die wichtigsten Anforderungen an diese „Theorie“ sind:

- Sie muß erklären wie der größte Teil der von der Sonne eingestrahnten Energie als Wärmestrahlung durch die Atmosphäre ins Weltall transportiert wird.
- Sie muß zeigen, daß Treibhausgase diesen Strahlungsabtransport „behindern“ indem sie eine Rückstrahlung verursachen, die die Erdoberfläche erwärmt.

Zu zeigen, daß es eine Rückstrahlung der Atmosphäre auf die Erdoberfläche gibt ist unproblematisch, weil eine solche Rückstrahlung tatsächlich meßbar ist. In wie weit diese Rückstrahlung wirklich den Wärmeabfluß durch die Atmosphäre behindert, werden wir noch sehen.

Zu zeigen, daß die von der Sonne eingestrahlte Energie größten Teils als Wärmestrahlung durch die Atmosphäre transportiert wird ist schon etwas schwieriger, weil die Treibhausgasfrequenzen in der unteren Atmosphäre sehr kurze Reichweiten haben (ca. 10 bis 50m, siehe Abbildung 6).

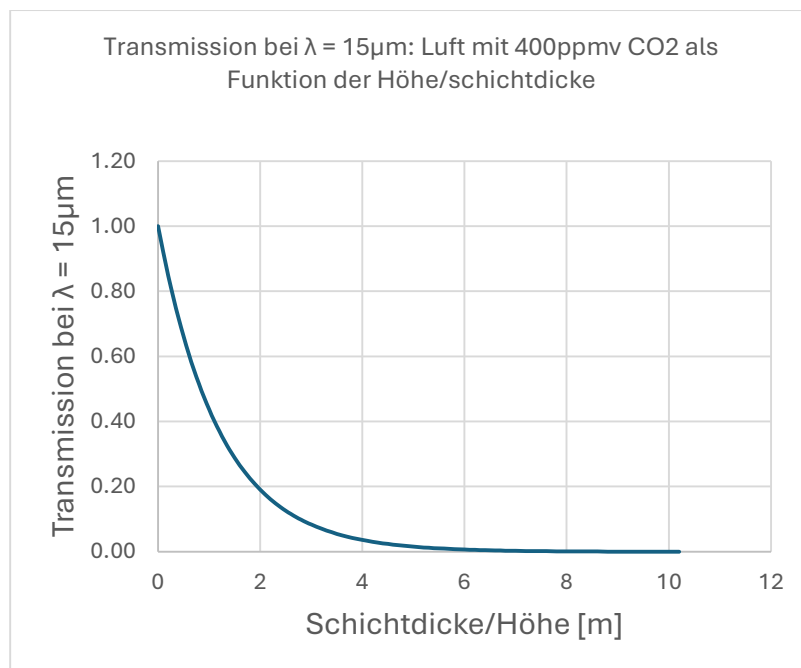


Abbildung 6: Transmission (Durchlässigkeit) einer „bodennahen“ 10m dicken Luftschicht als Funktion der CO₂-Konzentration, berechnet mit dem von Hug ermittelten $\varepsilon_{15\mu\text{m}} = 20,2 \text{ m}^2/\text{mol}$.

Weshalb die Reichweiten so kurz sind und wie man die Reichweiten ermittelt werden wir später in Detail besprechen. Hier sei nur erwähnt, daß die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre so hoch sind, daß die von den Treibhausgasen absorbierten Frequenzen der Wärmestrahlung schon nach wenigen Metern vollständig absorbiert und in Wärme umgewandelt werden.

Weil man aber für einen Treibhauseffekt unbedingt einen Strahlungstransport durch die gesamte Atmosphäre braucht, umgeht man das Problem der kurzen Reichweiten dadurch, daß man eine Abfolge von Strahlungsabsorptionen und Emissionen postuliert, die es der Strahlung erlaubt auch eine stark absorbierende Atmosphäre zu durchdringen. Bildlich gesprochen sollen die Photonen der Treibhausgasfrequenzen von einem Treibhausgasmolekül zum nächsten „springen“ bis sie entweder ins Weltall entweichen können oder als Rückstrahlung wieder auf die Erdoberfläche treffen (siehe Abbildung 7).

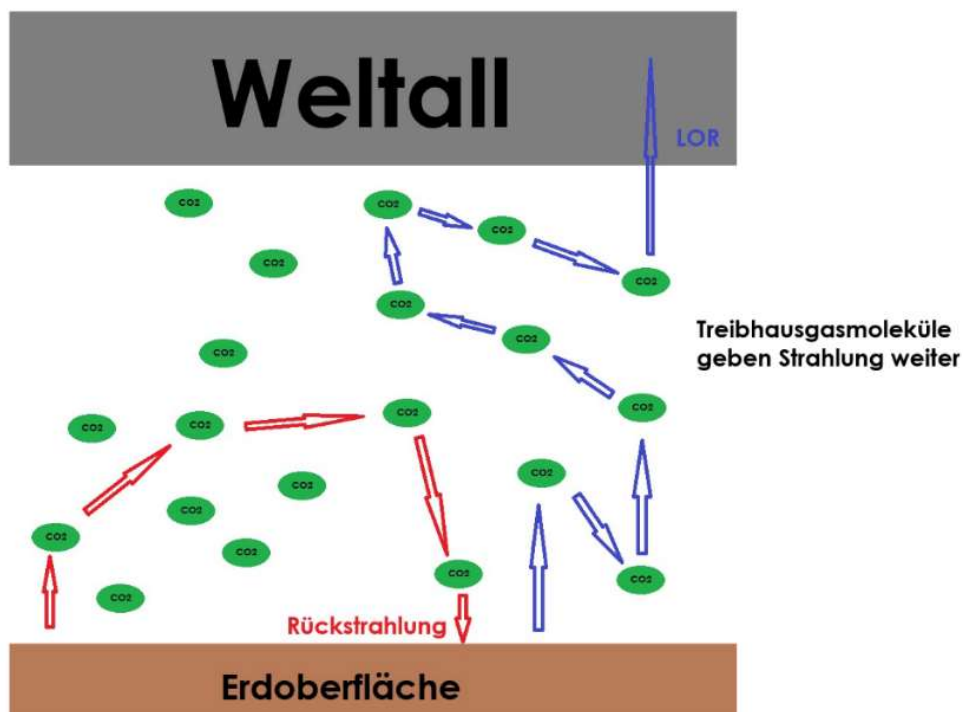


Abbildung 7: Strahlungstransportmechanismus in einer absorbierenden Atmosphäre

Die grundlegende Idee und die Mathematik für die Beschreibung eines solchen Strahlungstransportmechanismus stammt aus einer Veröffentlichung von Carl Schwarzschild aus dem Jahr 1906.

Der Originaltext ist unter diesem Link zugänglich: Karl Schwarzschild (1906), Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre: https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN252457811_1906?tify=%7B%22pages%22%3A%5B47%5D%2C%22pan%22%3A%7B%22x%22%3A0.768%2C%22y%22%3A0.461%7D%2C%22view%22%3A%22info%22%2C%22zoom%22%3A0.642%7D

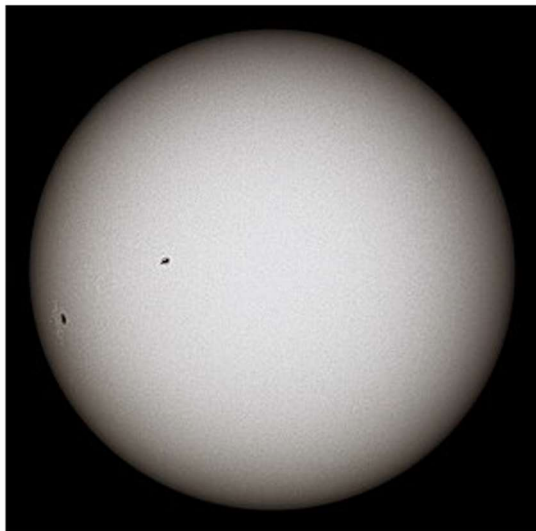
Schwarzschilds Modell liefert alles was man für eine schöne Treibhauseffekttheorie braucht:

- Strahlungstransport durch eine absorbierende und daher für Wärmestrahlung eigentlich undurchlässige Atmosphäre.
- Rückstrahlung der **gesamten** Atmosphäre auf den Grund der Atmosphäre.

Das Modell paßt so gut zur Theorie des Treibhauseffektes, daß man auch großzügig darüber hinweggeht, daß Schwarzschild explizit darauf hinweist, daß der von ihm vorgeschlagene Strahlungstransportmechanismus auf die Erdatmosphäre nicht anwendbar ist.

Karl Schwarzschilds Strahlungsgleichgewicht und das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz

Ausgangspunkt für Schwarzschilds Artikel ist die Beobachtung, dass die Helligkeit der sichtbaren Sonnenscheibe nicht gleichmäßig verteilt ist. Zum Rand hin nimmt die Helligkeit ab. In Abbildung 8 ist die beobachtete Helligkeitsverteilung als blaue Linie dargestellt.



Source: Wikipedia(<https://en.wikipedia.org/wiki/Sun>)

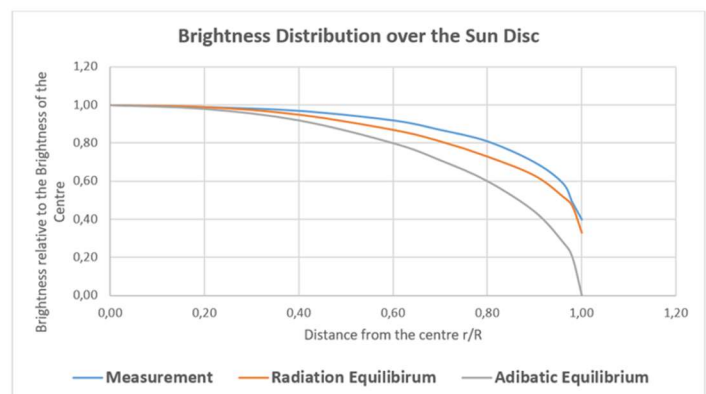


Figure 76: Brightness distribution of the visible solar disc, measured values (G. Müller "Photometrie der Gestirne" pag. 323) shown as blue line, calculated values in orange for the radiation equilibrium and grey for the adiabatic equilibrium

Abbildung 8: Helligkeitsverteilung der sichtbaren Sonnenscheibe, Messwerte (G. Müller „Photometrie der Gestirne“ Seite 323) als blaue Linie dargestellt, errechnete Werte in orange für das Strahlungsgleichgewicht und grau für das adiabatische Gleichgewicht

Um die Ursache dieser Helligkeitsverteilung zu ergründen vergleicht Schwarzschild zwei Mechanismen des Wärmetransportes durch die Sonnenatmosphäre:

1. Wärmetransport durch Strahlungstransport $\leq$ Strahlungsgleichgewicht
2. Wärmetransport durch Konvektion $\leq$ adiabatisches Gleichgewicht

Er berechnet wie sich die Helligkeitsverteilung auf der Sonnenscheibe für diese beiden Fälle gestalten sollte.

Weil seine Ergebnisse für das Strahlungsgleichgewicht (orange Linie in Abbildung 4) besser zu der beobachteten Helligkeitsverteilung (blaue Linie) passen als seine Ergebnisse für das adiabatische Gleichgewicht (Konvektion, graue Linie), vermutet er, dass in der Sonnenatmosphäre ein Strahlungsgleichgewicht vorherrscht.

Seine Beschreibung des adiabatischen Gleichgewichtes lassen wir hier außer Acht und beschränken uns auf seine Beschreibung des Strahlungsgleichgewichtes. **Es sei nur erwähnt, daß er die Erdatmosphäre als Beispiel für ein adiabatisches Gleichgewicht anführt.**

Für unsere Zwecke ist es nicht notwendig die Einzelheiten seiner Berechnungen zu besprechen. Es reicht aus, wenn wir das Grundprinzip und die Randbedingungen seines Modells verstehen.

In Schwarzschilds Modell kommt dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz eine zentrale Bedeutung zu. „Das **Kirchhoffsche Strahlungsgesetz** beschreibt den Zusammenhang zwischen **Absorption** und **Emission** eines realen Körpers **im thermischen Gleichgewicht**. Es besagt, dass Strahlungsabsorption und -emission bei gegebener Wellenlänge einander entsprechen: Ein Körper, der gut absorbiert, strahlt auch gut“ (Zitat Wikipedia).

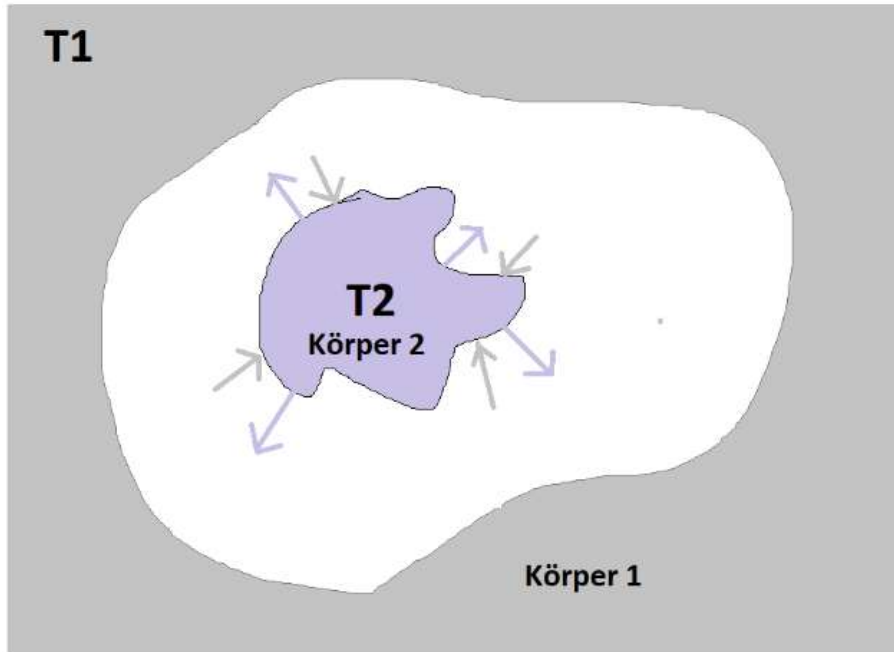


Abbildung 9: Kirchhoffsches Strahlungsgesetz

11

Bildlich kann man sich das folgendermaßen vorstellen (Abbildung 9): Wir betrachten einen Körper (Körper 2) der sich in einem Hohlraum eines anderen Körpers (Körper 1) befindet (im Zwischenraum Vakuum). Wenn beide Körper die gleiche Temperatur haben ($T_1 = T_2$) muss die von Körper 2 absorbierte Strahlungsleistung genauso groß wie die von ihm abgestrahlte Leistung sein, weil sich sonst die Temperatur von Körper 2 verändern würde. D.h. im thermischen Gleichgewicht stellt das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz für Körper 2 eine Art „**Strahlungsenergie-Erhaltungssatz**“ dar.

Zurück zu Schwarzschilds Modell: Die Auslegung von Schwarzschilds Strahlungstransportmodell der Sonnenatmosphäre ist recht einfach (siehe Abbildung 10).

Eine unbekannte Wärmequelle im Kern der Sonne erzeugt Wärme. Ein eventuell vorhandener, flüssiger äußerer Kern transportiert diese Wärme durch Konvektion nach außen an den Grund der Sonnenatmosphäre. Die Wärme wird dann ausschließlich durch Strahlungstransport nach außen durch die Sonnenatmosphäre ins Weltall transportiert. Auf die Eigenschaften des Kerns der Sonne geht er nicht weiter ein. Er nimmt nur an, dass der Kern an seiner Grenzfläche die Sonnenatmosphäre **gleichmäßig** erwärmt. **Ganz wichtig ist, dass diese Erwärmung so gleichmäßig erfolgt, dass es in der Sonnenatmosphäre nicht zur Ausbildung von Konvektionsströmungen kommt.**

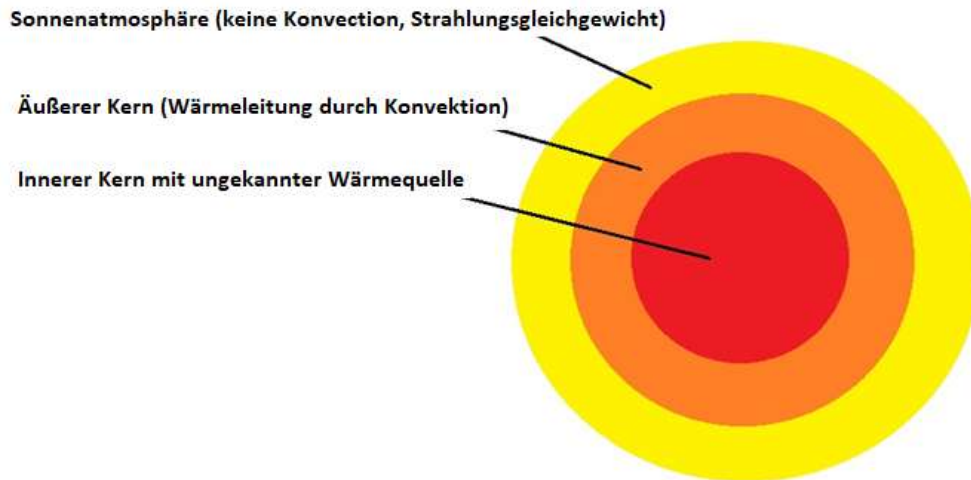


Abbildung 10: Schematische Darstellung von Schwarzschilds Modell der Sonnenatmosphäre

Die Sonnenatmosphäre soll in Schwarzschilds Modell folgende Eigenschaften haben (Abbildung 11):

- **Die Sonnenatmosphäre ist stabil geschichtet, ohne Konvektion.** D.h. Temperatur und Dichte nehmen von der Obergrenze der Atmosphäre bis zum Boden kontinuierlich so zu, dass das Vertikalprofil (Temp) kleiner ist als das adiabatische Vertikalprofil.
- Jede Schicht der Sonnenatmosphäre absorbiert und emittiert Strahlung.
- Der Energiefluss, der von einer unbekannten Quelle im Inneren der Sonne durch die Sonnenatmosphäre in den Außenraum fließt, befindet sich in einem stationären Zustand. Dies setzt eine **homogene Temperaturverteilung in der Sonnenatmosphäre** voraus.
- Die Zustandsgrößen (Druck, Temperatur, Dichte, Transparenz,...) ändern sich kontinuierlich vom Außenbereich bis zum Grund der Sonnenatmosphäre.
- Streuung und Beugung von Strahlung in der Sonnenatmosphäre werden vernachlässigt.
- Die Absorption von Strahlung ist in der Sonnenatmosphäre unabhängig von der Wellenlänge.
- Die Abnahme der Schwerkraft mit zunehmender Höhe wird vernachlässigt.
- Die kugelförmige Ausbreitung der Strahlung wird nicht beachtet.

12

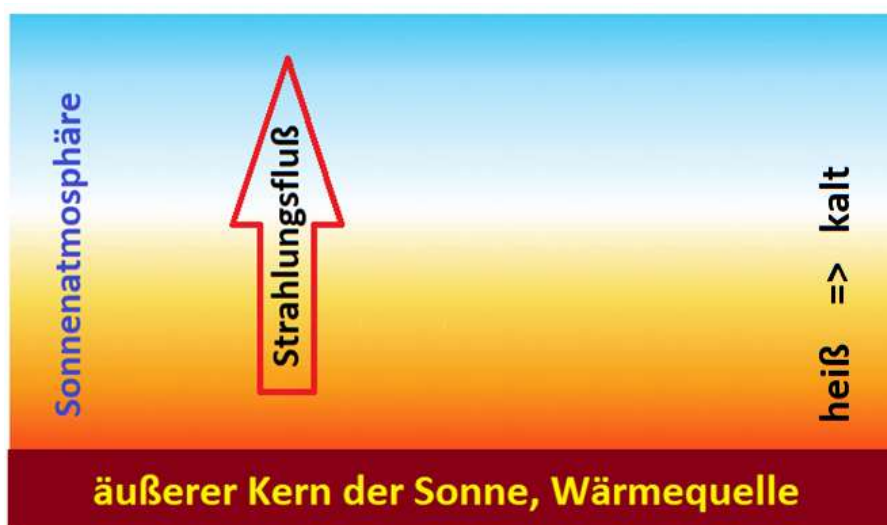


Abbildung 11: Schwarzschilds Sonnenatmosphäre: Stabile Schichtung => keine Konvektion, stationärer Strahlungsfluß

Schwarzschild teilt die durch diese Randbedingungen definierte Sonnenatmosphäre (Abbildung 11) in konzentrische, infinitesimal dünne Schichten ein (Abbildung 12). Diese Schichten sind so dünn, dass zwischen ihnen praktisch keine Temperaturdifferenz besteht. **Dadurch ist gewährleistet, dass das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz auf den Strahlungsaustausch zwischen benachbarten Schichten anwendbar ist.** Jede dünne Schicht kann so Strahlung absorbieren und **verlustfrei** wieder emittieren (**Strahlungsenergieerhaltung**).

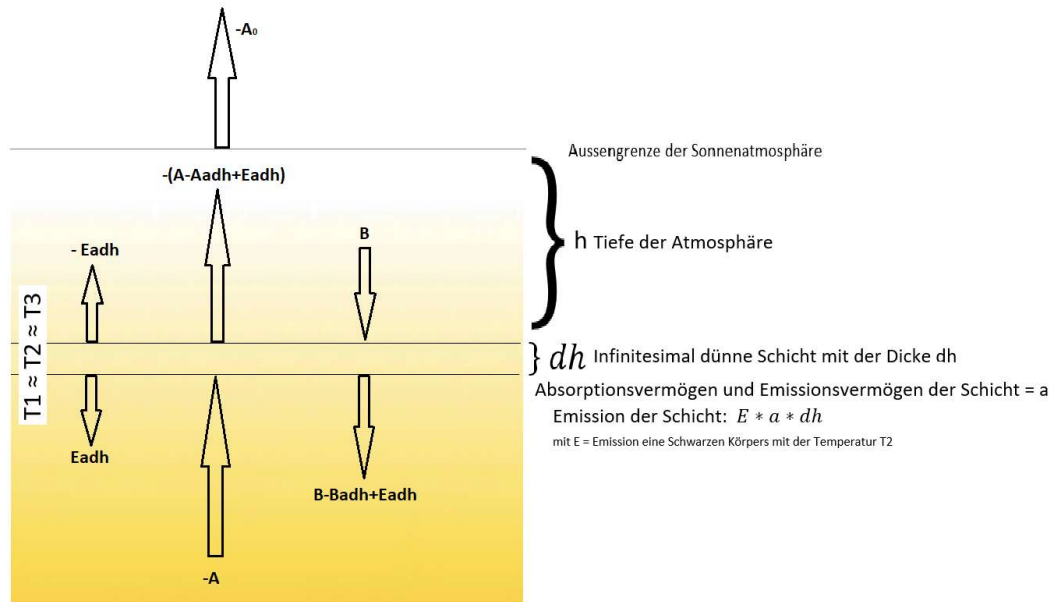


Abbildung 12: Strahlungsbilanz einer dünnen Schicht in Schwarzschilds Sonnenatmosphärenmodell

Aus der Strahlungsbilanz dieser Schichten leitet Schwarzschild unter anderem eine nach innen laufende Rückstrahlung B ab.

$$B = \frac{A_0}{2} m$$

Mit: A_0 = an der Außengrenze der Atmosphäre austretende Strahlung, m = optische Masse der über der Tiefe h liegenden Atmosphäre.

D.h. in Schwarzschilds Modell ist die Rückstrahlung B eine Funktion der optischen Masse der **gesamten** über dem Beobachtungspunkt liegenden Atmosphäre.

Auf die Erdatmosphäre übertragen würde das bedeuten:

- Die gesamte Luftsäule strahlt auf die Erdoberfläche zurück.
- Ein Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen erhöht die optische Masse der Atmosphäre und damit die Rückstrahlung der Atmosphäre.

Schwarzschilds Gleichungen liefern genau das, was die Klimawissenschaft braucht. Die moderne Klimawissenschaft geht deshalb großzügig über die Randbedingungen unter welchen die Gleichungen hergeleitet wurden hinweg und wendet die Mathematik des Modells auf die Erdatmosphäre an. In wie weit das gerechtfertigt ist, werden wir im Folgenden sehen.

Der interessierte Leser findet diverse Beschreibungen von Schwarzschilds Herleitung im Internet. Für die hier geführte Diskussion genügt es zu wissen, unter welchen Randbedingungen die Rückstrahlung B hergeleitet wurde.

Besonders auffällig ist, daß Schwarzschild sein Modell praktisch um das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz herum konstruiert hat. Er muss eine Reihe nicht besonders plausibler Annahmen machen um zwischen den Schichten der Atmosphäre ein **lokales thermisches Gleichgewicht** zu schaffen (Abbildung 13).

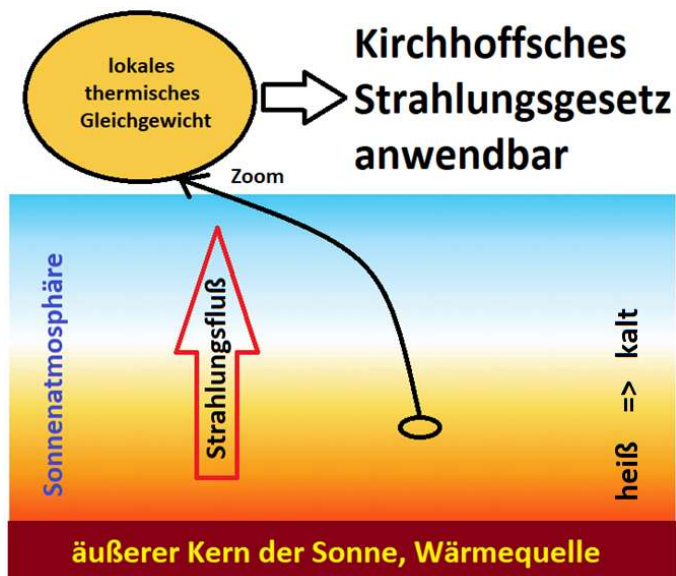


Abbildung 13: Lokales thermisches Gleichgewicht als Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes

Die meisten dieser Annahmen dienen dazu Konvektion in seinem Modell zu verhindern.

Denn sobald Konvektion ins Spiel kommt ist die Bedingung des lokalen thermischen Gleichgewichtes nicht mehr erfüllt. Durch Konvektionsströmungen und den damit verbundenen Turbulenzen wird Schwarzschilds homogene Schichtung der Atmosphäre zerstört. Es entstehen große lokale Temperatursprünge. Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz ist deshalb nicht mehr anwendbar (Abbildung 14).

14

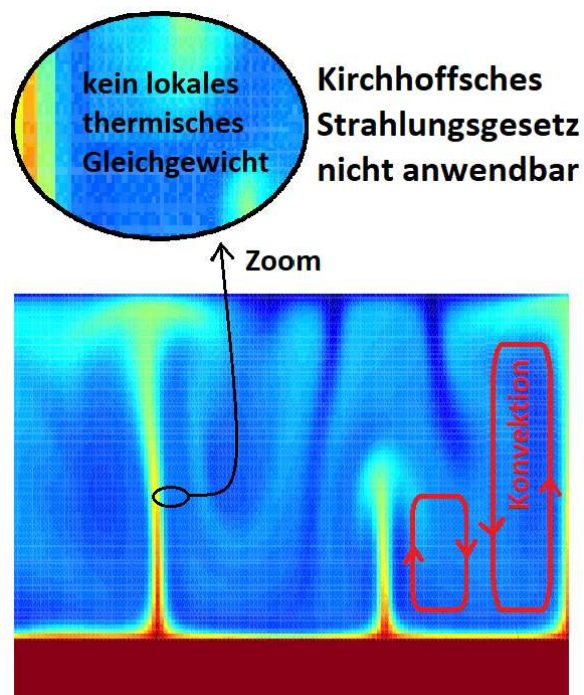


Abbildung 14: Kirchhoffsches Strahlungsgesetz nicht mit Konvektion vereinbar.

Zusammenfassend und etwas abstrakter formuliert heißt das: Um die Voraussetzungen für einen reinen Strahlungstransport durch die Sonnenatmosphäre zu schaffen, muss Schwarzschild eine Atmosphäre mit einem sehr hohen Ordnungsgrad konstruieren. In flüssigen oder gasförmigen Systemen wird ein solcher Zustand schon durch geringe Störungen dazu veranlasst in einen ungeordneten, konvektiv/turbulenten Zustand überzugehen. Unter konvektiv/turbulenten Bedingungen hat das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz und damit die Lösung der Strahlungstransportgleichung keine Gültigkeit (Abbildung 15).

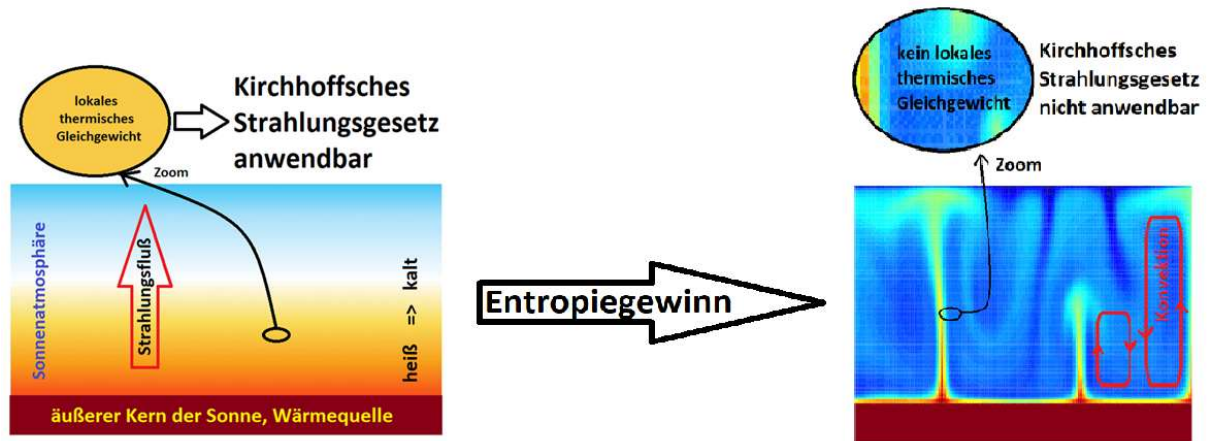


Abbildung 15: Zusammenbruch des Strahlungstransportes

Dieser Übergang in den konvektiv/turbulenten Zustand findet unter großem Entropiegewinn statt. Er ist deshalb **spontan und irreversibel**. „Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik sorgt für einen Zusammenbruch des Strahlungstransportes in einer konvektiven Atmosphäre“.

Noch anschaulicher wird das, wenn wir ein „rein mechanisches Konvektionsmodell“ unter dem Aspekt des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes betrachten.

Ein idealisierter (reibungsfreier) Konvektionsstrom (Abbildung 16) leistet keine Arbeit.

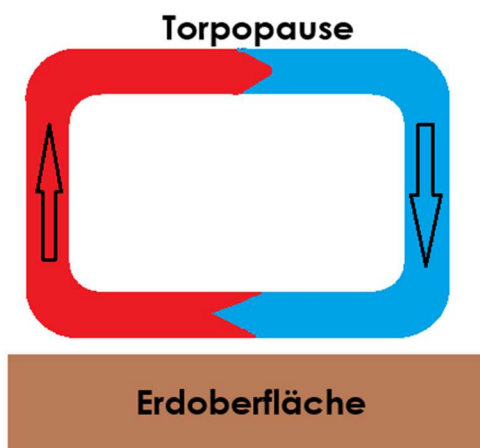


Abbildung 16: Idealisierter Konvektionsstrom

Die im aufsteigenden Teil des Konvektionsstromes durch Expansion geleistete Volumenarbeit läßt die aufsteigende Luft abkühlen. Im absteigenden Teil des Konvektionsstromes wird dieselbe Arbeit durch Kompression wieder frei und bewirkt eine Erwärmung der absteigenden Luft.

Oder anders ausgedrückt: Der Konvektionsstrom beschreibt einen geschlossenen Weg im konservativen Schwerfeld der Erde und leistet deshalb keine Arbeit.

Dennoch hat Konvektion einen dramatischen Einfluß auf den Strahlungstransport durch die Troposphäre. Der Konvektionsstrom nimmt von der Erdoberfläche Wärme durch Diffusion und Strahlungsabsorption auf und gibt sie im oberen Teil als Wärmestrahlung wieder Richtung Weltraum ab. Der Konvektionsstrom transportiert Wärme von der Erdoberfläche an die Grenze der Troposphäre, auch wenn er, von Reibungsverlusten abgesehen, selbst keine Arbeit leistet.

D.h. unter konvektiven Bedingungen wird der bodennahe Teil des Konvektionsstromes zu einem Netto-Strahlungsabsorber und der obere Teil des Konvektionsstromes, entlang der Tropopause, wird zu einem Netto-Strahlungsemitter (Abbildung 17).

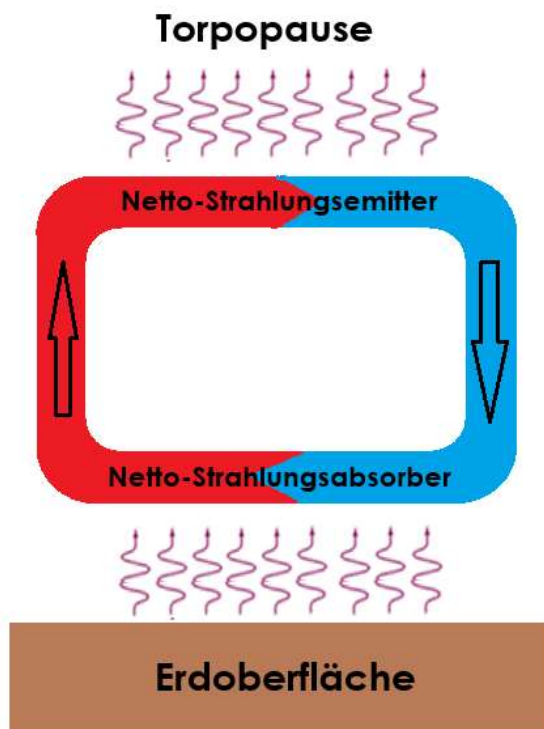
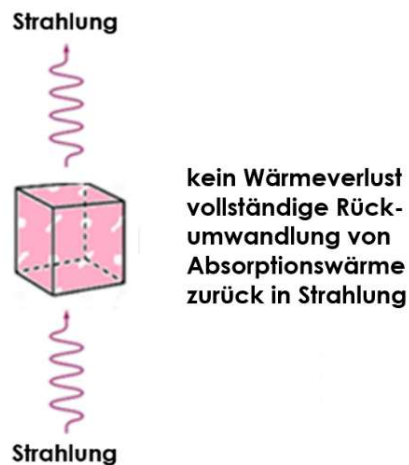


Abbildung 17: Der bodennahe Teil des Konvektionsstromes ist ein Netto-Strahlungsabsorber. Der obere Teil des Konvektionsstromes ist Netto-Strahlungsemitter.

Die zur Lösung der Strahlungstransportgleichung verwendete Randbedingung, daß jede Luftschicht genauso viel Strahlung absorbiert wie sie emittiert, ist nicht mehr erfüllt. Die unter dieser Randbedingung (Gültigkeit des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes in der Troposphäre) hergeleiteten Lösungen der Strahlungstransportgleichung liefern daher keine sinnvollen Aussagen, wenn man versucht eine konvektive Atmosphäre mit ihnen zu beschreiben.

Um die Auswirkung von Konvektion auf ein Strahlungstransportgleichgewicht etwas konkreter zu beschreiben, betrachten wir ein Volumenelement, das an einer festen Position in Schwarzschilds Modellatmosphäre fixiert ist (Abbildung 18). Das Volumenelement absorbiert die vom Kern aufsteigende Strahlung und wandelt sie in Wärme um. Diese Wärme wandelt es dann wieder vollständig zurück in Strahlung um, die das Volumenelement wieder verläßt. **D.h. das Volumenelement ist nur deshalb für die Strahlung „durchlässig“, weil es die bei der Strahlungsabsorption freigesetzte Wärme wieder vollständig in Strahlung umwandelt.**

Kirchhoffsches Strahlungsgesetz (Strahlungsenergie-Erhaltung)



Konvektion => Wärmeabfluß (Strahlungsauslöschung)



Abbildung 18: Ein Volumenelement in Schwarzschilds Sonnenatmosphärenmodell vs. ein Volumenelement in unserer Troposphäre.

Wenn nun das Volumenelement von einem Konvektionsstrom durchflossen wird, der die Absorptionswärme abführt, ist eine vollständige Rückumwandlung der Absorptionswärme zurück in Strahlung nicht mehr möglich. **Durch diesen Wärmeabfluß wird das Volumenelement für die Wärmestrahlung undurchlässig.**

D.h. sobald Schwarzschilds konvektionslose Modellatmosphäre gestört wird und in Bewegung kommt, muß sich eine für Wärmestrahlung undurchlässige Konvektionsschicht ausbilden, die die Wärme an die äußere Grenze der Atmosphäre transportiert. Dort kann die Wärme dann in Strahlung umgewandelt und ins Weltall abgegeben werden.

Es ist also zu erwarten, daß der Bereich der Atmosphäre, der Strahlung mit der Erdoberfläche austauscht durch eine strahlungsundurchlässige Konvektionsschicht von dem Bereich der Atmosphäre der in den Weltraum abstrahlt getrennt ist.

Oder mit anderen Worten. Die Konvektionsschicht sorgt für eine Entkopplung der Oberflächenstrahlung von der aus den hohen Schichten der Atmosphäre ins Weltall abgegebenen Strahlung (Abbildung 19).



Abbildung 19: In einer konvektiven Atmosphäre muß sich eine für die Treibhausgasfrequenzen undurchlässige Konvektionsschicht ausbilden.

In flüßigen Medien ergibt sich auch aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik die Notwendigkeit eines konvektiven Wärmetransportes, weil eine verlustfreie Umwandlung von Strahlung in Wärme und wieder zurück in Strahlung nicht möglich ist. In der Konvektionsschicht erfolgt der geforderte Verlust durch konvektiven Wärmeabfluß. An der äußeren Grenze der Konvektionsschicht kommt die Entropie dadurch zu ihrem Recht, daß hier größere Wellenlängen abgestrahlt werden als von der Oberfläche des äußeren Kerns.

Zusammenfassend können wir schon nach dieser oberflächlichen Betrachtung feststellen, daß die unter der Annahme der Gültigkeit des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes hergeleiteten Lösungen der Strahlungstransportgleichung zur Beschreibung unserer von Konvektionsströmungen beherrschten Erdatmosphäre ungeeignet sein müssen.

Anmerkungen: Das heißt nicht, dass Schwarzschilds Modell vollkommen unbrauchbar ist. Oberhalb der Troposphäre kommt die Konvektion nahezu zum Erliegen. Dadurch herrschen in der Stratosphäre Bedingungen, die dem von Schwarzschild vorgeschlagenen Modell nicht unähnlich sind. In wie weit sich das auf die Oberflächentemperatur der Erde auswirkt, besprechen wir nachdem wir uns mit der Spektroskopie der Treibhausgase beschäftigt haben.

Schwarzschilds Idee hat auch eine technische Anwendung. Strahlungstransportmodelle werden benutzt um das Abkühlverhalten großer halbtransparenter Systeme ohne Konvektion beschreiben zu können. Zum Beispiel kann die Abkühlung großer Glasobjekte während des Produktionsprozesses erfolgreich mit der Strahlungstransportgleichung modelliert werden, sobald das Objekt so weit erstarrt ist, daß keine Konvektion mehr auftritt. Frank-Thomas Lentz, Schott Glaswerke Mainz:

https://kluedo.ub.rptu.de/frontdoor/deliver/index/docId/743/file/itwm_4.pdf

Im folgenden Kapitel gehen wir mehr ins Detail und sehen uns an was auf Molekülebene bei der Wechselwirkung von Wärmestrahlung mit unserer Atmosphäre vor sich geht.

18

Treibhauseffekt auf molekularer Ebene - Eine spektroskopische Betrachtung

Was passiert hier wirklich?

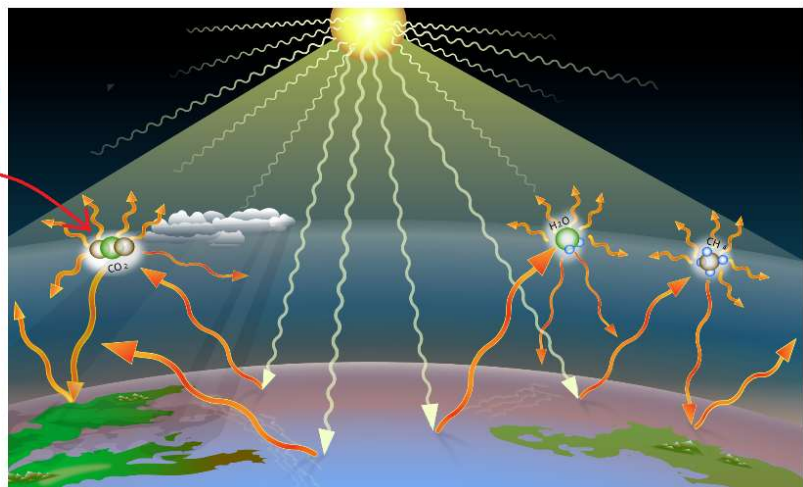


Abbildung 20: Wie funktioniert die Rückstrahlung auf Molekülebene?

Wie schon erwähnt, soll der Treibhauseffekt dadurch Zustandekommen, daß Treibhausgasmoleküle von der Erdoberfläche ausgehende Infrarotstrahlung absorbieren und auf die Erdoberfläche zurückstrahlen.

Interessanterweise gehen die moderne Klimawissenschaft und entsprechende populärwissenschaftliche Veröffentlichungen auf diesen „Rückstrahlvorgang“ nicht näher ein, obwohl das Absorptions- und Emissionsverhalten von Treibhausgasmolekülen sehr gut untersucht und bekannt ist.

Ähnlich wie bei der (falschen) Herleitung des 33°C-Treibhauseffektes und der Strahlungstransportgleichung verbergen sich auch hier einige Überraschungen. Wir wechseln deshalb vom Makrokosmos in den Mikrokosmos um uns anzusehen, was auf Molekülebene bei diesem „mysteriösen“ Rückstrahlvorgang vor sich geht.

Bevor wir die Wechselwirkung von Treibhausgasmolekülen mit Wärmestrahlung besprechen, ist es sinnvoll sich nochmal ein paar Grundlagen zu vergegenwärtigen.

Um Emission und Absorption von Wärmestrahlung zu erklären bemühen wir eine Analogie zur Funktechnik.

Elektromagnetische Strahlung kann mittels einer Dipolantenne, an die man ein elektrisches Wechselfeld anlegt, erzeugt werden. Das periodisch wechselnde Dipolmoment der Antenne induziert die magnetische Komponente der von der Antenne abgegebenen elektromagnetischen Welle (Abbildung 21).

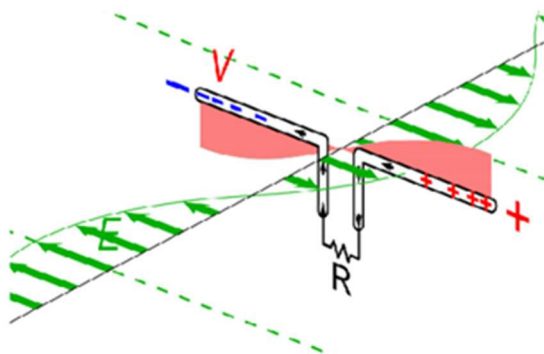


Abbildung 21: Schema einer Dipolantenne

Die Dipolantenne kann auch elektromagnetische Strahlung absorbieren, wenn die Wellenlänge der Strahlung zu den Dimensionen der Antenne paßt.

Das Dipolmoment ist definiert als das Produkt der Ladungsdifferenz Q mal dem Abstand zwischen den Ladungszentren d .

$$\mathbf{P} = \mathbf{d} \times \mathbf{Q}$$

Feststoffe bestehen aus geladenen Teilchen. Diese Teilchen sind nicht absolut fest an ihren Positionen fixiert. Aufgrund der thermischen Bewegung schwingen sie ein wenig um ihre „Nullposition“ (Abbildung 22). Die Schwingungen verändern die Abstände zwischen den geladenen Teilchen, und da das Dipolmoment das Produkt aus dem Abstand zwischen den Ladungen und der Ladungsdifferenz ist, ändern sich dabei die Dipolmomente. Ähnlich wie eine Dipol-Radioantenne sendet eine solche Anordnung schwingender Ladungen elektromagnetische Strahlung aus.

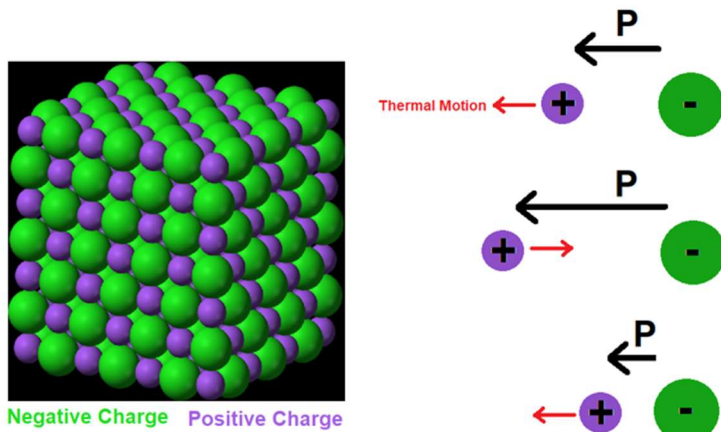


Abbildung 22: Das Zustandekommen der Wärmestrahlung von Festkörpern

Weil sich in einem aus sehr vielen Teilchen bestehenden Festkörper die Schwingungen sehr vieler Teilchen überlagern, senden Festkörper keine scharf begrenzten Frequenzen, sondern ein Kontinuum an Frequenzen aus.

Diese Analogie zur Funktechnik macht zwar das Zustandekommen von Wärmestrahlung irgendwie verständlich, kann aber nicht die in Experimenten beobachtete Abhängigkeit der spektralen Strahlungsdichte von Wellenlänge und Temperatur (Abbildung 23) erklären.

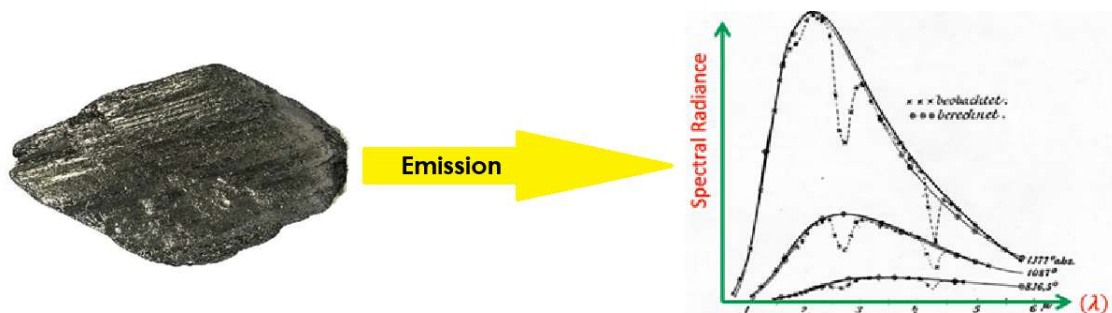


Abbildung 23: Emissionsspektrum von Festkörpern

Max Planck gelang es eine Theorie zu entwickeln, die die von einem idealisierten Festkörper (einem sogenannten „Schwarzen Strahler“) abgegebene Wärmestrahlung in guter Übereinstimmung mit der experimentellen Beobachtung beschreibt.

Um das zu erreichen, mußte er die Annahme machen, daß die von Festkörpern abgegebene Wärmestrahlung nicht als kontinuierliche elektromagnetische Welle, sondern in diskreten Portionen mit dem Energieinhalt $E = h\nu$ abgegeben wird (mit h : plancksches Wirkungsquantum und ν : Frequenz).

Diese gequantelte Beschreibung der Natur nennt man Quantenmechanik um sie von der alten/klassischen Physik, die die „Welt“ als Kontinuum beschreibt zu unterscheiden. In der Quantenmechanik beschreibt man elektromagnetische Strahlung nicht als kontinuierliche elektromagnetische Welle, sondern als Strom einzelner Lichtteilchen, sog. Photonen. Photonen sind die Träger der Strahlungsenergie. Die Energie der Photonen hängt von der Wellenlänge der Strahlung ab. Je kurzwelliger die Strahlung ist, desto höher ist der Energieinhalt ihrer Photonen.

Absorption und Emission von Strahlung durch ein Objekt werden in der Quantenmechanik als Wechselwirkung des Objektes mit Photonen der absorbierten bzw. emittierten Strahlung beschrieben.

Ein tieferes Verständnis dieser Vorgänge kann man sich anhand entsprechender Lehrbücher oder Youtube-Vorlesungen erarbeiten. Um die Argumentation der folgenden Kapitel verstehen zu können reicht es aus sich Folgendes zu merken:

- Auf Atom/Molekülebene beschreibt man elektromagnetische Strahlung als einen Strom von einzelnen Lichtteilchen (Photonen).
- Photonen sind die Träger der Energie der Strahlung.
- Die Energie der Photonen hängt von der Wellenlänge der Strahlung ab (Je kürzer die Wellenlänge der Strahlung desto höher der Energieinhalt ihrer Photonen).

Bevor wir auf die Wechselwirkungen von Treibhausgasmolekülen mit Wärmestrahlung eingehen, besprechen wir noch kurz und oberflächlich wie man diese Wechselwirkungen beobachten und messen kann.

Wie beobachtet/misst man die Wechselwirkung von IR-Strahlung mit Treibhausgasmolekülen?

Das wichtigste Instrument zur Untersuchung dieser Wechselwirkungen ist das IR-Spektrometer. Die meisten IR-Spektrometer können im Wellenzahlenbereich von 4000cm^{-1} bis 400cm^{-1} messen. Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise eines solchen Gerätes sind recht einfach (Abbildung 24).

Aufbau eines dispersiven IR-Spektrometers

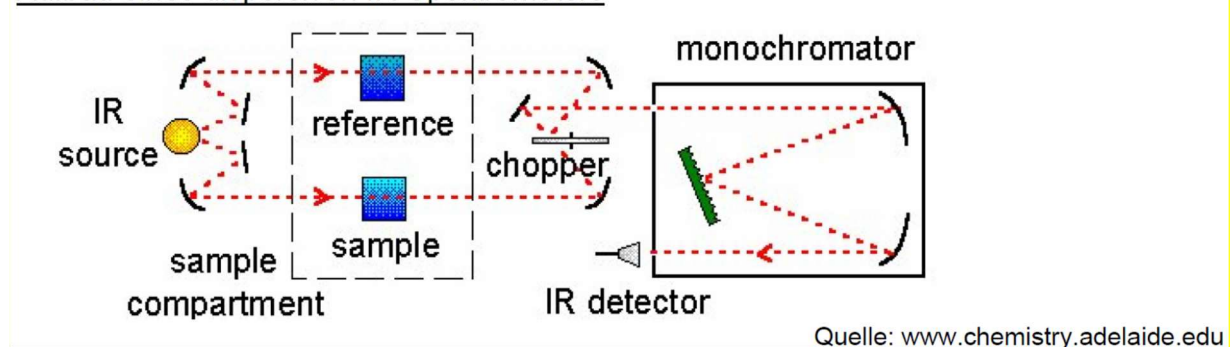


Abbildung 24: Quelle Skript Uni-Mainz: Schematischer Aufbau eines Zweistrahl-IR-Spektrometers

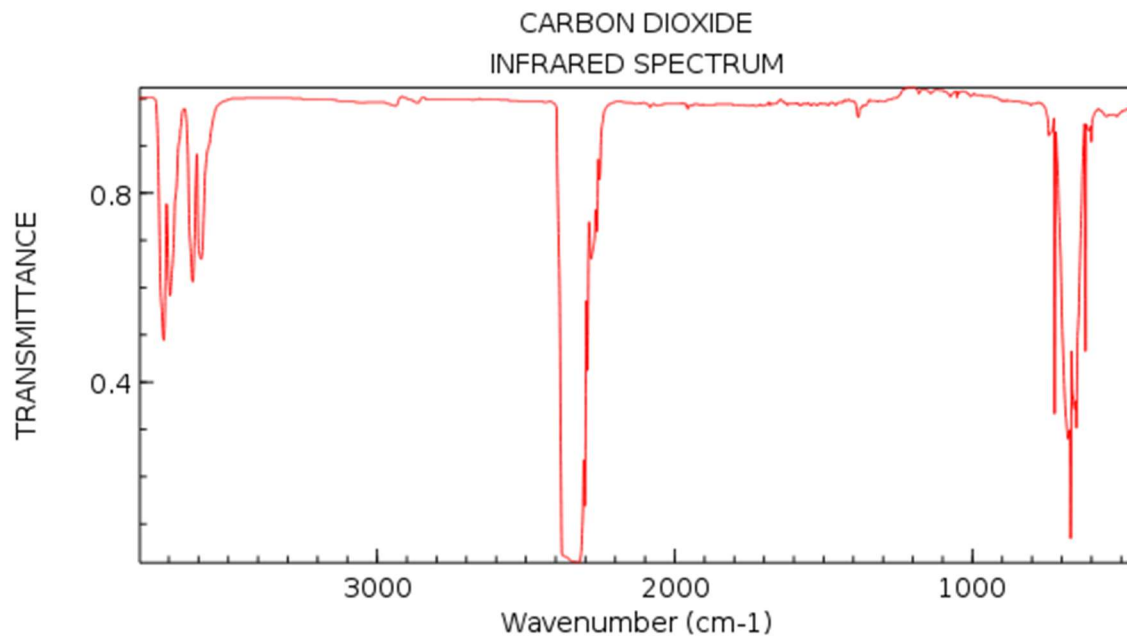
In einem IR-Spektrometer teilt man die Strahlung einer IR-Quelle (IR-Source, meist ein elektrisch geheizter Glühstab) in zwei gleiche Strahlen auf. Den einen Strahl schickt man durch eine Probe (Sample), den anderen Strahl schickt man durch eine Referenz (Vergleich). Als Referenz dient oft ein leerer Probenbehälter. Ein rotierender Spiegel (Chopper) lenkt abwechselnd den Probenstrahl und den Referenzstrahl in den Monochromator. Der Monochromator spaltet die einfallende IR-Strahlung in Strahlen verschiedener Wellenlängen auf und lässt nur eine bestimmte Wellenlänge zum Detektor durch (ähnlich wie ein Prisma das sichtbare Licht in seine Farben aufspaltet). Dadurch, dass der rotierende Spiegel abwechselnd IR-Strahlung aus der Probe und der Referenz in den Monochromator leitet, kann man im Detektor die Durchlässigkeit der Probe mit der Durchlässigkeit der Referenz vergleichen. Zur Aufnahme eines Spektrums wird der Monochromator so verstellt, dass er nacheinander alle Wellenlängen von 400cm^{-1} bis 4000cm^{-1} abfährt. Parallel dazu zeichnet der Detektor auf, wie durchlässig die Probe im Vergleich zur Referenz bei der jeweiligen Wellenlänge ist.

IR-Spektrometer liefern ein Diagramm, in dem die Durchlässigkeit einer Probe für IR-Strahlung als Funktion der Wellenlänge der IR-Strahlung dargestellt wird. Eine solche Darstellung nennt man IR-Spektrum. In Abbildung 25 ist ein IR-Spektrum von CO_2 -Gas dargestellt.

Die Durchlässigkeit einer Probe, oft auch Transmission (Formelzeichen: τ) genannt, gibt den Bruchteil der Strahlung an, der die Probe durchdringen kann.

Transmission $\tau = 1$ heißt, die Probe ist für Licht vollständig durchlässig. $\tau = 0,5$ heißt, es geht die Hälfte des eingestrahlten Lichtes durch die Probe. Der Rest wird absorbiert. $\tau = 0$ heißt die Probe ist undurchlässig.

In der IR-Spektroskopie ist es üblich statt der Wellenlänge die Wellenzahl anzugeben. Die Wellenzahl gibt an, wie viele Wellenlängen auf einen Zentimeter passen. Die Wellenzahl hat die Einheit cm^{-1} .



NIST Chemistry WebBook (<http://webbook.nist.gov/chemistry>)

Abbildung 25: IR-Spektrum von CO_2 . Quelle: NIST

Im oben dargestellten IR-Spektrum des CO_2 kann man deutlich erkennen, daß in bestimmten Bereichen die Durchlässigkeit sehr gering ist. In diesen Wellenlängenbereichen kann das CO_2 -Molekül Strahlung absorbieren. Für die Klimadiskussion interessiert uns nur die starke Absorption bei der Wellenzahl ca. 666cm^{-1} (die anderen CO_2 -Absorptionen werden von Absorptionen des atmosphärischen Wasserdampfes überdeckt). Wenn man diese Wellenzahl in Wellenlänge umrechnet, ergibt sich eine Wellenlänge von $\lambda = 0,01\text{m}/666 = 0,000015\text{m} = 15\mu\text{m}$.

Mit Hilfe der Plank-Gleichung und der Wellenlänge der absorbierten Photonen können wir uns einen Eindruck davon verschaffen welche Energie bei einem solchen Absorptionsvorgang umgesetzt wird. Für den Fall der $15\mu\text{m}$ -Absorption des CO_2 ergibt sich.

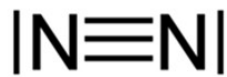
$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad \text{mit } h = 6,626069 \cdot 10^{-34} \text{ J sec Planck'sches Wirkungsquantum, } c:$$

Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) $c = 299792458\text{m/s} \approx 3 \cdot 10^8\text{m/s}$, λ : Wellenläng, ν : Frequenz

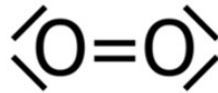
$$E = \frac{6,626069 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{15 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \approx 1,3 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

Was sind Treibhausgase?

Luft besteht hauptsächlich aus den Gasen Stickstoff und Sauerstoff (Abbildung 26). In den Molekülen dieser Gase sind die Ladungen gleichmäßig über das gesamte Molekül verteilt. Auch durch Schwingungen dieser Moleküle werden keine Dipolmomente erzeugt. Stickstoff und Sauerstoff können deshalb IR-Strahlung weder absorbieren noch emittieren.



Stickstoff: 79%



Sauerstoff: 21%

Abbildung 26: Hauptbestandteile der Luft ohne Dipolmoment.

Im Gegensatz dazu haben Treibhausgasmoleküle wie z.B. Wasser und CO₂ Dipolmomente. Sie können deshalb mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirken.

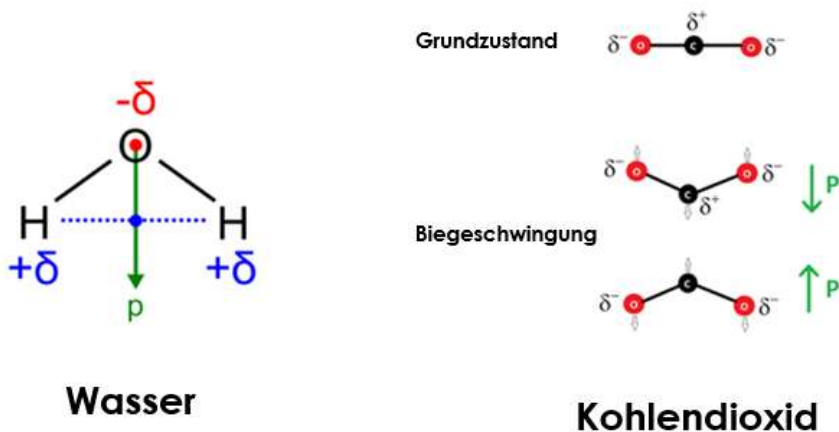


Abbildung 27: Treibhausgase mit Dipolmoment

Wasser hat ein permanentes Dipolmoment. Beim CO₂ entsteht das Dipolmoment erst durch die Schwingung des Moleküls (Abbildung 27).

Am Beispiel des CO₂ besprechen wir diese Vorgänge etwas genauer.

CO₂ ist ein stabförmiges Molekül, in dem ein Kohlenstoffatom mit zwei Sauerstoffatomen verbunden ist (Abbildung 28). Als Ganzes ist es elektrisch neutral. Weil aber die Atomkerne der Sauerstoffatome im CO₂ die Bindungselektronen stärker anziehen als der Kern des Kohlenstoffatoms, trägt das Kohlenstoffatom (in der Mitte des Moleküls) eine schwache positive Ladung während die Sauerstoffatome schwache negative Ladungen tragen.

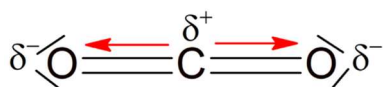


Abbildung 28: Ladungsverteilung im CO₂-Molekül

Um das Schwingungsverhalten des CO₂ zu verstehen, kann man sich die Bindungen zwischen den Atomen ähnlich wie Spiralfedern vorstellen. Die elastischen Eigenschaften der Bindungen

lassen es zu, dass das Molekül Biegeschwingungen und Streckschwingungen (Valenzschwingungen) durchführt (Abbildung 29).

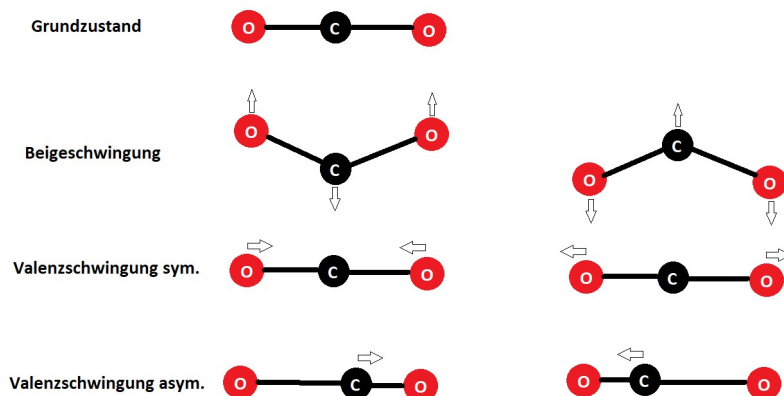


Abbildung 29: Schwingungsmöglichkeiten des CO₂-Moleküls. Biegeschwingung: absorbiert bei 666cm⁻¹, als Notation für diesen Zustand wird oft die Abkürzung (01¹0) verwendet; die symmetrische Valenzschwingung: ist nicht IR-aktiv (Raman bei 1366cm⁻¹), die asymmetrische Valenzschwingung: absorbiert stark bei 2349cm⁻¹

Bei der Biegeschwingung und bei der asymmetrischen Streck- oder Valenzschwingung verschiebt sich der Ladungsschwerpunkt des Moleküls. D.h. diese Schwingungen erzeugen ähnlich wie eine Stabantenne wechselnde elektrische Felder. Dementsprechend können diese beiden Schwingungsmodi elektromagnetische Strahlung absorbieren und aussenden.

Bei der symmetrischen Valenzschwingung ändert sich das Dipolmoment des CO₂-Moleküls nicht. Dieser Schwingungsmodus kann deshalb IR-Strahlung weder absorbieren noch emittieren.

24

Während eine an einer Spiralfeder schwingende Masse einen weiten Bereich an Energien aufnehmen und abgeben kann, kann jede Schwingungsart des CO₂-Moleküls nur ganz bestimmte Energiebeträge aufnehmen oder abgeben. Man spricht hier von Energiequantelung. Mehr dazu findet man in Spektroskopielehrbüchern wie z.B. Hesse/Meier/Zeeh.

Im IR-(Absorptions-)Spektrum des CO₂ erkennt man die Wellenlängen/Wellenzahlen, bei denen die CO₂-Moleküle Energie aus der eingestrahlten IR-Strahlung absorbieren daran, dass die Durchlässigkeit der Probe (Transmission) bei diesen Wellenlängen geringer wird.

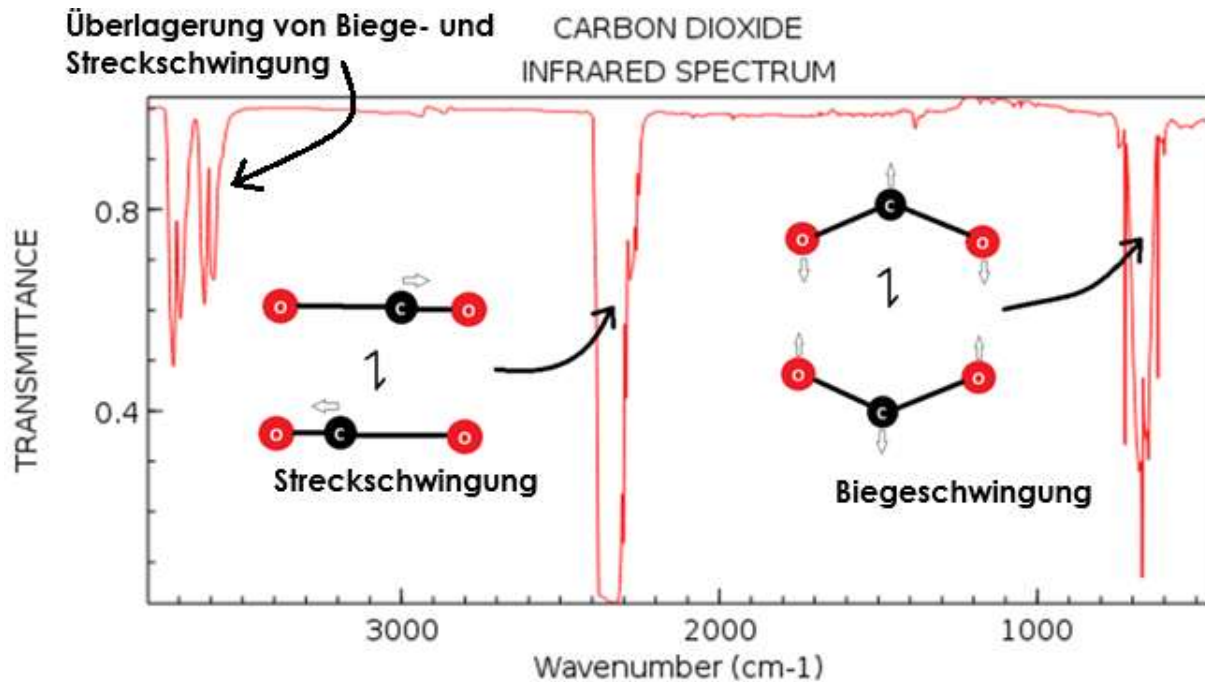


Abbildung 30: Die im IR-Spektrum des CO₂ sichtbaren Schwingungsmodi

Die asymmetrische Streckschwingung des CO₂ absorbiert bei einer Wellenzahl von 2349cm⁻¹. Die Biegeschwingung des CO₂ absorbiert bei der Wellenzahl 666cm⁻¹, d.h. bei einer Wellenlänge von ca. $\lambda = 15\mu\text{m}$ (Abbildung 30). Die Absorption im Bereich von 3700cm⁻¹ kommt durch Überlagerung der zuvor besprochenen Schwingungen zustande. Dazu kann man in diesem Video mehr erfahren: <https://www.youtube.com/watch?v=fs-omlbSBGI&t=277s>

25

Bandenverbreiterung

Nach dem was eben über die Energiequantelung gesagt wurde sollte man im Absorptions- und Emissionsspektrum von Treibhausgasen dünne, scharfe Absorptionslinien für die jeweiligen Energieniveaus der einzelnen Molekülschwingungen erwarten (ähnlich den bekannten Fraunhoferlinien, die man im Sonnenspektrum beobachten kann).

Stattdessen beobachtet man recht breite Absorptionsbanden. Diese Verbreiterung der Absorptionslinien hat verschiedene Ursachen.

- Aufgrund des Unschärfeprinzips sind Absorptions- und Emissionslinien von Treibhausgasmolekülen keine wirklich eindimensionalen Linien, sondern dünne Bänder. Dieser relativ geringe Verbreiterungseffekt wird als natürliche Linienverbreiterung bezeichnet
- Auch die Bewegungen der Moleküle verbreitern die Absorptions- und Emissionslinien aufgrund des Doppler-Effekts.
- Kollisionen mit anderen Gasmolekülen verursachen eine weitere Verbreiterung der Absorptions- und Emissionsbänder, die sogenannte Druckverbreiterung.

Abhängig von Druck und Temperatur beobachtet man deshalb mehr oder weniger breite Absorptions- und Emissionsbanden statt scharfer Linien (Abbildung 31).

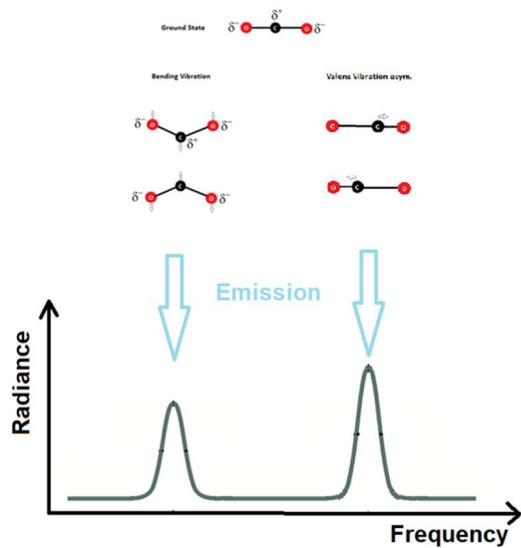


Abbildung 31: Emissionsbanden

Mit steigendem Druck und steigender Temperatur werden die IR-Emissionen und -Absorptionen von Treibhausmolekülen immer breitbandiger. Deshalb beobachtet man in der Atmosphäre, bedingt durch hohe Temperatur und hohen Druck mit abnehmender Höhe eine starke Bandenverbreiterung (Abbildung 32).

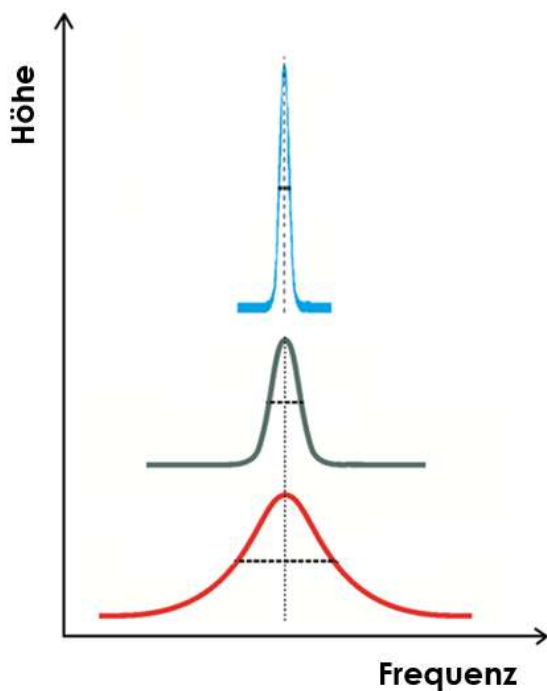


Abbildung 32: Druckbedingte Bandenverbreiterung

Ähnlich wie bei Festkörpern beobachtet man auch bei Gasen eine Temperaturabhängigkeit der abgestrahlten Strahlungsdichte, die der Planck-Verteilung folgt. In Abbildung 33 ist am Emissionsspektrum von Luft die Planckverteilung als Umhüllende deutlich zu erkennen. Da die die Strahlung emittierenden Treibhausgasmoleküle nicht alle Frequenzen durch ihre Molekülschwingungen erzeugen können, hat das Emissionsspektrum entsprechende Lücken.

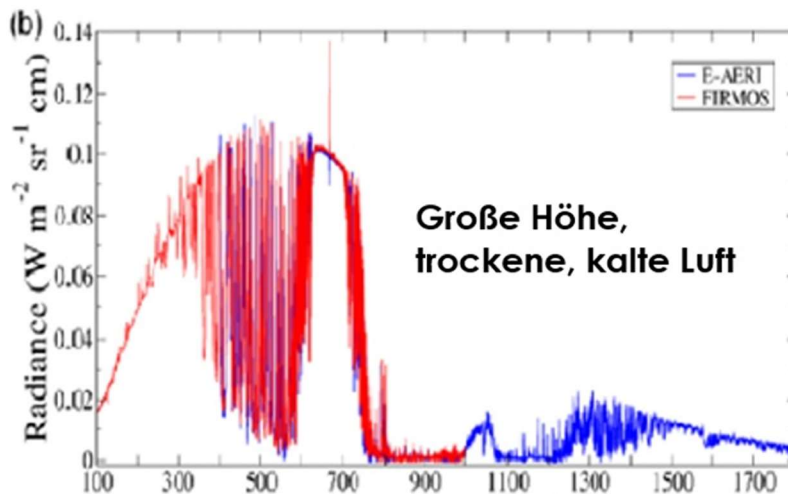


Abbildung 33: Emissionsspektrum von trockener, kalter Luft in größerer Höhe (Zugspitze, Quelle: <https://essd.copernicus.org/articles/13/4303/2021/>)

Im hier gezeigten Emissionsspektrum sind die Emissionsbanden von Wasser und CO₂ recht scharf aufgelöst, weil es in großer Höhe bei niedrigem Druck und tiefer Temperatur in sehr trockener Luft aufgenommen wurde.

Mit steigendem Druck, Luftfeuchte und Temperatur werden die Absorptionen immer unschärfer. Auf Meereshöhe geht die Emission der Luft daher in ein Kontinuum über (Abbildung 34).

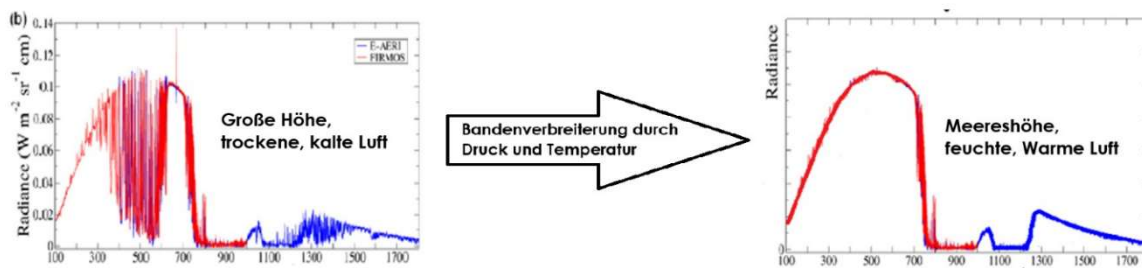


Abbildung 34: Bei ausreichend hohem Druck, Temperatur und Luftfeuchte gehen die Absorptionsbanden in ein Kontinuum über.

Das atmosphärische Emissionsspektrum gleicht dann einer Planck- oder Schwarzkörperstrahlungs-Kurve mit einer Lücke.

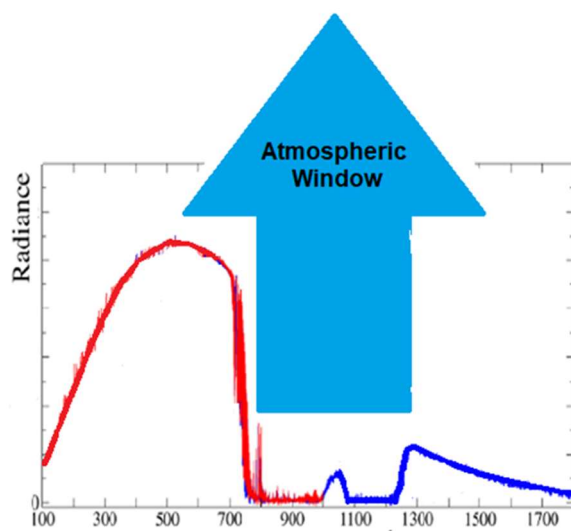


Abbildung 35: Atmosphärisches Fenster

Diese Lücke tritt in dem Bereich auf, in dem Treibhausgase keine Strahlung emittieren oder absorbieren können. Da die von der Erdoberfläche auf diesen Frequenzen emittierte Schwarzkörperstrahlung die Atmosphäre weitgehend ungehindert durchdringen kann, wird sie als atmosphärisches Fenster bezeichnet (Abbildung 35). In den in Abbildung 36 dargestellten Emissionsspektren ist gut zu erkennen, wie sich bei hoher Luftfeuchte unterhalb der 700cm^{-1} praktisch ein „Wasserdampfkontinuum“ ausbildet.

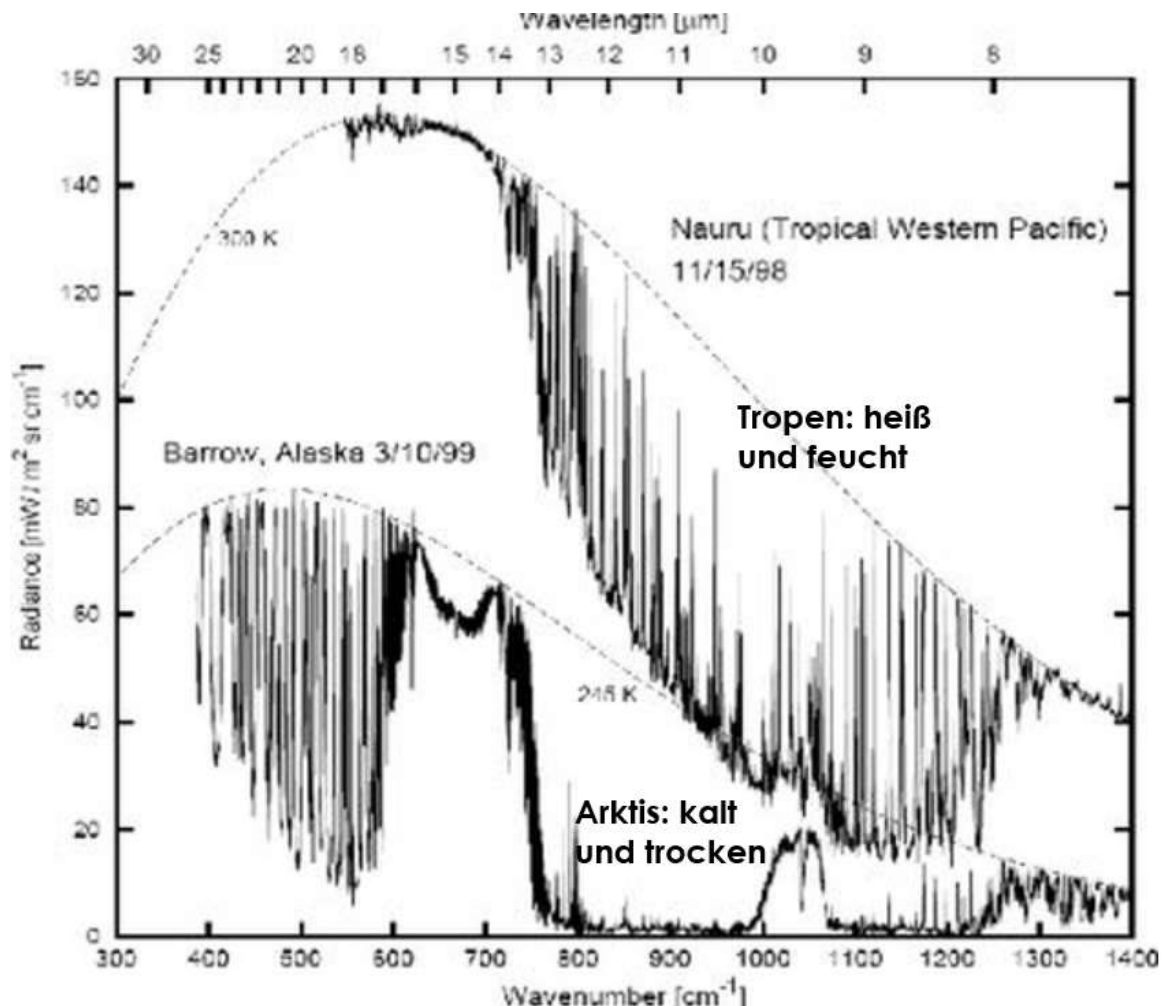


Abbildung 36, Atmosphärisches Emissionsspektrum für zwei verschiedene Orte auf der Erdoberfläche in Abhängigkeit der Wellenlänge [Quelle: Petty, 2006], Quelle TU Dresden, <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/fern/studium/tutorial/atmosphaerische-korrekturen/040000/041200>

An dieser Stelle sei noch erwähnt, daß die druckbedingte Bandenverbreiterung in den hohen Schichten der Atmosphäre die ungestörte Abstrahlung ins Weltall (Abbildung 37) erleichtert. In den tieferen Schichten erschwert/verhindert die Bandenverbreiterung die Rückstrahlung auf die Erdoberfläche. Ein Effekt, auf den John Strong schon 1950 hingewiesen hat (THE EFFECT OF PRESSURE BROADENING OF SPECTRAL LINES ON ATMOSPHERIC TEMPERATURE* John Strong and Gilbert N. Plass Johns Hopkins University Received June 24, 1950) <https://adsabs.harvard.edu/full/1950ApJ...112..365S>

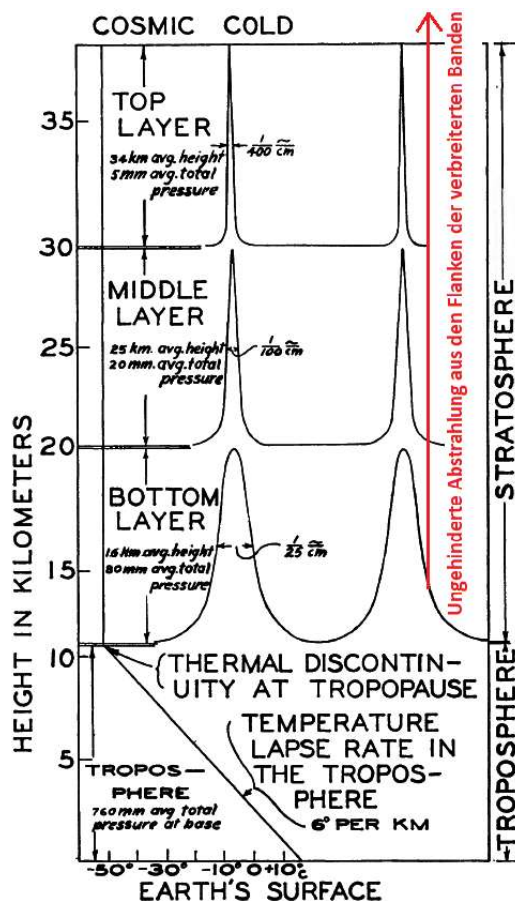


FIG. 1.—Line width, pressure, and temperature of the atmosphere. This figure illustrates the importance of line width for radiative cooling.

29

Abbildung 37: Bandenverbreiterung erlaubt eine fast ungestörte Abstrahlung aus der unteren Stratosphäre und trägt zur Stabilisierung der stabilen Schichtung der Stratosphäre bei.

Anmerkung: Weshalb das Emissionsspektrum von Gasen der Planck-Verteilung („Schwarzkörperverteilung“) folgt und wie das mit der Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Teilchengeschwindigkeiten zusammenhängt, hat A. Einstein in seiner Arbeit „Die Quantentheorie der Strahlung“ aus dem Jahr 1917 diskutiert.

Für die hier geführte Argumentation ist nur von Bedeutung, daß die Umhüllende Planckverteilung ein Hinweis darauf ist, daß das Emissionsspektrum durch thermisch angeregte Emissionen von Treibhausgasen in der Luft zustande kommt.

Was passiert, wenn CO₂ mit Infrarotlicht wechselwirkt?

Literatur dazu: H. Hug, *Chemische Rundschau*, 20. Febr., S. 9 (1998) ; „Der anthropogene Treibhauseffekt – eine spektroskopische Geringfügigkeit“ <https://www.eike-klima-energie.eu/wp-content/uploads/2016/12/Hug-pdf-12-Sept-2012.pdf> .

In Abbildung 38 ist die 666cm^{-1} Absorptionsbande des CO₂ in hoher Auflösung dargestellt. Links und rechts von dieser Bande liegen mehrere kleine Absorptionen, die dadurch zustande kommen, dass die Biegeschwingung des CO₂-Moleküls von Drehbewegungen des CO₂-Moleküls überlagert wird (sog. Rotationsseitenbanden).

Um zu zeigen wie sich die Anwesenheit anderer Gasmoleküle auf das Absorptionsverhalten von CO₂-Molekülen auswirkt, wurden in Abbildung 38 drei CO₂-Spektren mit verschiedenen Gasbeimischungen übereinandergelegt. Bei allen drei Spektren war die gleiche Anzahl von CO₂-

Molekülen im Strahlengang des Spektrometers. Es wurde reines CO_2 , CO_2 verdünnt mit Helium und CO_2 verdünnt mit Stickstoff gemessen. **Man erkennt, dass die Stärke der CO_2 -Absorptionsbande stark davon abhängt, welche Gase neben CO_2 in der Probe enthalten sind.**

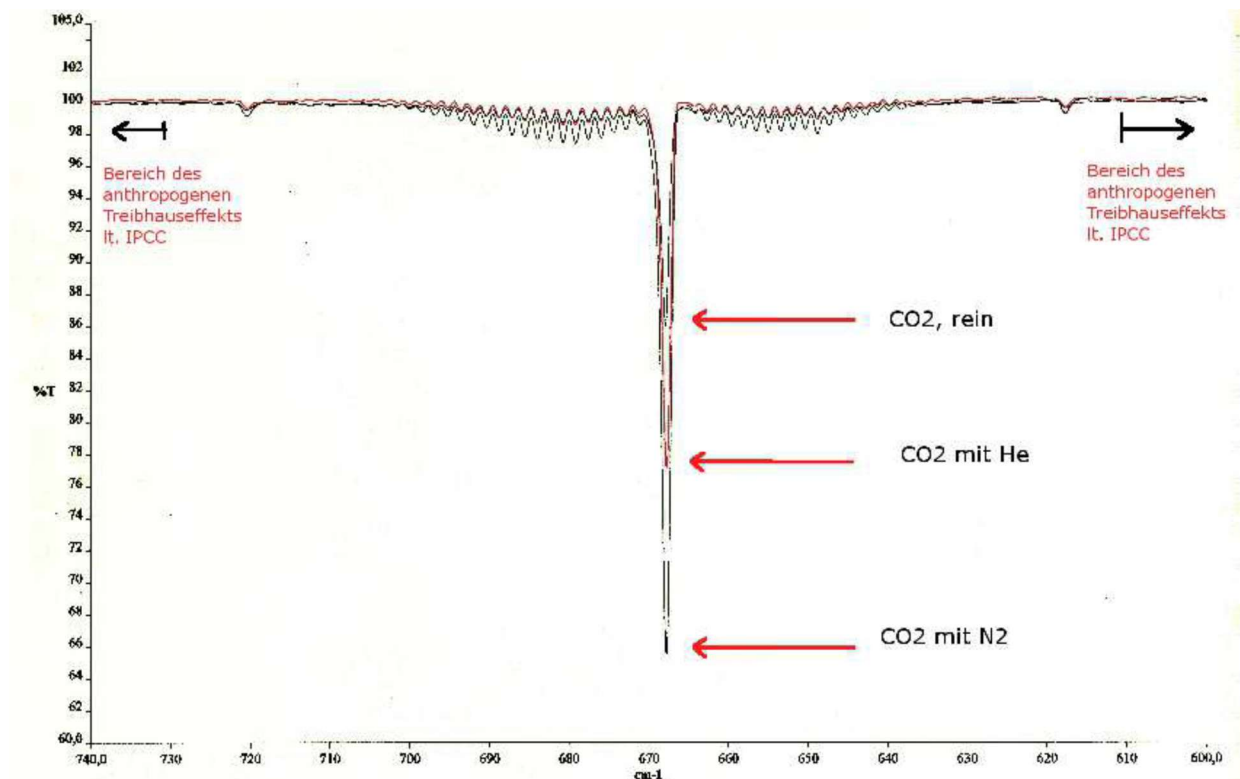


Abbildung 38: Quelle H.Hug: CO_2 -Absorptionsbande bei 666cm^{-1} gemessen in reinem CO_2 , in Mischung mit Helium und in Mischung mit Stickstoff. Bei allen Messungen ist die gleiche Zahl von CO_2 -Molekülen in der Probe, <https://www.eike-klima-energie.eu/wp-content/uploads/2016/12/Hug-pdf-12-Sept-2012.pdf>

Dieser Effekt ist von zentraler Bedeutung für den Wärmetransport in der Erdatmosphäre. Um zu verstehen, wie dieser Effekt zustande kommt, müssen wir die folgenden Vorgänge besprechen:

- Absorption und Emission von $15\mu\text{m}$ -IR-Strahlung durch CO_2
- Absorption von $15\mu\text{m}$ -IR-Strahlung und Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärme (**Thermalisierung**) durch CO_2
- Thermische Anregung und Emission von $15\mu\text{m}$ -IR-Strahlung durch CO_2

Absorption und Emission von $15\mu\text{m}$ -IR-Strahlung durch CO_2

Wenn ein CO_2 -Molekül von einem Photon mit der Wellenlänge $15\mu\text{m}$ getroffen wird, kann es die Energie dieses Photons aufnehmen. Dabei geht es vom Grundzustand der Biegeschwingung, in dem es keine Biegeschwingung ausführt, in einen Zustand höherer Energie (angeregter Zustand, oft abgekürzt als (01^10)) über, in dem es die oben beschriebene Biegeschwingung ausführt. In diesem angeregten Zustand speichert das CO_2 -Molekül die Energie des absorbierten Photons in Form von Schwingungsenergie (siehe Energiediagramm Abbildung 39). Dieser angeregte Zustand ist für eine kurze Zeitspanne stabil. Wenn das CO_2 -Molekül in seinen Grundzustand zurückkehrt, gibt es wieder ein Photon ab und hört auf zu schwingen. Die Abgabe des Photons erfolgt zufällig in irgendeine Raumrichtung.

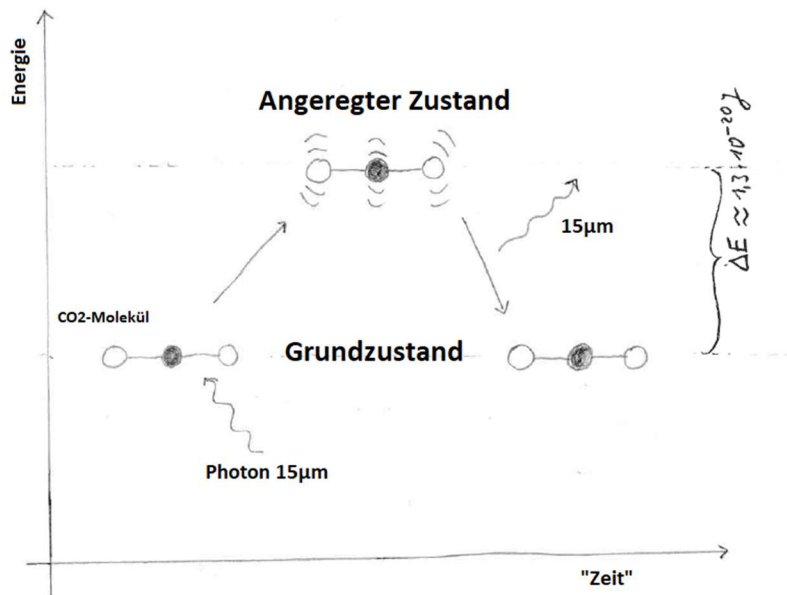


Abbildung 39: Energiediagramm Anregung CO₂-Molekül

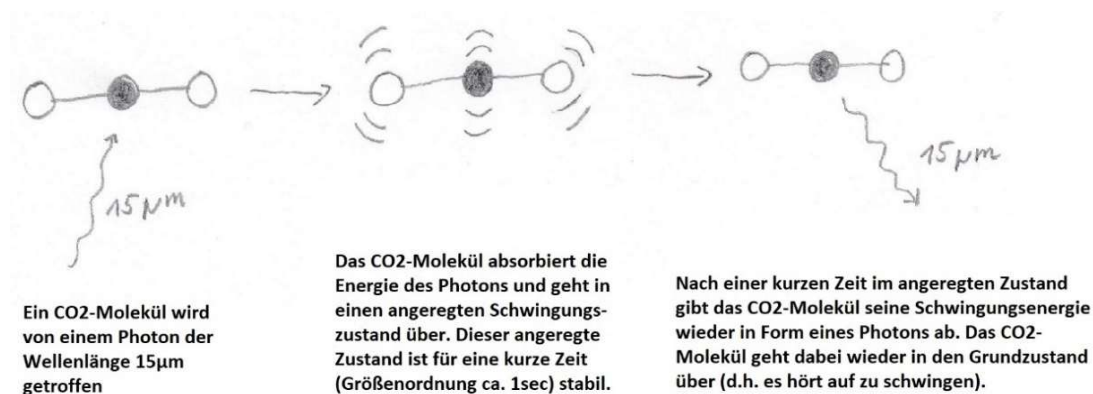


Abbildung 40: Absorption und Emission eines Photons durch CO₂

Wichtig ist dabei, dass CO₂ nur aus dem Grundzustand der Biegeschwingung 15µm-Strahlung absorbieren kann. Der angeregte Zustand der Biegeschwingung kann keine 15µm-Strahlung absorbieren.

Eine quantenmechanische Beschreibung solcher Vorgänge findet man unter A. Einstein, Physikalische Zeitschrift 18, 121, 1917 The Quantum Theory of Radiation; https://www.informationphilosopher.com/solutions/scientists/einstein/1917_Radiation.pdf. In der HITRAN-Datenbank (https://www.spectralcalc.com/spectral_browser/db_data.php) findet man die Konstanten, die diesen Vorgang beschreiben. Für die stärkste Absorption des CO₂ ist dort eine Zerfallskonstante von $K_d = 1,542\text{s}^{-1}$ angegeben, woraus sich eine Halbwertszeit des angeregten CO₂-(01'0) Schwingungszustandes von ca. 0,45s ergibt. Also eine „Lebensdauer“ in der Größenordnung einer halben Sekunde. Auf die Berechnung dieser Halbwertszeit gehen wir später genauer ein.

Absorption und Thermalisierung von 15µm-IR-Strahlung durch CO₂

Wenn ein CO₂-Molekül im angeregten Zustand mit einem anderen Gasmolekül zusammenstößt, kann seine Schwingungsenergie auf das stoßende Gasmolekül übertragen werden (Abbildung

41). Nach dieser Übertragung der Schwingungsenergie ist das CO₂-Molekül wieder in seinen Grundzustand zurückgekehrt. Es kann dann wieder ein passendes Photon absorbieren. Das Molekül, das mit dem angeregten CO₂ zusammengestoßen ist, setzt dabei die auf es übertragene Energie in Bewegungsenergie um. D.h. das am Stoß beteiligte Gasmolekül bewegt sich nach dem Zusammenstoß mit dem angeregten CO₂-Molekül schneller als vor dem Zusammenstoß.

Da die Temperatur ein Maß dafür ist, wieviel Bewegungsenergie die Moleküle eines Gases haben, wird das Gas bei diesem Vorgang wärmer.

Bei diesem Vorgang wird Wärmestrahlung in Molekülbewegung d.h. Wärme überführt. Diese Umwandlung von Strahlungsenergie in Wärme wird auch „**Thermalisierung**“ genannt.

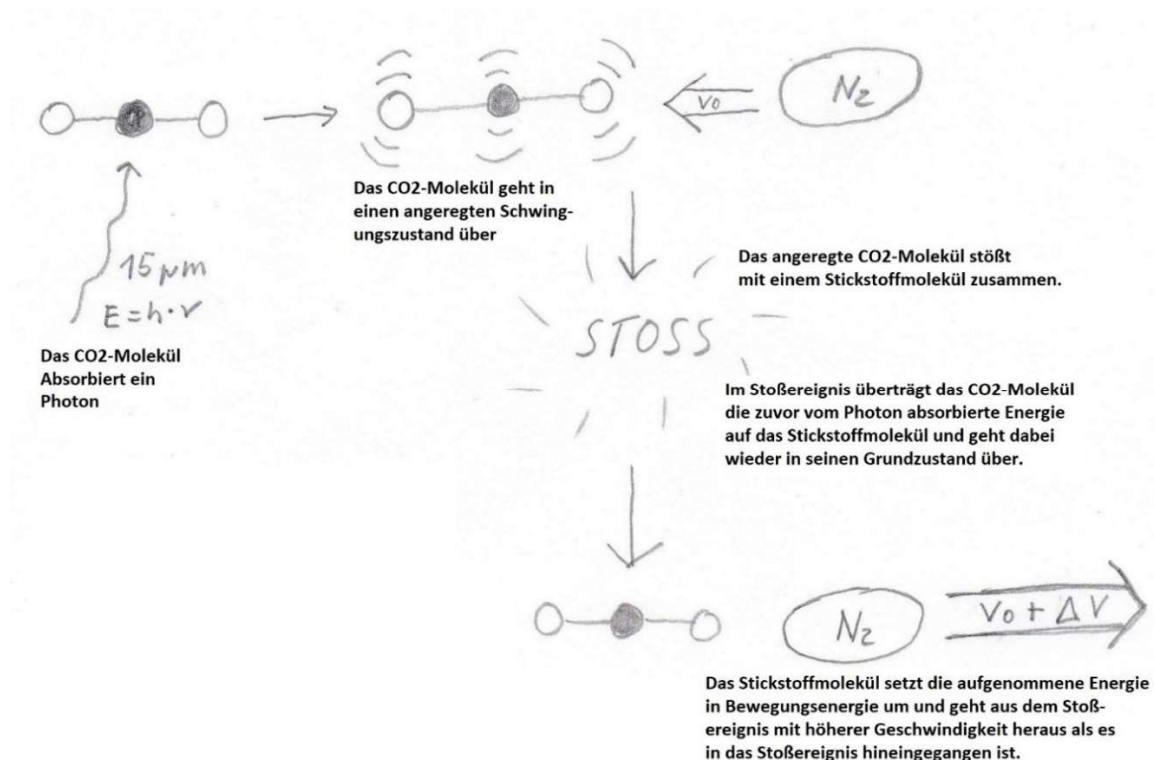


Abbildung 41: Thermalisierung

Unter Normaldruck (ca. 1bar) stoßen Luftmoleküle ca. $7 \cdot 10^9 \approx 10^{10}$ mal pro Sekunde mit anderen Luftmolekülen zusammen. Bei einem Mischungsverhältnis von CO₂-Molekülen zu Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen von ca. 1:2500 wird die zuvor vom CO₂ absorbierte Strahlungsenergie hauptsächlich auf IR-inaktive Luftbestandteile übertragen.

Anhand dieser Zahlen kann man erahnen, daß die Thermalisierung in der unteren Atmosphäre die Absorption und Reemission der 15µm-Strahlung praktisch vollständig unterdrückt. Auf das Ausmaß der Thermalisierung werden wir später im Detail eingehen.

Thermische Anregung und Emission von 15µm-IR-Strahlung durch CO₂

Auch der umgekehrte Vorgang ist möglich. Ein im Grundzustand befindliches CO₂-Molekül nimmt bei einem Zusammenstoß mit einem anderen Gasmolekül so viel Energie auf, dass es in den angeregten Schwingungszustand übergeht. Anschließend kann es ein Photon aussenden und wieder in seinen Grundzustand zurückkehren. Bei diesem Vorgang wird Bewegungsenergie der Gasmoleküle in Wärmestrahlung umgewandelt. **Das Gas kühlt dabei ab.** Dieser Vorgang wird **thermisch angeregte Emission** genannt (Abbildung 42).

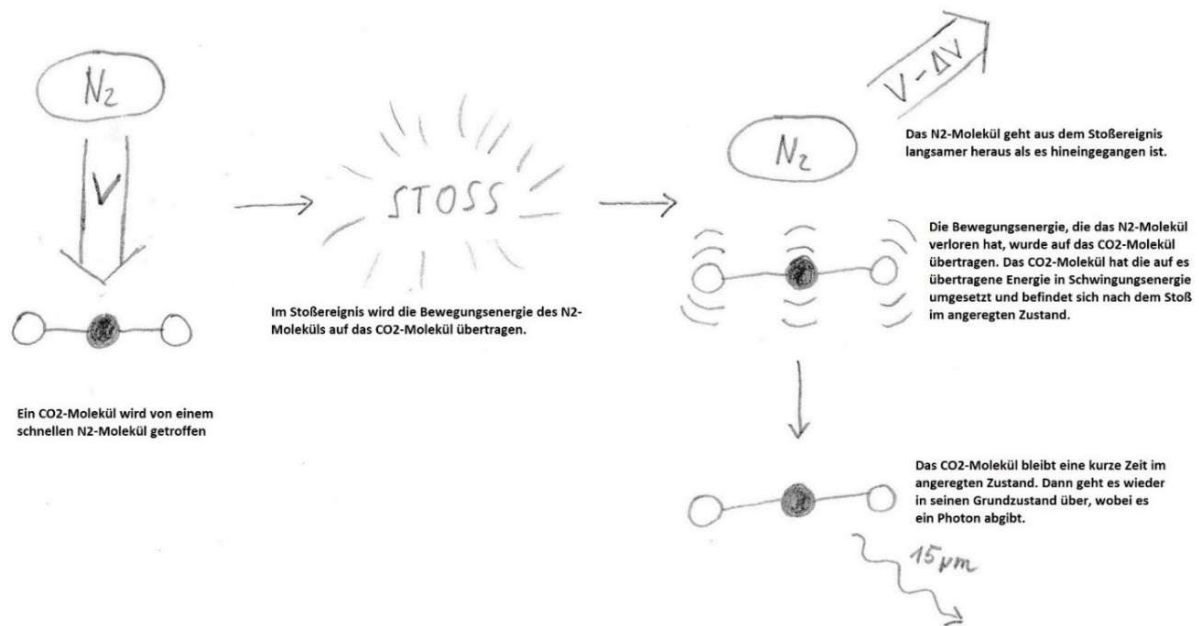


Abbildung 42: Thermisch angeregte Emission

Andere Treibhausgasmoleküle wie zum Beispiel Wasser, Methan, Schwefelhexafluorid, usw. Verhalten sich im Prinzip genauso.

Weil es so wichtig ist, will ich nochmal kurz zusammenfassen, wie Treibhausgasmoleküle mit IR-Strahlung der passenden Wellenlänge wechselwirken können.

1. Treibhausgasmoleküle können IR-Strahlung mit geeigneter Wellenlänge absorbieren, die dabei aufgenommene Energie eine kurze Zeit speichern und dann wieder als IR-Strahlung in irgendeine Richtung abgeben.
2. Treibhausgasmoleküle können IR-Strahlung mit geeigneter Wellenlänge absorbieren und dann die absorbierte Energie an andere Gasmoleküle weitergeben. Dadurch erwärmt sich die Luft (Thermalisierung).
3. Treibhausgasmoleküle können beim Zusammenstoß mit anderen Luftmolekülen Energie aufnehmen und dann die auf sie übertragene Energie als IR-Strahlung abgeben. Dabei kann sich die Luft abkühlen (thermisch angeregte Emission).

Jetzt wird verständlich wieso CO_2 in Mischung mit anderen Gasen stärker absorbiert als in seiner reinen Form. In Gasmischungen übertragen CO_2 -Moleküle, nachdem sie IR-Strahlung absorbiert haben und sich im angeregten Zustand befinden ihre Schwingungsenergie auf andere Gasmoleküle. Durch diese Energieübertragung auf andere Gasmoleküle eröffnet sich den CO_2 -Molekülen, neben der Emission von IR-Strahlung ein alternativer, sehr schneller Weg, in ihren Grundzustand zurückzukehren. Daher ist in Gasmischungen der Anteil der im Grundzustand befindlichen CO_2 -Moleküle größer als im reinen CO_2 . Entsprechend beobachtet man in Gasmischungen eine stärkere CO_2 -Absorption als in reinem CO_2 .

Im reinen CO_2 kann ein CO_2 -Molekül im angeregten Zustand seine Energie nur an andere CO_2 -Moleküle weitergeben, die dabei ihrerseits in den angeregten Zustand übergehen können. In der Summe wird dabei der Anteil der im Grundzustand vorliegenden CO_2 -Moleküle nicht größer. Deshalb ist die Absorptionsbande im reinen CO_2 schwächer als in Mischungen mit anderen Gasen (Abbildung 52).

Wie schon angemerkt ist dieses Verhalten von CO_2 recht gut untersucht, sodaß wir das oben beschriebene Verhalten auch mit konkreten Zahlen unterfüttern können.

Stabilität des angeregten Schwingungszustandes (01¹0) des CO₂

Ähnlich wie beim radioaktiven Zerfall instabiler Atomkerne, ist es nicht so, dass der angeregte Zustand eine bestimmte Lebensdauer hat. Der Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand erfolgt zufällig. D.h. wenn man einen einzigen angeregten Zustand beobachtet kann man nicht vorhersagen, ob er sofort abstrahlen oder noch ein paar Sekunden weiter schwingen wird. Erst wenn man eine große Anzahl angeregter Zustände beobachtet, erkennt man eine Regelmäßigkeit in der Zerfallsrate der angeregten Zustände. Für die angeregten Zustände (01¹0) kann man ein Zerfallsgesetz formulieren:

$$N_i(t) = N_0 e^{-K_d t}$$

Mit: $N_i(t)$: Anzahl der zur Zeit t im angeregten Zustand befindlichen CO₂-Moleküle
 N_0 : Anzahl der zur Zeit $t = 0$ im angeregten Zustand befindlichen CO₂-Moleküle
 $K_d = 1,542\text{s}^{-1}$: Zerfallskonstante (HITRAN-Datenbank)
https://www.spectralcalc.com/spectral_browser/db_data.php
 t : Zeit [s]

Nach diesem Zerfallsgesetz wird die Anzahl der angeregten Zustände $N_i(t)$ nie ganz auf null fallen. D.h. man kann keine Zeit angeben, nach der alle angeregten Zustände in den Grundzustand zurückgekehrt sind. Deshalb behilft man sich damit, die Zeit anzugeben, nach der die Hälfte der angeregten Zustände in den Grundzustand zurückgekehrt ist. Das ist die sogenannte Halbwertszeit $t_{1/2}$.

Wenn die Halbwertszeit abgelaufen ist gilt: $\frac{N_i(t)}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-K_d t_{1/2}}$

Nach $t_{1/2}$ auflösen: $\ln(1/2) = -K_d t_{1/2}$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{K_d} = \frac{\ln(2)}{1,542\text{ s}^{-1}} \approx 0,45\text{s}$$

Damit ergibt sich eine durchschnittliche Lebensdauer τ des angeregten Zustandes der Biegeschwingung von:

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln(2)} = \frac{0,45\text{s}}{0,693} \approx 0,65\text{s}$$

Thermalisierung von 15µm-IR-Strahlung in der Atmosphäre

Weil CO₂ ein beliebtes LASER-Medium ist, wurde dieser Vorgang sehr gründlich untersucht. Die im Folgenden benutzten Zahlen stammen aus folgender Veröffentlichung:

[The vibrational deactivation of the \(000¹\) and \(01¹0\) Modes of CO₂ measured down to 140 K](#) by Siddles, Wilson, Simpson, Chemical Physics 189 (1994) 779-91

Ein CO₂-Molekül erleidet bei 300K (Raumtemperatur) und Atmosphärendruck pro Sekunde ca. $7 \cdot 10^9 \approx 10^{10}$ Zusammenstöße mit anderen Gasmolekülen. Die Lebensdauer des angeregten 15µm-Schwingungszustandes, das heißt die Zeit, die zwischen Absorption und Emission eines Photons vergeht, liegt in der Größenordnung von einer Sekunde. Dieses Zahlenverhältnis lässt erahnen, dass ein CO₂-Molekül unter diesen Bedingungen kaum eine Chance hat, ein zuvor absorbiertes Photon wieder abzustrahlen.

Bei Atmosphärendruck und 295K (ca. 22°C) wurden für die strahlungslose Deaktivierung des angeregten Zustandes der 15µm-Absorption des CO₂ in Stickstoff und Sauerstoff folgende Thermalisierungsraten („quenching rates“) bestimmt.

$$K_{N_2} = 5,5 * 10^{-15} \frac{cm^3}{Moleküle * sec}$$

$$K_{O_2} = 3,1 * 10^{-15} \frac{cm^3}{Moleküle * sec}$$

Für Luft, eine Mischung von ca. 20% Sauerstoff und 80% Stickstoff schätzen wir daher die Thermalisierungsrate zu:

$$K_{Luft} \approx (0,2 * 3,1 + 0,8 * 5,5) * 10^{-15} \frac{cm^3}{Moleküle * sec}$$

$$K_{Luft} \approx 5 * 10^{-15} \frac{cm^3}{Moleküle * sec}$$

Weil es nicht ganz leicht fällt sich unter dieser Zahl etwas „Greifbares“ vorzustellen, rechnen wir jetzt aus, wie oft pro Sekunde ein angeregtes CO₂-Molekül (in der 15µm-Absorption) durch Zusammenstoß mit Luftmolekülen strahlungslos deaktiviert wird. Dazu multiplizieren wir K_{Luft} mit der Lohschmittzahl, die angibt, wie viele Luftmoleküle in 1cm³ unter Normalbedingungen enthalten sind.

$$K_{Luft} * N_{Lohschmitt} \approx 5 * 10^{-15} \frac{cm^3}{Moleküle * sec} * 2,5 * 10^{19} \frac{Moleküle}{cm^3} \approx 13,75 * 10^4 \frac{1}{sec}$$

$$K_{Luft} * N_{Lohschmitt} \approx 10^5 \frac{1}{sec} \approx \text{Anzahl der strahlungslosen Deaktivierungen pro Molekül und sec}$$

Wenn wir großzügig sind und mit einer mittleren Lebensdauer des Angeregten Zustandes von 0,5sec (statt 0,65sec) rechnen, heißt das, daß von 50.000 absorbierten 15µm-Photonen nur ein 15µm-Photon wieder emittiert werden kann bevor die angeregten Zustände des CO₂ durch Zusammenstöße mit anderen Luftmolekülen deaktiviert werden.

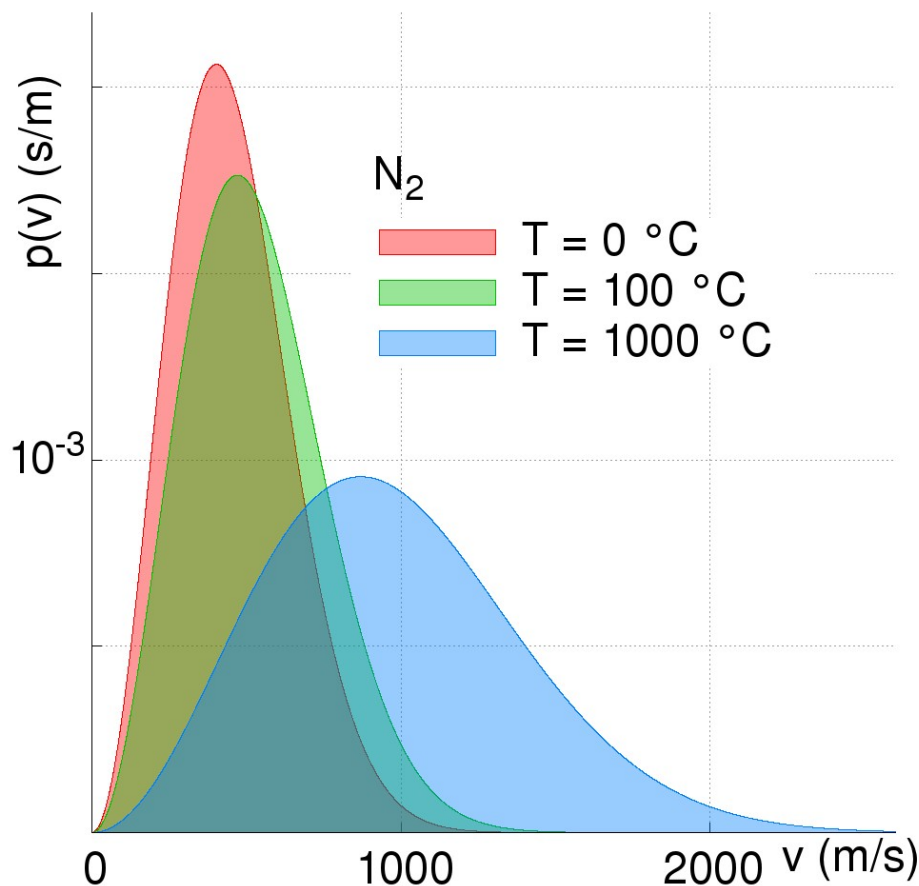
35

Für andere Treibhausgase wie Wasserdampf, Methan, SF₆,... ist die Situation ähnlich. Da auch diese Gasmoleküle pro Sekunde ca. 10¹⁰mal von Luftmolekülen gestoßen werden, ist davon auszugehen, dass auch bei diesen Gasen die Thermalisierung in Bodennähe der bestimmende Vorgang ist.

Anmerkung zur thermisch angeregten Emission

Die thermisch angeregte Emission ist nicht auf die warmen, unteren Schichten der Atmosphäre beschränkt. Auch an der äußeren Grenze der Troposphäre bei einer Temperatur von ca. -50°C (220K) haben Luftmoleküle genug Bewegungsenergie, um bei Stoßereignissen mit CO₂-Molekülen, die 15µm-Biegeschwingung anzuregen.

Wie zuvor beschrieben, bewegen sich Gasmoleküle kreuz und quer durch den ihnen zur Verfügung stehenden Raum. Bei hohen Temperaturen bewegen sie sich im Mittelwert schneller und bei tiefen Temperaturen langsamer. Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit Gasmoleküle, bei gegebener Temperatur, eine bestimmte Geschwindigkeit haben. In Abbildung 43 ist die Maxwell-Boltzmann-Verteilung für Stickstoff bei 0°C, 100°C und 1000°C dargestellt. Man erkennt, dass sich bei hohen Temperaturen das Maximum der Verteilungsfunktion hin zu hohen Geschwindigkeiten verschiebt. Aber auch bei tiefen Temperaturen findet man, im sogenannten „Schwanz“ der Maxwell-Boltzmann-Verteilung, immer noch einen kleinen Anteil schneller Moleküle. Dieser kleine Anteil schneller Gasmoleküle macht es möglich, dass auch bei tiefen Temperaturen Vorgänge ablaufen können, die recht hohe Anregungsenergie erfordern.



36

Abbildung 43: Maxwell-Boltzmann-Verteilung für Stickstoff bei 0°C, 100°C und 1000°C, Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26829272>

Der Anteil der Gasmoleküle, deren Bewegungsenergie größer ist als die Anregungsenergie E_i , berechnet sich wie folgt.

$$\frac{N_i}{N} = e^{-\frac{E_i}{kT}} = e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

Für die Anregung der 15µm-Schwingung des CO₂ ergibt sich damit bei 220K:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{15 \cdot 10^{-6} m} = 2 \cdot 10^{13} \frac{1}{s}$$

$$\frac{N_i}{N} = e^{-\frac{h\nu}{kT}} = e^{-\frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2 \cdot 10^{13} \frac{1}{s}}{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot 220 K}} = 0,0127 \approx 1,3\%$$

D.h. ca. ein Prozent der Luftmoleküle hat genug Bewegungsenergie, um auch bei ca. -50°C die 15µm-Schwingung des CO₂ an der äußeren Grenze der Troposphäre anzuregen.

Entsprechend ergibt sich bei Lufttemperaturen von 15°C bis 30°C ein Anteil von 3% bis 4% der Luftmoleküle, deren Bewegungsenergie hoch genug ist um bei Stoßereignissen mit CO₂-Molekülen die 15µm-Schwingung des CO₂ anzuregen.

Sättigung und Reichweite der 15µm-Strahlung

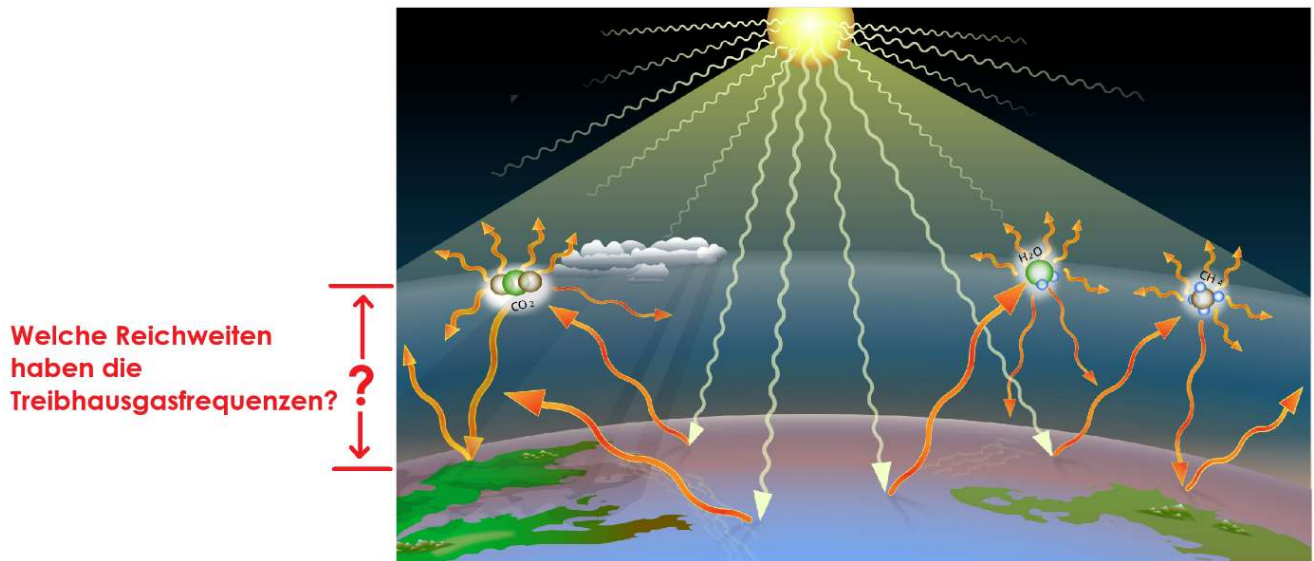


Abbildung 44: Welche Reichweite hat Strahlung auf den Treibhausgasfrequenzen?

Nachdem nun geklärt ist wie das CO_2 -Molekül IR-Strahlung absorbiert und emittiert und welchen Einfluß die nicht IR-aktiven Gase der Atmosphäre auf diese Vorgänge haben, stellt sich die Frage wie groß die Reichweite der 15µm-IR-Strahlung in der Atmosphäre ist.

Jeder, der versucht hat eine schwarze Wand weiß anzustreichen, hat folgende Beobachtung gemacht: Nach dem ersten Anstrich ist die Wand dunkelgrau. Nach dem zweiten Anstrich grau. Bei den folgenden Anstrichen wird die Wand immer heller und irgendwann ist ein Punkt erreicht an dem ein weiterer Anstrich die Wand nicht mehr weißer werden lässt. Die ersten Anstriche machen die Wand deutlich weißer. Bei den letzten Anstrichen muss man schon genau hinsehen um einen Unterschied zum vorherigen Anstrich zu erkennen.

Einen ähnlichen Effekt beobachtet man auch, wenn man die Konzentration eines Treibhausgases in der Atmosphäre erhöht. Diesen Effekt will ich beispielhaft am CO_2 erklären (Abbildung 45). Wenn die Atmosphäre kein CO_2 enthält, können die IR-Frequenzen, die CO_2 absorbiert ungehindert in den Weltraum entweichen (Bild 1). Wenn man nun eine kleine Menge CO_2 in die Atmosphäre gibt, wird jedes CO_2 -Molekül von der IR-Strahlung getroffen und kann Strahlung absorbieren (Bild 2). Wenn man die CO_2 -Konzentration weiter erhöht, kommt es vor, dass manche CO_2 -Moleküle sich im „Schatten“ anderer CO_2 -Moleküle bewegen. Bei dieser CO_2 -Konzentration erhöht nicht mehr jedes zusätzliche CO_2 -Molekül die Absorptionswirkung (Bild 3). Wenn man die CO_2 -Konzentration weiter erhöht, kommt man zu einer CO_2 -Konzentration, bei der eine praktisch vollständige Absorption erreicht ist. Eine weitere Erhöhung der CO_2 -Konzentration bewirkt dann praktisch keine weitere Erhöhung der Absorption (Bild 4). Die Atmosphäre ist dann praktisch undurchlässig für die vom CO_2 absorbierte IR-Strahlung. Diesen Zustand nennt man Sättigung. Wenn die Sättigungskonzentration des CO_2 erreicht ist, führt eine weitere Erhöhung der CO_2 -Konzentration zu keiner messbaren Erhöhung der IR-Absorption.

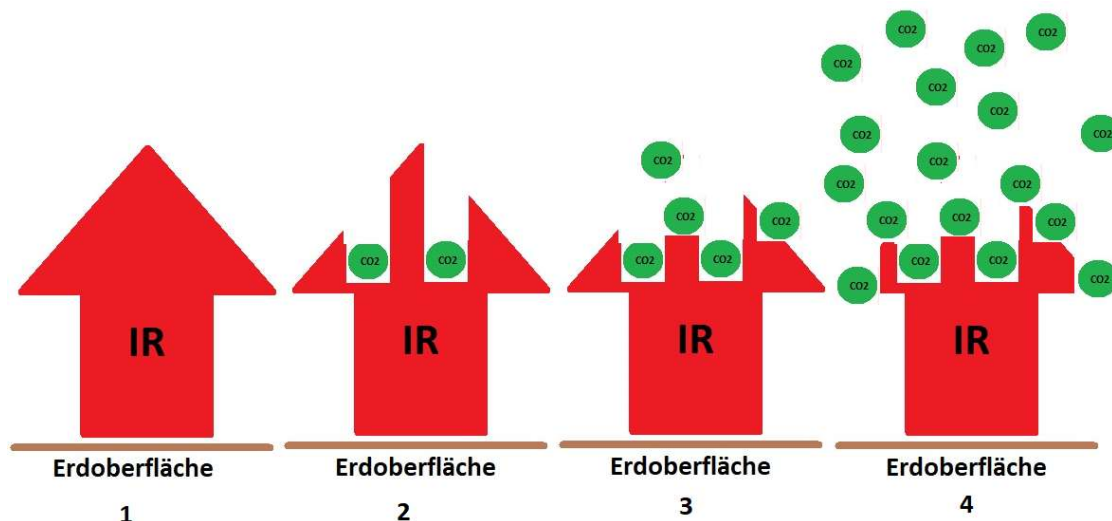


Abbildung 45: Sättigung

Diese Abhängigkeit der Durchlässigkeit eines Mediums von der Konzentration eines absorbierenden Bestandteils des Mediums wird durch das Lambert-Beersche Gesetz beschrieben (aus den Jahr 1852). Es lautet:

$E_\lambda = \log_{10}(I_0/I) = \varepsilon_\lambda C d$ mit E_λ : Extinktion bei der Wellenlänge λ , I_0 : eingestrahlte Lichtintensität, I : Intensität die durch das Medium hindurchgeht, ε_λ : Extinktionskoeffizient, C : Konzentration des absorbierenden Stoffes, d : Schichtdicke des Mediums, die das Licht durchdringen muss

Oder als Exponentialfunktion:

$$\tau = \frac{I}{I_0} = 10^{-\varepsilon_\lambda C d} \quad \text{mit } \tau: \text{Transmission, siehe Graph Abbildung 59}$$

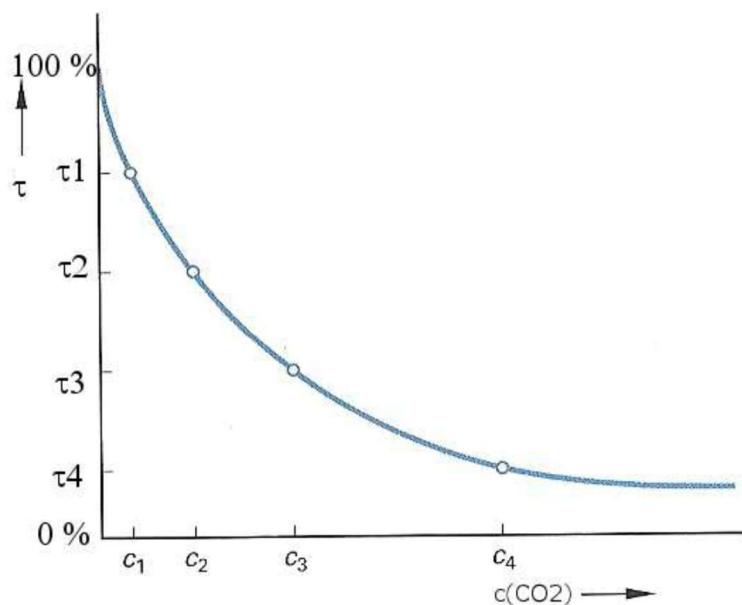


Abbildung 46: Quelle H.Hug: Abhängigkeit der Transmission („prozentuale Durchlässigkeit“) von Luft von der CO₂-Konzentration, <https://www.eike-klima-energie.eu/wp-content/uploads/2016/12/Hug-pdf-12-Sept-2012.pdf>

Wie man im Graph Abbildung 46 sieht ändert sich die Transmission (Durchlässigkeit) kaum noch, wenn bestimmte CO₂-Konzentrationen überschritten werden. D.h. die Atmosphäre wird sehr schnell undurchlässig für IR-Strahlung mit der Wellenlänge 15µm. Eine weitere Erhöhung der CO₂-Konzentration verkürzt dann nur noch die Reichweite der 15µm-Strahlung in der Atmosphäre.

Heinz Hug hat den Extinktionskoeffizient ε_λ durch Labormessungen bestimmt. In Luftproben mit 357ppm (0,0159mol/m³) CO₂ und 2,6% Wasser erhält er:

$$\varepsilon_{15\mu\text{m}} = 20,2 \text{ m}^2/\text{mol}$$

Mit diesem Extinktionskoeffizient ergibt sich für eine Strecke von 10m in Luft eine Transmission (Durchlässigkeit) von

$$\tau = \frac{I}{I_0} = 10^{-20,2 \frac{\text{m}^2}{\text{mol}} * 0,0159 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} * 10\text{m}} = 10^{-3,21} = 0,0006$$

D.h. nach einem Weg durch ca. 10m Luft ist IR-Strahlung mit einer Wellenlänge von 15µm zu 99,94% absorbiert. Es ist also davon auszugehen, dass die Atmosphäre im Bereich der 15µm Bande des CO₂ praktisch undurchlässig für IR-Strahlung ist. Eine Erhöhung der CO₂-Konzentration kann deshalb keine weitere Erhöhung der Absorption bewirken. Eine Verstärkung des (angeblichen) Treibhauseffektes ist deshalb bei einer Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nicht möglich.

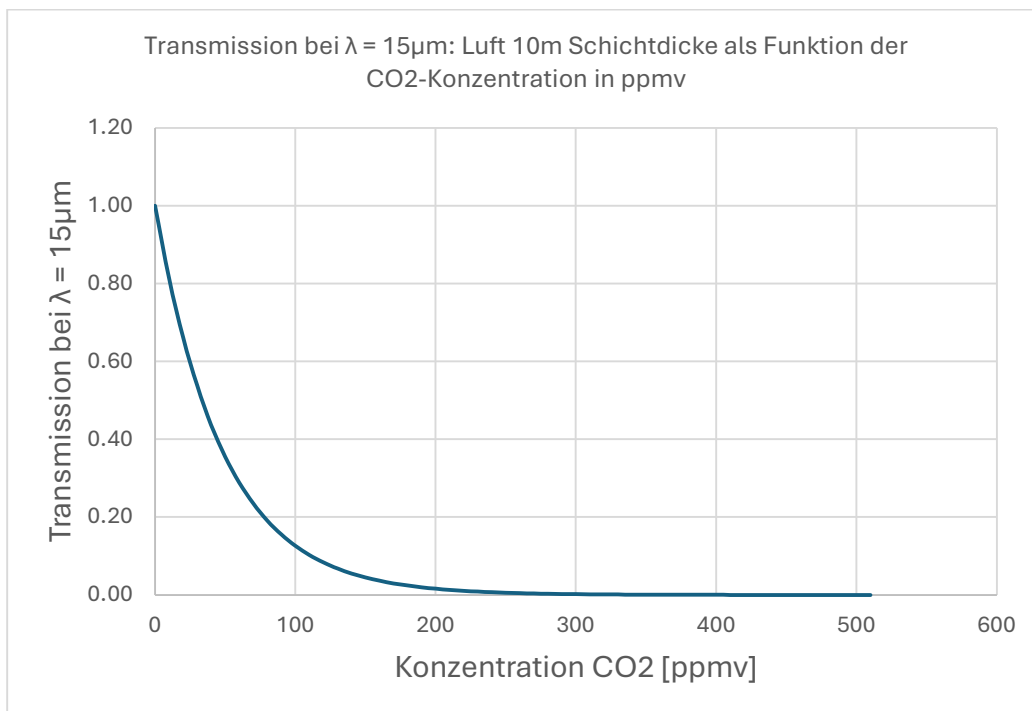


Abbildung 47: Transmission (Durchlässigkeit) einer „bodennahen“ 10m dicken Luftschicht als Funktion der CO₂-Konzentration, berechnet mit dem von Hug ermittelten $\varepsilon_{15\mu\text{m}} = 20,2 \text{ m}^2/\text{mol}$.

Wie in Abbildung 47 zu erkennen, ist auch schon bei den vielzitierten vorindustriellen 280 ppmv CO₂ die 15µm-Absorption in der Sättigung.

Wie wir später sehen werden ist daher eine Rückstrahlung von 15µm-Strahlung aus der Atmosphäre auf die Erdoberfläche auf eine wenige Meter messende Bodenschicht begrenzt (siehe Abbildung 48).

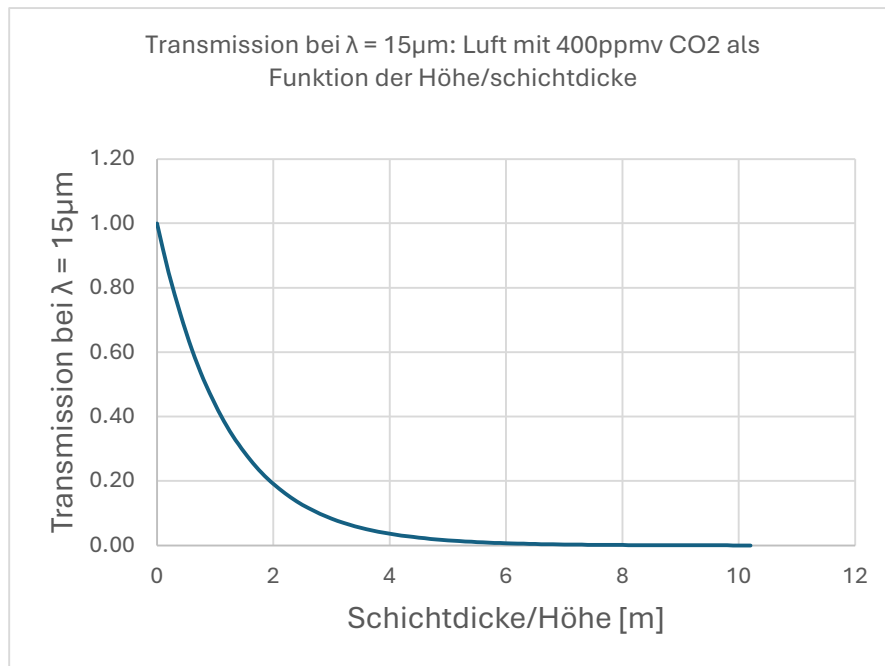


Abbildung 48: Transmission (Durchlässigkeit) einer „bodennahen“ Luftschicht als Funktion der Schichtdicke bzw. Höhe, berechnet mit dem von Hug ermittelten $\varepsilon_{15\mu\text{m}} = 20,2 \text{ m}^2/\text{mol}$.

Auch beim Wasserdampf, dem wichtigsten „Treibhausgas“, das den Effekt des CO₂ laut IPCC verstärken soll, werden ähnlich kurze Reichweiten beobachtet. Nach einer Strecke von 10 bis 50 m durch die untere Atmosphäre wird die IR-Strahlung auf den Wasserdampf-Frequenzen mehr oder weniger vollständig absorbiert und in fühlbare Wärme umgewandelt. Tabelle 1 vermittelt einen Eindruck davon wie kurz die Reichweiten der Wasserdampffrequenzen in der unteren Atmosphäre sind.

40

Tabelle 1: Reichweiten der Wasserdampffrequenzen, berechnet mit den von Peng-Sheng Wei 2019 veröffentlichten Absorptionskoeffizienten

Absorption	Absorption Koeffizient		% Absorption über die ersten	
band	[1/m]		10m	
[μm]	2% vol. Wasserdampf	0.5% vol. Wasserdampf	2% vol. Wasserdampf	0.5% vol. Wasserdampf
71	1,15	0,3	99,99899%	95,0212932%
6,3	0,3	0,08	95,02129%	55,0671036%
2,7	17	4	100,00000%	100,0000000%
1,87	41	10	100,00000%	100,0000000%
1,38	44	10	100,00000%	100,0000000%

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Treibhausgasfrequenzen in Bodennähe Reichweiten von wenigen Metern haben. Dem entsprechend muß die Rückstrahlung der Atmosphäre auf die Erdoberfläche aus einer wenige Meter messenden Schicht herrühren.

Bedingt durch die sehr hohen Thermalisierungsraten muß diese Rückstrahlung ihren Ursprung in der thermisch angeregten Emission von Treibhausgasen haben. Diese Annahme wird auch

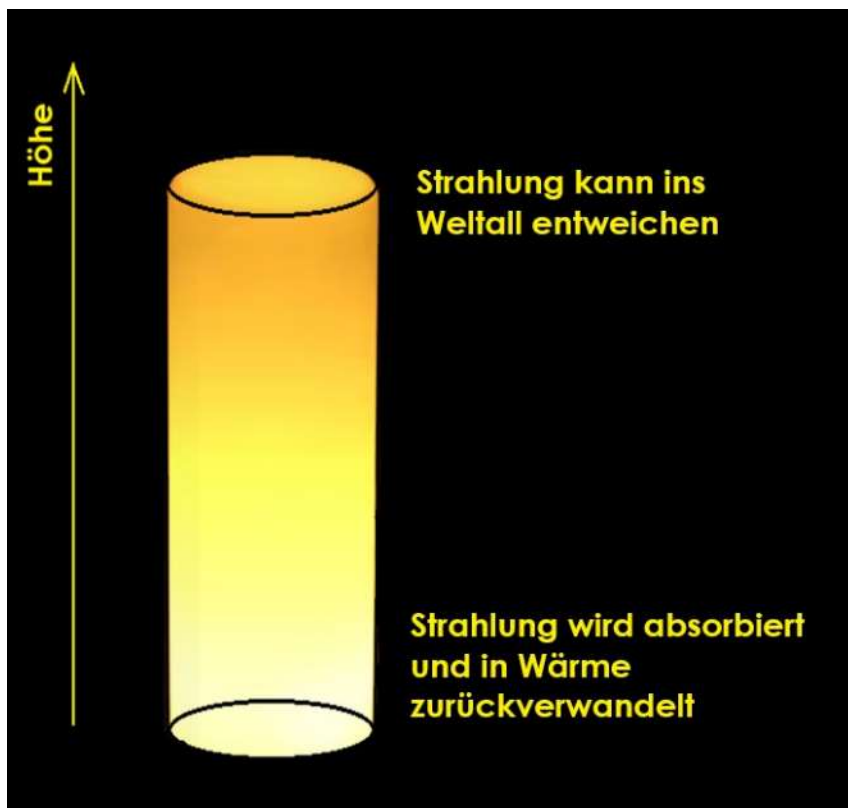
dadurch bekräftigt, daß das Emissionsspektrum der bodennahen Atmosphäre der Einhüllenden der Planckverteilung folgt.

Mit zunehmender Höhe nehmen Luftdruck und Dichte ab. Der räumliche Abstand zwischen den Treibhausgasmolekülen vergrößert sich. Dementsprechend nehmen die Reichweiten der Treibhausgasfrequenzen mit zunehmender Höhe zu.

Auch Kollisionen zwischen Luftmolekülen werden mit zunehmender Höhe seltener. Die angeregten Zustände der Treibhausgasmoleküle haben daher immer mehr Zeit um abzustrahlen.

Unter den Bedingungen der oberen Atmosphäre wird die thermisch angeregte Emission zum dominierenden Prozess. Die nach oben emittierte Strahlung kann in den Weltraum entweichen. Die nach unten emittierte Strahlung wird in den dichteren unteren Bereichen der Atmosphäre absorbiert und wieder in fühlbare Wärme umgewandelt. Dieser Effekt wird, wie schon erwähnt, durch die druckbedingte Absorptions- und Emissionsbandenverbreiterung verstärkt.

Bildlich gesprochen ergibt sich damit folgende Situation. Bedingt durch die thermisch angeregte Emission „glüht“ die gesamte Luftsäule in den „Farben“ der Treibhausgase. In großen Höhen kann die dabei abgegebene IR-Strahlung in den Weltraum entweichen. In der unteren Atmosphäre sorgen kurze Reichweiten und Thermalisierung dafür, daß die Energie des „Glühens“ wieder absorbiert, in Wärme zurückverwandelt und von Konvektionsströmen abtransportiert wird (Abbildung 49). **Der Abtransport dieser Wärmeenergie durch Konvektionsströmungen macht einen Strahlungstransport unmöglich**, weil Strahlungstransportgleichgewichte an einen Erhalt der Strahlungsenergie gebunden sind (Kirchhoffsches Strahlungsgesetz). **D.h. Thermalisierung und Konvektion machen die untere Atmosphäre für die Treibhausgasfrequenzen undurchlässig.**



41

Abbildung 49: Thermisch angeregte Emission in der gesamten Luftsäule

Damit ergibt sich folgendes Konvektionsmodell für den Transport von Wärme durch die Atmosphäre (Abbildung 50).

Direkte Abstrahlung der Erdoberfläche durch das Atmosphärische Fenster

(Wellenlängenbereich von ca. 8 bis 14 μm) sofern die Bewölkung das zuläßt.

Sättigung und Thermalisierung in Bodennähe: Außerhalb des Atmosphärischen Fensters hat die von der Erdoberfläche abgestrahlte Wärmestrahlung in tiefen Luftschichten nur recht kurze Reichweiten. Die hier von Treibhausgasen absorbierte IR-Strahlung wird praktisch vollständig in Wärme umgewandelt. Konvektionsströme sorgen für den Abfluß dieser Wärme.

Wärmetransport durch Konvektion: Von den bodennahen Luftschichten bis zur Grenze der Troposphäre erfolgt der Wärmetransport durch Konvektion.

Thermisch angeregte Emission im oberen Bereich der Troposphäre: Durch die niedrige Luftdichte in großen Höhen gewinnt die Emission von Wärmestrahlung gegenüber der strahlungslosen Deaktivierung an Bedeutung. Treibhausgase ermöglichen hier die Abkühlung der Atmosphäre.

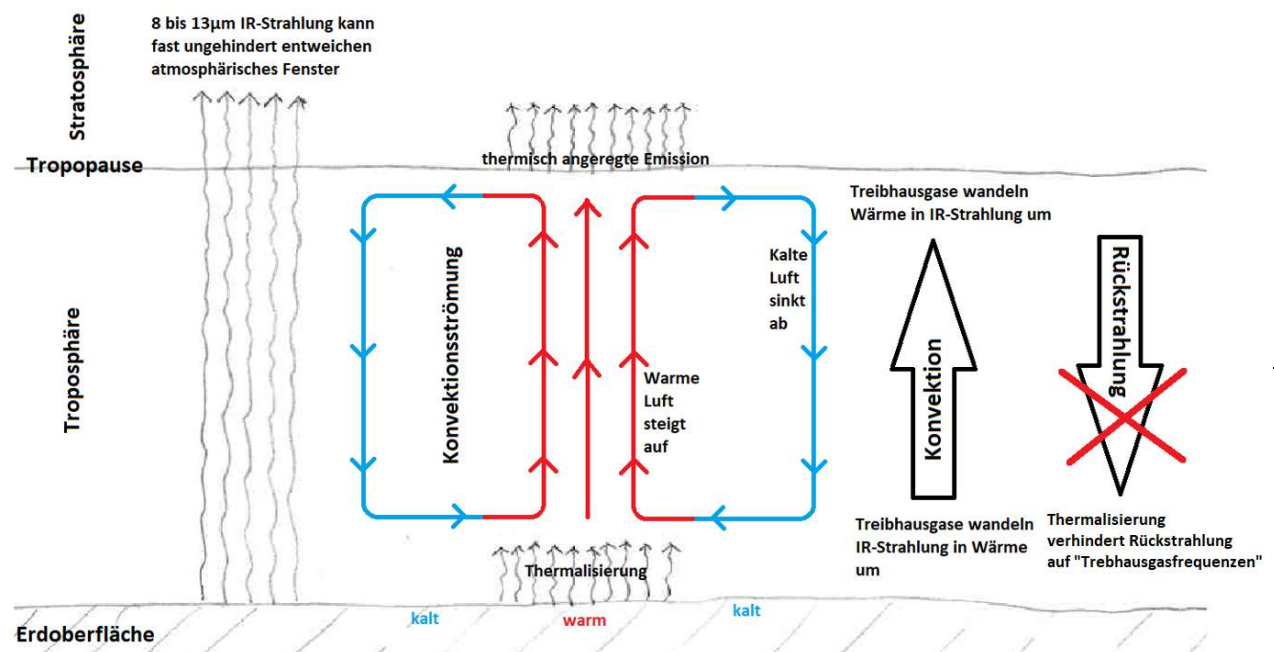


Abbildung 50: Wärmetransport in der Troposphäre durch Konvektionsströmungen und thermisch angeregte Emission an der Grenze der Troposphäre

Die Kombination aus Thermalisierung und Konvektion macht in den unteren Luftschichten den auf Rückstrahlung basierenden Treibhauseffekt unmöglich. Thermalisierung und Konvektion wirken zusammen wie ein Rückschlagventil für Wärmestrahlung aus größeren Höhen.

Dieses einfache Konvektionsmodell wird auch durch Satellitenmessungen der ins Weltall abgestrahlten langwelligen Strahlung (OLR: outgoing longwave radiation) bestätigt. In Abbildung 51 ist die Flussdichte der von Erde abgestrahlten IR-Strahlung (OLR) als Funktion der bodennahen Temperatur dargestellt.

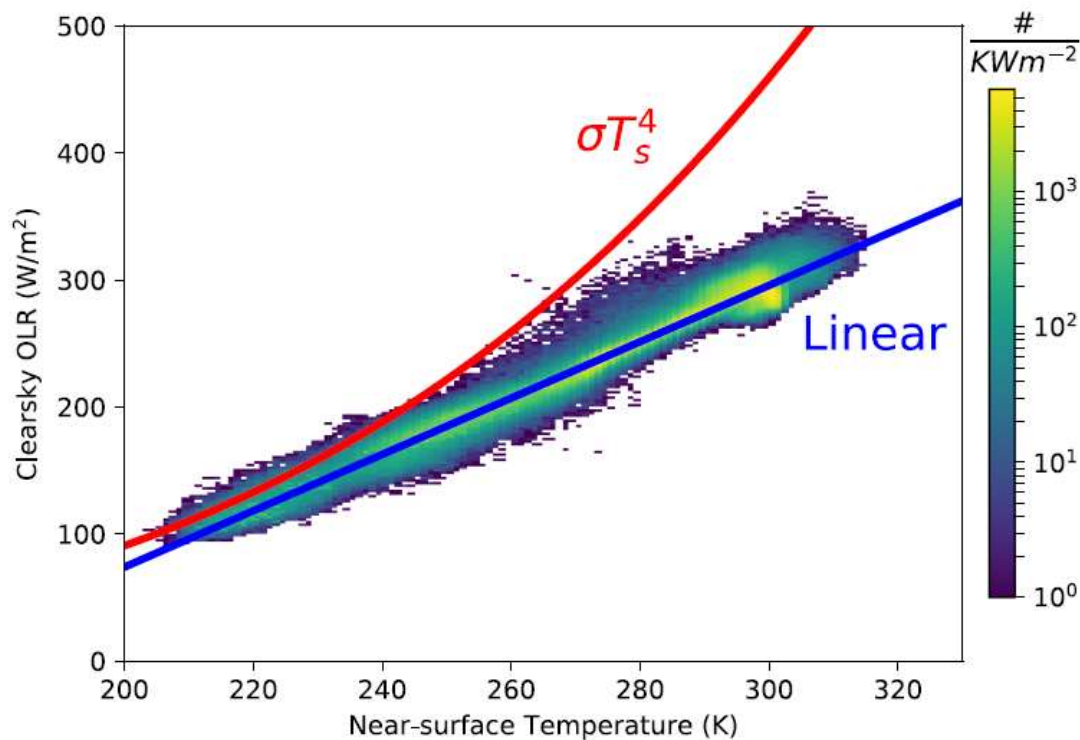


Fig. 1. Earth's OLR strongly deviates from the thermal emission of a black-body, σT_s^4 . Instead, the dependence of OLR on surface temperature can be approximated as a linear function. Shown are monthly mean clear-sky OLR from a satellite data product and near-surface temperatures from reanalysis (*Materials and Methods*). Colors show the density of data points, and the blue curve is a simple linear regression ($r^2 = 0.97$).

43

Abbildung 51, Quelle: Earth's outgoing longwave radiation linear due to H2O greenhouse effect Daniel D. B. Kolla,1 and Timothy W. Cronina (2018) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30254153/>

Wie es für einen konvektiven Wärmetransportes durch die Troposphäre zu erwarten ist findet man, in guter Übereinstimmung mit Newtons Abkühlungsgesetz, einen linearen Zusammenhang zwischen IR-Strahlungsflußdichte und bodennahe Temperatur (blaue Gerade, Abbildung 51).

Die gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz für den Fall eines Wärmetransportes durch Strahlung zu erwartende σT^4 -Abhängigkeit der abgestrahlten Leistung (rote Linie, Abbildung 51) kann nicht beobachtet werden.

Dieser Widerspruch zwischen Messdaten und Treibhauseffekttheorie ist schon seit Jahrzehnten bekannt. Die moderne Klimawissenschaft versucht immer wieder komplizierte treibhauseffekt-konforme Erklärungen für diese Beobachtung zu finden (Daniel D. B. Kolla,1 and Timothy W. Cronin; 2018 Earth's outgoing longwave radiation linear due to H2O greenhouse effect; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30254153/>).

Das bedeutet, dass der konvektive Wärmetransport durch die Troposphäre der langsamste bzw. geschwindigkeitsbestimmende Vorgang im gesamten Energiefluss von der Erdoberfläche ins Weltall ist. Die Konvektion ist sozusagen der Flaschenhals des Wärmetransportes in Richtung Weltall.

Oder anders gesagt: Die IR-Abstrahlung der Erdoberfläche und die IR-Abstrahlung der oberen Atmosphäre ins Weltall (OLR) sind durch eine für IR-Strahlung (auf den Treibhausgasfrequenzen) undurchlässige Konvektionsschicht getrennt und entkoppelt.

Eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen kann diese Entkopplung nur verstärken. Die Klimasensitivität von CO₂, Methan, ... muß deshalb Null sein.

Messbare atmosphärische Gegen- oder Rückstrahlung

Die meßbare atmosphärische Gegen- oder Rückstrahlung wird immer wieder als Beweis für die Existenz des atmosphärischen Treibhauseffektes angeführt. Auf dieses Phänomen werde ich deshalb etwas ausführlicher eingehen.

Zur Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung verwendet man Pyrgeometer. In Abbildung 52 ist ein solches Gerät der Firma Kipp & Zonen dargestellt.



Pyrgeometers

Pyrgeometers are designed for IR (infrared) radiation measurement, for both atmospheric and material testing research applications.

44

Abbildung 52, Pyrgeometer zur Meßung der Rückstrahlung, Quelle: <https://www.kippzonen.com/>

Weltweit wird die atmosphärische Gegenstrahlung vom **World Radiation Monitoring Center** (WRMC: <https://bsrn.awi.de/>) mittels eines Netzes von Messstationen erfasst. Als Beispiel sind in Abbildung 53 die Messwerte einer Messstation nahe München graphisch dargestellt.

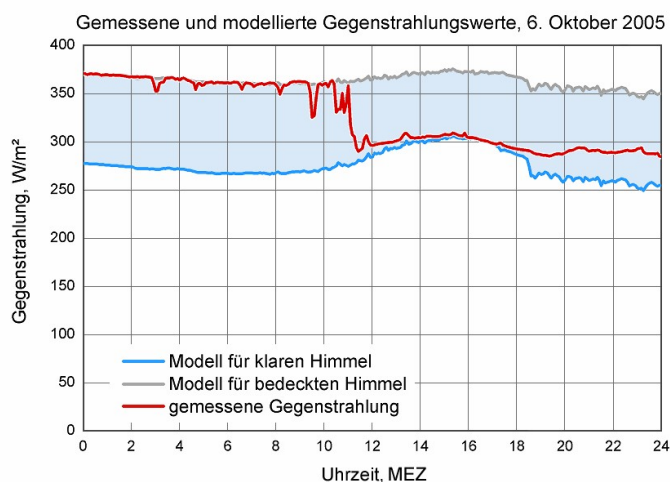


Abbildung 53: Quelle: Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A4rische_Gegenstrahlung

Zu beurteilen in wie weit diese Meßgeräte wirklich in der Lage sind die atmosphärische Gegenstrahlung zuverlässig zu messen, sprengt den Rahmen dieses Textes. Uli Weber hat sich etwas näher mit dieser Frage beschäftigt. Unter folgenden Link findet der Leser seine Beurteilung: <https://eike-klima-energie.eu/2021/02/25/anmerkungen-zum-gegenstrahlungs-paradoxon-aus-einem-hemisphaerischen-blickwinkel/>

In der folgenden Diskussion nehme ich an, daß es eine atmosphärische Gegenstrahlung gibt und daß sie durch thermisch angeregte Emission der Treibhausgase bzw. Wärmestrahlung von Wolken zustande kommt. Als Rechengrößen verwende ich die vom IPCC veröffentlichten Strahlungsflüsse ohne mich darauf festlegen zu wollen, daß diese Werte der Realität entsprechen.

Wie im Emissionsspektrum der bodennahen Atmosphäre zu erkennen ist (Abbildung 54), wird die Rückstrahlung von der Strahlung des Wasserdampfes und des CO₂ dominiert.

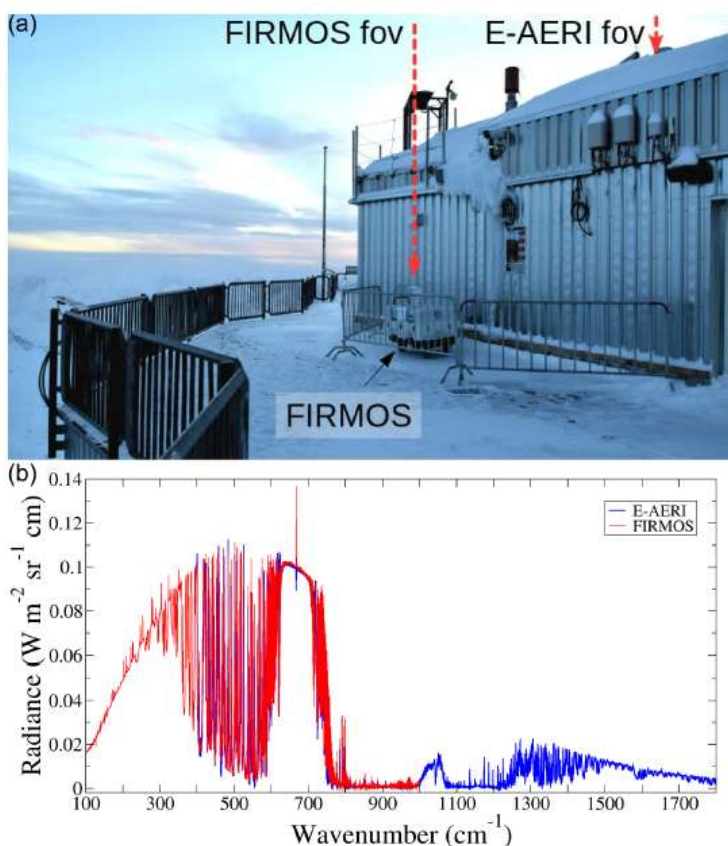


Figure 2. FIRMOS and E-AERI installed at the Summit station (a). The comparison between the average spectra of 310 simultaneous observations acquired by the two instruments in clear sky during 2019 campaign is shown in (b).

Abbildung 54: Emissionsspektrum von Luft Quelle: Luca Palchetti et al. (2021) „Observations of the downwelling far-infrared atmospheric emission at the Zugspitze observatory” <https://essd.copernicus.org/articles/13/4303/2021/>

Die atmosphärische Gegenstrahlung wird in den Darstellungen der globalen Energiebilanz (Abbildung 55) als ein sehr dominantes Element der globalen Energieflüsse dargestellt. Mit ca. 320W/m² ist die Gegen- oder Rückstrahlung (Back Radiation) fast doppelt so groß wie die von der Oberfläche absorbierte Sonnenstrahlung, die es nur auf ca. 170W/m² bringt.

Das ist erstaunlich und passt irgendwie nicht so ganz zu unserer Wahrnehmung der Sonne als wichtigste Wärmespenderin im Wettergeschehen.

Wenn man Oberflächenstrahlung (ca. -390W/m^2 , entspricht der Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers von 15°C) und Gegenstrahlung (ca. $+320\text{W/m}^2$) als Gesamtheit betrachtet wird verständlich wie die hohen Messwerte für die Gegenstrahlung zustandekommen (siehe Abbildung 56).

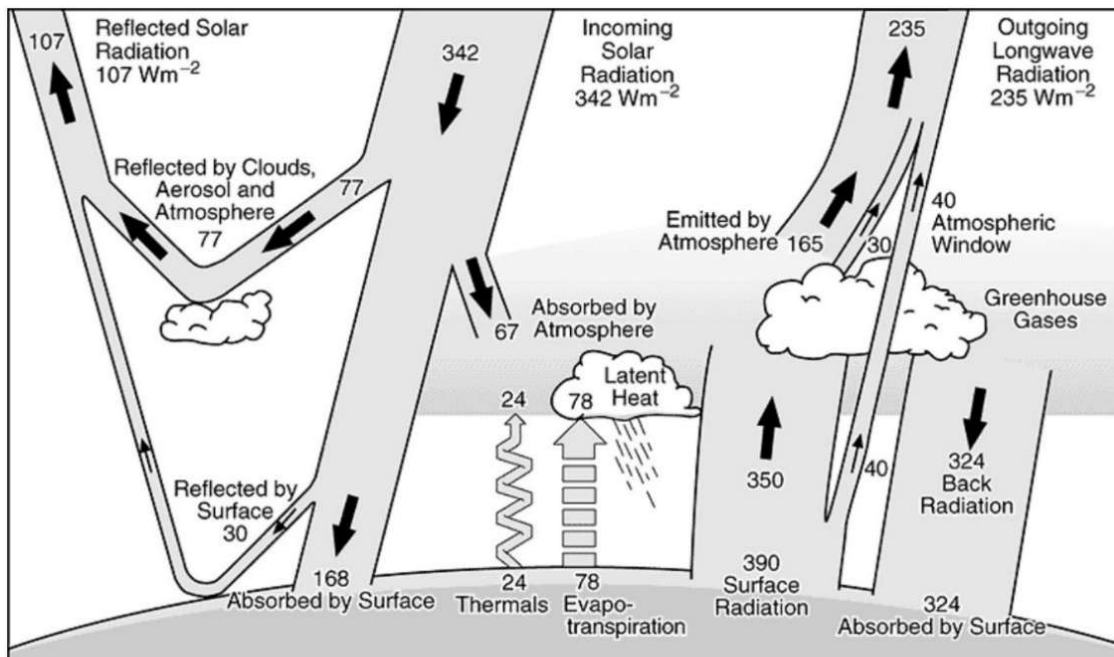


Figure 1.2: The Earth's annual and global mean energy balance. Of the incoming solar radiation, 49% (168 Wm^{-2}) is absorbed by the surface. That heat is returned to the atmosphere as sensible heat, as evapotranspiration (latent heat) and as thermal infrared radiation. Most of this radiation is absorbed by the atmosphere, which in turn emits radiation both up and down. The radiation lost to space comes from cloud tops and atmospheric regions much colder than the surface. This causes a greenhouse effect. Source: Kiehl and Trenberth, 1997: Earth's Annual Global Mean Energy Budget, Bull. Am. Met. Soc. 78, 197-208.

46

Abbildung 55: Jährliche, globale, gemittelte Energiebilanz der Erde gemäß Kiehl und Trenberth 1979

Oberflächenstrahlung + Gegenstrahlung = Nettostrahlung der Erdoberfläche

$$-390 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 320 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = -70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Die 320W/m^2 der Gegenstrahlung werden zwischen der Erdoberfläche und der bodennahen Luft hin- und hergestrahlt ohne dass es zu einem wirklichen Nettoenergiefluss kommt. Netto strahlt die Oberfläche ca. 70W/m^2 nach oben ab.

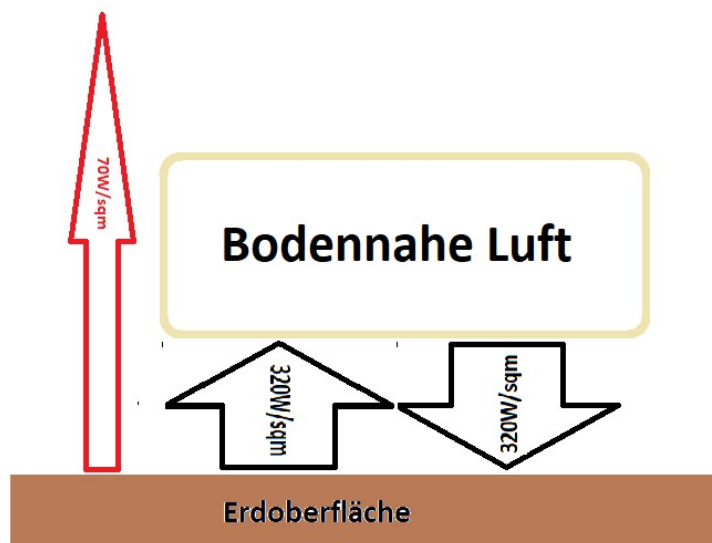


Abbildung 56, Die Gegenstrahlung ist eine Art Nullsummenspiel

Bei der atmosphärischen Gegenstrahlung handelt es sich demnach nicht um einen mächtigen Strahlungsfluß, der die ganze Troposphäre durchzieht und einen wesentlichen Beitrag zur Energiebilanz der Erde leistet, sondern um eine Art „Nullsummenspiel“ in bodennähe.

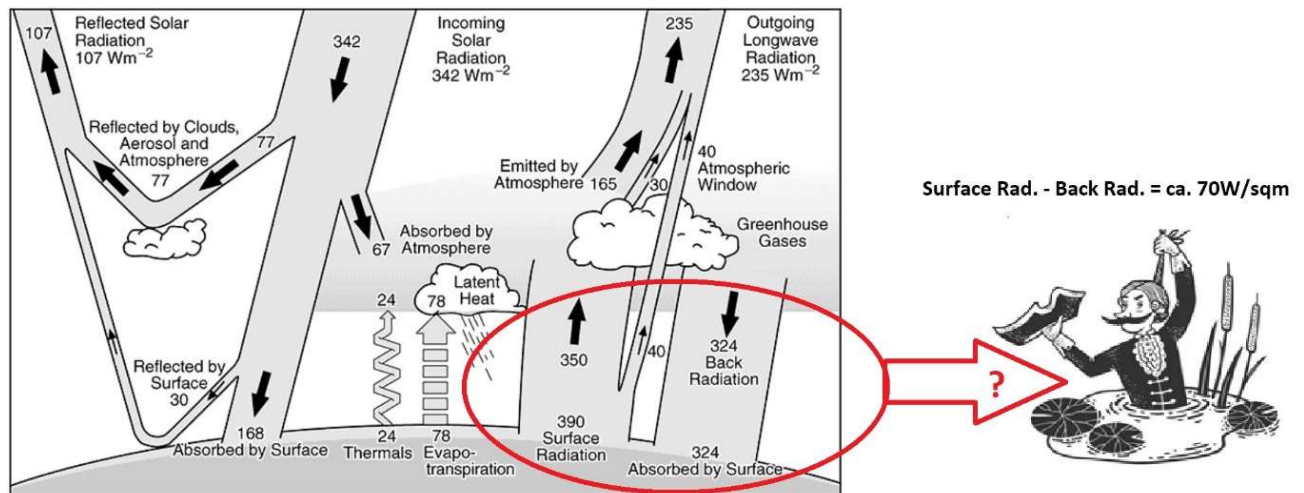


Abbildung 57: Mißverständliche Darstellung der Rückstrahlung, Quelle „Münchhausen“:

<https://depositphotos.com/de/vector/baron-munchausen-pulls-himself-by-the-hair-out-of-the-swamp-sketch-engraving-vector-illustration-372828632.html>

Das erinnert an die Geschichte des Barons Münchhausen, der vorgab sich an den eigenen Haaren aus einem Sumpf gezogen zu haben (Abbildung 57). Sicher hat der Baron eine mess- und fühlbare Kraft auf seinen Kopf ausgeübt, aber man darf daran zweifeln, dass es ihm gelang sich auf diese Weise aus einem Sumpf zu befreien.

Die Frage wie groß der Anteil der Atmosphäre ist, aus dem die Gegenstrahlung hervorgeht, wurde schon teilweise in den vorherigen Kapiteln beantwortet.

In Bodennähe beträgt die Reichweite der $15\mu\text{m}$ -CO₂-Strahlung ca. 10m. Für die Wasserdampf-frequenzen ergeben sich nach Peng-Sheng Wei 2019 ähnlich kurze Reichweiten (Absorption coefficient of water vapor across atmospheric troposphere layer, 2019)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844018327415> (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Reichweiten der Wasserdampffrequenzen, berechnet mit den von Peng-Sheng Wei 2019 veröffentlichten Absorptionskoeffizienten

Absorption	Absorption Koeffizient		% Absorption über die ersten	
band	[1/m]		10m	
[μm]	2% vol. Wasserdampf	0.5% vol. Wasserdampf	2% vol. Wasserdampf	0.5% vol. Wasserdampf
71	1,15	0,3	99,99899%	95,0212932%
6,3	0,3	0,08	95,02129%	55,0671036%
2,7	17	4	100,00000%	100,0000000%
1,87	41	10	100,00000%	100,0000000%
1,38	44	10	100,00000%	100,0000000%

Man kann also davon ausgehen, dass die Gegenstrahlung ihren Ursprung in den unteren 10m bis 50m der Atmosphäre hat. Ihre Energie bezieht sie aus dem Wärmeinhalt der bodennahen Luftschicht und vor allem aus der Wärmestrahlung des Bodens, die von dieser Luftschicht absorbiert wird. Entsprechend gering ist die Wärmekapazität aus der die atmosphärische Gegenstrahlung ihre Energie schöpfen kann.

In windschwachen Nächten mit geringer Durchmischung der unteren Luftschichten, kommt es deshalb zu ausgeprägten Boden- bzw. Strahlungsinversionen. Die Gegenstrahlung bringt dann nicht genug Energie auf um die Abstrahlung der Erdoberfläche durch das „Atmospheric Window“, die in obiger Graphik mit nur 40W/m² veranschlagt ist, auszugleichen. Oder andersherum gesagt, weil die Gegenstrahlung zu einem großen Teil aus der Energie der Wärmestrahlung des Bodens gespeist wird, kann sie eine Abkühlung des Bodens nicht verhindern (Münchhausen-Trick).

Auch die oft sehr scharfe Grenze zwischen der kalten Bodeninversionschicht und der darüberliegenden wärmeren Luftschicht ist nur möglich, weil die Reichweite der Treibhausgasfrequenzen sehr kurz ist und keine nennenswerte Rückstrahlung aus der Warmluftschicht in die kalte Bodenschicht existiert.

Die Gegenstrahlung kann die Erdoberfläche nur dann erwärmen, wenn aus wärmeren Bereichen stetig warme Bodenluft herangeführt wird, die eine höhere Temperatur als die Erdoberfläche hat.

Auch für die Wettervorhersage geht man davon aus, dass die Gegenstrahlung ihren Ursprung in Bodennähe hat. Um zu beurteilen wie stark die Gegenstrahlung die nächtliche Abkühlung der Erdoberfläche vermindert, benutzt man in der Meteorologie empirische Formeln. Man verwendet ein um den Korrekturfaktor ϵ_{Luft} erweitertes Stefan-Boltzmann-Gesetz.

$$P = \sigma * \epsilon_{\text{Luft}} * T^4$$

ϵ_{Luft} beschreibt das Emissionsvermögen der bodennahen Luft. Zur Abschätzung des Korrekturfaktors ϵ_{Luft} dienen empirische Formeln, die ϵ_{Luft} als Funktion der bodennahen Temperatur und Luftfeuchte berechnen. In Abbildung 58 ist eine Auswahl solcher Formeln dargestellt.

Table 1. Equations used to estimate atmospheric emissivity (ϵ), where σ is the Stefan-Boltzmann constant ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), e_a is the actual water vapor pressure (hPa), and T_{ar} is the air temperature (K) next to the surface.

Model	Equation
Brunt (1932)	$\epsilon = 0,52 + 0,065 \sqrt{e_a}$
Swinbank (1963)	$\epsilon = 9,2 \cdot 10^{-6} T_{ar}^2$
Idso and Jackson (1969)	$\epsilon = 1 - 0,26 \exp[-7,77 \cdot 10^{-4} (273 - T_{ar})]$
Brutsaert (1975)	$\epsilon = 1,24 (e_a/T_{ar})^{1/7}$
Idso (1981)	$\epsilon = 0,7 + 5,95 \cdot 10^{-5} e_a \exp(1500/T_{ar})$
Bignami (1995)	$\epsilon = 0,684 + 0,0056 e_a$

Actual water vapor pressure (e_a) is described as Equation 2.

$$e_a = \frac{e_s \cdot RH}{100} \quad (2)$$

Where e_s is the saturation water vapor pressure determined by the Tetens Equation (Tetens, 1930) (Equation 3).

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_{ar}}{273,3 + T_{ar}}} \quad (3)$$

Abbildung 58: Empirische Formeln zur Berechnung der Rückstrahlung, Quelle:

<https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/4bNM5NW8t7m7WDWPsw7p44D/?lang=en>

Wenn man das oben gesagte berücksichtigt ist die von Kiehl und Trenberth vorgeschlagene Energiebilanz (Abbildung 55) nicht wirklich falsch, aber doch etwas missverständlich. Mein „Verbesserungsvorschlag“ ist in Abbildung 59 dargestellt. Er trägt dem Umstand Rechnung, daß die Reichweiten der Treibhausfrequenzen in Bodennähe sehr kurz sind.

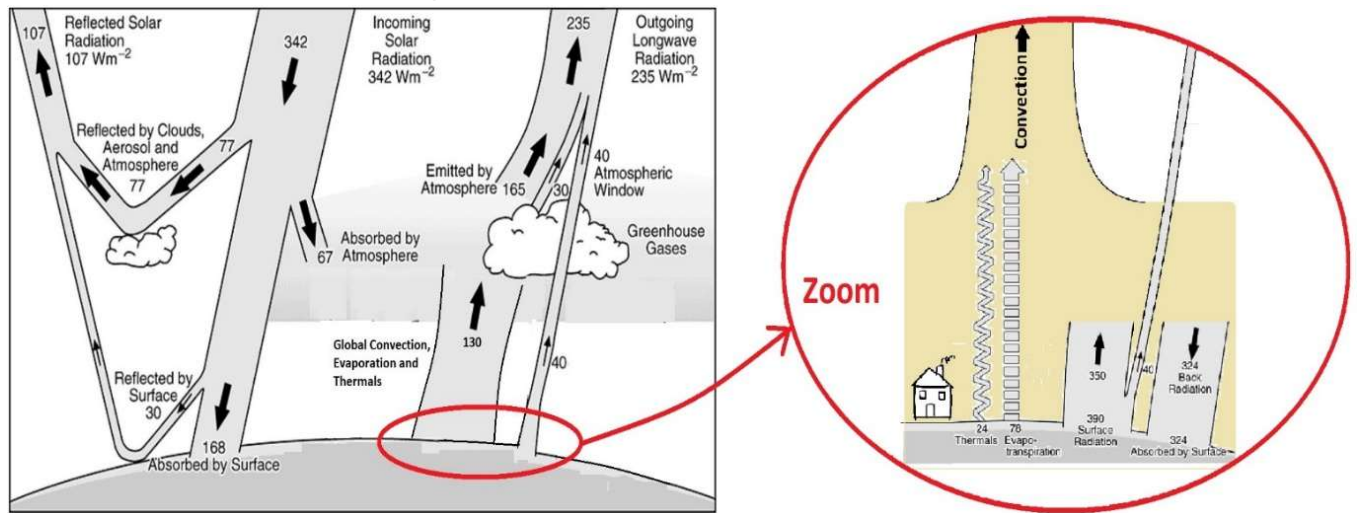


Abbildung 59; Wärmestrahlung der Erdoberfläche wird in einer dünnen unteren Luftschicht in sensible Wärme umgesetzt, die dann die lokale thermische und die globale Zirkulation speist.

Die bei Kiehl und Trenberth als mächtige, die gesamte Troposphäre durchziehende Energieflüsse dargestellten Flüsse Oberflächenstrahlung (Surface Radiation 390W/m^2) und Rückstrahlung (Back Radiation 324W/m^2) sind in meinem „Verbesserungsvorschlag“, entsprechend ihrer geringen Reichweite, nur in der Vergrößerung sichtbar.

Von den laut der globalen durchschnittlichen Energiebilanz von der Oberfläche absorbierten Sonneneinstrahlung (ca. 170W/m^2) können ca. 40W/m^2 nach Umwandlung in Wärmestrahlung direkt durch das atmosphärische Fenster ins Weltall entweichen. Der Rest, ca. 130W/m^2 , wird bodennah in Wärme umgewandelt (Thermalisierung). Diese Wärme wird durch Konvektion (lokal und global) abgeführt.

Der Treibhauseffekt, wenn man wirklich nicht von ihm ablassen will, beschränkt sich demnach auf eine dünne bodennahe Luftschicht, die eine so geringe Wärmekapazität hat, daß sie im Gesamtklimageschehen vollkommen vernachlässigt werden kann. Wenn man mit einer Höhe der Homogenen Atmosphäre von ca. 8000m rechnet, findet man in den unteren 0,6% der Atmosphäre Zustände, die an den Treibhauseffekt erinnern. Rechnet man etwas weniger wohlwollend mit Prozent Gesamthöhe der Atmosphäre bleiben noch 0,05%.

Das heißt sowohl die makroskopisch-thermodynamische Betrachtung der Troposphäre als auch die Betrachtung der molekularen Vorgänge in ihr, liefern das gleiche Bild.

- Der Wärmetransport durch die Troposphäre erfolgt durch Konvektion und nicht durch ein Strahlungstransportgleichgewicht. Diese Konvektion ist der begrenzende Faktor im Wärme fluß ins Weltall.
- Den von der modernen Klimawissenschaft postulierten, durch die Rückstrahlung der Treibhausgase verursachten 33°C -Treibhauseffekt gibt es nicht.
- Die auf den Treibhausgasfrequenzen meßbare Rückstrahlung der Atmosphäre beschränkt sich auf eine bodennahe, wenige Meter messende Schicht. Es handelt sich hierbei um eine Gegenstrahlung, die in ihrer Gesamtheit die Erdoberfläche nicht erwärmen kann (Münchhausen).

Ein realistischeres Modell zur Berechnung der mittleren Erdoberflächentemperatur (ohne Treibhauseffekt)

Nachdem wir nun eine etwas detailliertere Idee vom Wärmetransport durch die Atmosphäre haben, sehen wir uns nochmal ein etwas realistischeres Modell zur Berechnung der mittleren Oberflächentemperatur der Erde an.

Im 33°C-IPCC-Treibhausmodell wird die Einstrahlung (S_0) über die gesamte Erdoberfläche gemittelt. Es ist deshalb zu erwarten, dass ein großer Fehler bei der Berechnung der mittleren Oberflächentemperatur entsteht.

Um diese Fehlerquelle zu vermeiden, müsste man ein Modell entwickeln, das es erlaubt an jedem Punkt auf der Planetenoberfläche die eingestrahlte Leistung zu berechnen. Wenn man die an jedem Punkt der Planetenoberfläche eingestrahlte Leistung kennt, kann man über das Stefan-Boltzmann-Gesetz für jeden Punkt die Oberflächentemperatur berechnen, **ohne dass man die Strahlungsleistung über große Flächen mitteln muss**. Gesucht ist also eine Oberflächentemperaturverteilungsfunktion $T(\Theta)$, die jedem Punkt auf der Planetenoberfläche eine Temperatur zuordnet. Mit dieser Oberflächentemperaturverteilungsfunktion $T(\Theta)$ kann man dann „praktisch fehlerfrei“ die mittlere Oberflächentemperatur des Planeten berechnen.

Das hört sich recht hypothetisch an. Aber Dank des Lunar Diviner Experiments liegen so detaillierte Daten über die Oberflächentemperatur des Mondes vor, dass für den Mond die oben geforderte Oberflächentemperaturverteilungsfunktion $T(\Theta)$ ermittelt werden kann.

Mit diesen Daten wird unser Mond zum idealen Modell für einen Himmelskörper ohne Atmosphäre.

50

Bei der Analyse der Temperaturdaten der Lunar Diviner Mission stellt sich heraus, dass auf der Sonnenseite des Mondes die Oberflächentemperaturen sehr gut durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben werden, wenn man den Einfallswinkel der Sonnenstrahlung berücksichtigt (Abbildung 60).

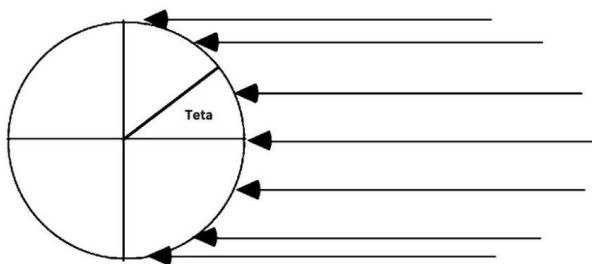


Abbildung 60: Sonnenhöchststandwinkel Θ (Teta)

Nach William et al. 2017

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103516304869>) ergibt sich folgende Oberflächentemperaturverteilungsfunktion $T(\Theta)$.

$$T(\Theta) = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha)S_0 \cos \Theta}{\sigma}} \quad \text{mit } \Theta = \text{Sonnenhöchststandwinkel, } \alpha = 0,11 \text{ (Albedo des Mondes)}$$

In der Nähe der Pole geht der Sonnenhöchststandwinkel Θ (Teta) gegen 90° . D.h. der $\cos \Theta$ geht gegen Null und es wird nur noch sehr wenig Leistung eingestrahlt. Dort ist die Oberfläche dann sehr kalt. Am Äquator bei Sonnenhöchststand gilt $\Theta = 0^\circ$. Dort ist der $\cos \Theta = 1$. Es wird die volle

Leistung S_0 senkrecht eingestrahlt und die Leistung $(1-\alpha)S_0$ absorbiert. Hier misst man die höchste Oberflächentemperatur.
Es bilden sich so um den Punkt des Sonnenhöchststandes konzentrische Kreise mit gleichem Sonneneinfallswinkel und damit gleicher Temperatur aus (Abbildung 61).

Wie wir weiter unten sehen werden, können wir die Schattenseite des Mondes außer Acht lassen, wenn wir auf der Grundlage der Monddaten ein Modell für die Erde entwickeln wollen.

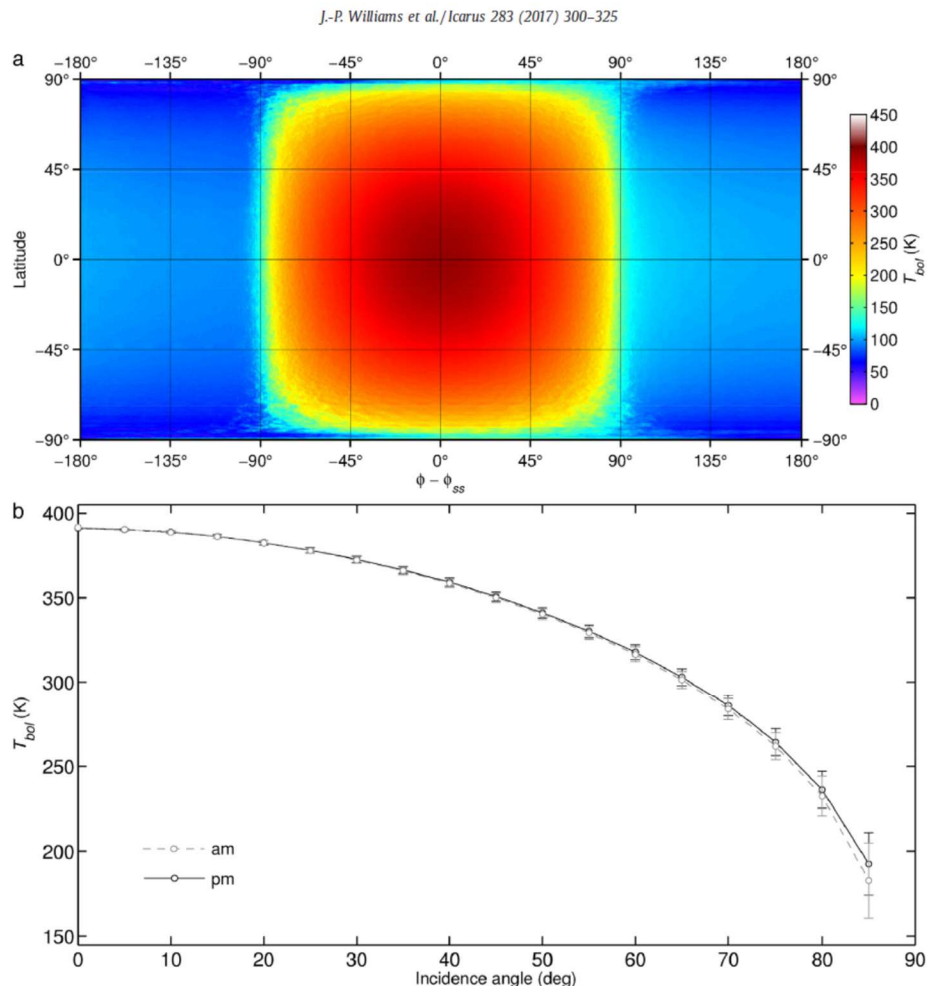


Fig. 10. (a) Average of 24 T_{bol} maps generated with 15° increments of subsolar longitude normalized to the subsolar point ($0^\circ, 0^\circ$). (b) Mean daytime T_{bol} from (a) for morning hours 6–12 (grey) and afternoon hours 12–18 (black) as a function of incidence angle binned at 5° intervals. Error bars are the standard deviation.

Abbildung 61: William et al. 2017, Oberflächentemperatur des Mondes (Lunar Diviner Mission), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103516304869>

Vergleicht man den Tagesgang der Mondoberflächentemperatur mit entsprechenden irdischen Messungen (Abbildungen 62 und 63), stellt man fest, dass sich die auf der Erdoberfläche gemessenen Temperaturgänge vor allem dadurch von den Mondwerten unterscheiden, dass die Höchsttemperatur erst nach dem Sonnenhöchststand (Mittag) erreicht werden und dass der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht auf der Erde etwa um eine Größenordnung geringer ist als auf dem Mond. Diese Unterschiede rühren vor allem daher, dass sich die Erde ca. 28mal schneller als der Mond dreht und dass die Wärmekapazität von Erdatmosphäre und Erdoberfläche die Aufheizung und Abkühlung der Erdoberfläche verlangsamen.

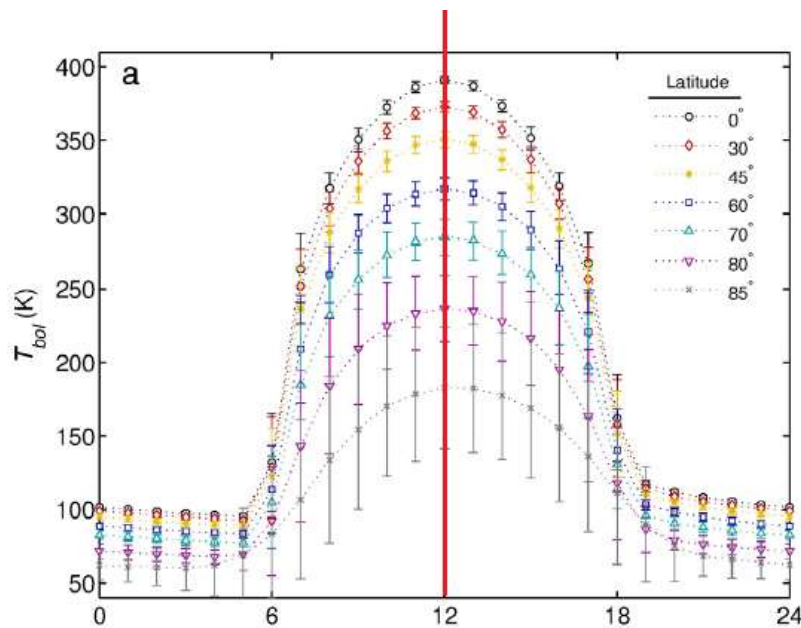


Abbildung 62: Quelle: William 2017, Rote Linie markiert den Sonnenhöchststand, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103516304869>

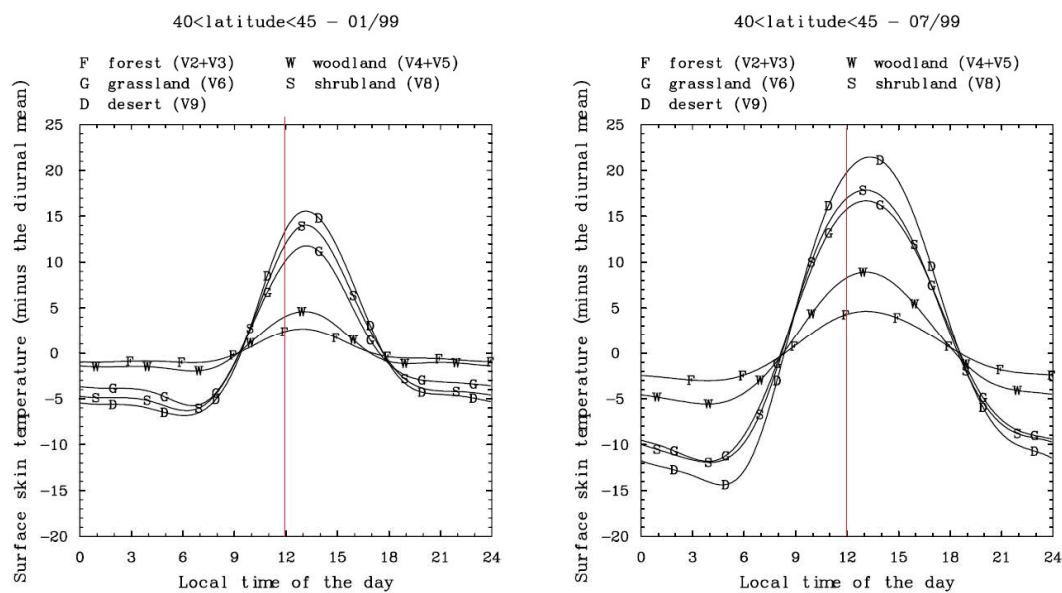


Figure 6. Anomaly of the surface skin temperature diurnal cycle for five surface types for January 1999 (left) and July 1999 (right).

Abbildung 63: Tagesgang der Oberflächentemperatur, Quelle: F. Aires et al. 2004, https://pubs.giss.nasa.gov/docs/2004/2004_Aires_ai00100w.pdf

Nun übertragen wir die Oberflächentemperaturverteilungsfunktion des Mondes auf die Erde.

Zur Anpassung des „Mondmodelles“ auf irdische Verhältnisse tauschen wir einfach die Albedo des Mondes durch die Albedo der Erde aus und vernachlässigen wegen der sehr hohen Wärmekapazität von Atmosphäre und Ozeanen die Abkühlung der Nachtseite.

$$T(\Theta) = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha)S_0 \cos \Theta}{\sigma}} \quad \text{mit } \Theta = \text{Sonnenhöchststandswinkel}, \alpha = 0,3 \text{ (Albedo der Erde)}$$

Diese Temperaturverteilungsfunktion $T(\Theta)$ teilt die Sonnenseite der Erde in konzentrische Kreise mit gleicher Oberflächentemperatur ein (Abbildung 64).

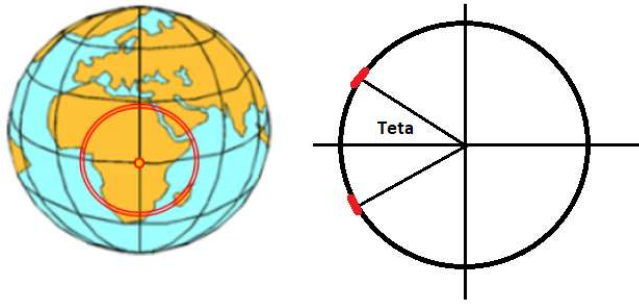


Abbildung 64: Aufteilung der Sonnenseite in konzentrische Ringe mit gleichem Sonneneinstrahlungswinkel Teta (Θ) nach Uli Weber

Der Urheber dieses Modells, Uli Weber, beschreibt eine numerische Lösung, die über diese Verteilungsfunktion die globale Durchschnittstemperatur berechnet. Der Rechenaufwand ist überschaubar. Die Rechnung kann jeder mit Excel selbst nachvollziehen. Das Ergebnis ist $14,03^\circ\text{C}$ und liegt erstaunlich dicht an der vom IPCC „gemessenen“ globalen Durchschnittstemperatur von ca. 15°C .

Eine ausführliche Beschreibung der Rechnung findet man hier: „Anmerkungen zur **hemisphärischen Mittelwertbildung** mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz“, Uli Weber (<https://www.eike-klima-energie.eu/2019/09/11/anmerkungen-zur-hemisphaerischen-mittelwertbildung-mit-dem-stefan-boltzmann-gesetz/>)

Hier führen wir, der Kürze wegen, eine Integrallösung für Uli Webers hemisphärischen Ansatz vor.

Aus dem konzentrischen Ring mit gleichem Sonneneinstrahlungswinkel wird hier ein infinitesimal schmales Flächenelement dA (siehe Abbildung 65).

53

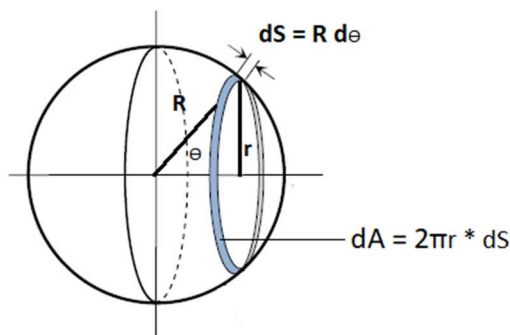


Abbildung 65: Oberflächenelement dA

$$dS = R d\Theta$$

$$r = R \sin\theta$$

$$dA = 2\pi r dS = 2\pi R^2 \sin\theta d\theta$$

$$\varepsilon = (1 - \alpha) \approx 0,7$$

$$\sigma T^4 = \varepsilon S_0 \cos\theta$$

$$T(\theta) = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon S_0}{\sigma} \cos\theta}$$

Die flächengemittelte Durchschnittstemperatur der sonnenbeschienenen Halbkugel T_m wird berechnet, indem man das Flächenintegral der Oberflächentemperaturverteilungsfunktion $T(\theta)$ über die sonnenbeschienene Halbkugel bildet und dann durch die Fläche der Halbkugel dividiert.

$$T_m = \frac{1}{2\pi R^2} \int_{\text{Halbkugel}} T(\theta) dA$$

$$T_m = \frac{1}{2\pi R^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt[4]{\frac{\varepsilon S_0}{\sigma}} \sqrt[4]{\cos \theta} 2\pi R^2 \sin \theta d\theta$$

$$T_m = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon S_0}{\sigma}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt[4]{\cos \theta} \sin \theta d\theta = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon S_0}{\sigma}} \left[-\frac{4(\cos \theta)^{\frac{5}{4}}}{5} + C \right]_0^{\frac{\pi}{2}}$$

$$T_m = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon S_0}{\sigma}} \frac{4}{5} = \sqrt[4]{\frac{0,7 * 1368 \frac{W}{m^2}}{5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} * \frac{4}{5} \approx 288,4K \approx 15^\circ C$$

Die Integrallösung liefert mit einer flächengemittelten Durchschnittstemperatur von ca. $T_m = 15^\circ C$ die vom IPCC angegebene, mittels Wetterstationsmessungen ermittelte Durchschnittstemperatur von ca. $15^\circ C$.

Da Uli Webers Modell die $15^\circ C$ -Durchschnittstemperatur ohne die Annahme einer atmosphärischen Rückstrahlung liefert, können wir schreiben.

54

Treibhauseffekt = $288k_{\text{gemessen}} - 288k_{\text{berechnet}} = 0^\circ C$

Das heißt den auf Rückstrahlung von Treibhausgasen beruhenden atmosphärischen Treibhauseffekt gibt es nicht. Die im Vergleich zum Mond recht hohe Durchschnittstemperatur der Erde beruht einzig auf der hohen Wärmekapazität von Atmosphäre, Erdoberfläche und Ozeanen und der schnellen Erdrotation.

Wieso funktioniert Uli Webers hemisphärischer Stefan-Boltzmann-Ansatz so gut?

Im Detail erklärt Uli Weber in einer Serie von Artikeln die auf der EIKE-Website veröffentlicht sind und einigen Büchern weshalb sein Modell so gut funktioniert.

Artikel:

<https://eike-klima-energie.eu/2024/04/17/back-to-earth-stand-des-hemisphaerischen-s-b-modells-als-wegweiser-durch-meine-eike-artikel/>

Bücher:

https://buchshop.bod.de/catalogsearch/result/index/?q=Uli%20Weber&bod_pers_id=9123197

Hier versuche ich seine ausführlichen Erklärungen auf das absolut Wesentliche herunterzubrechen.

Die "gemessene" bodennahe mittlere Temperatur der Erde (NST = Near Surface Temperature $\approx$ ca. 15°C), ist das Ergebnis einer Mittelwertbildung, bei der aus den Temperaturdaten eines sich über den Globus erstreckenden Messnetzes ein zeit- und flächengemittelter Durchschnitt gebildet wird. Dieser Mittelwert ist natürlich stark von der Methode der Mittelwertbildung abhängig. Das heißt es macht wenig Sinn hier um halbe Grade zu feilschen. Weitere Informationen zu der Bestimmungsmethode findet man hier: <https://eike-klima-energie.eu/2016/07/10/ueber-die-schwer-fassbare-globale-mittlere-temperatur-ein-vergleich-modell-daten/>

Verwendet man die Temperaturverteilungsfunktion um die bodennahe Erdtemperatur für einen senkrechten Sonneneinfall ($\theta = 0$) zu berechnen, ergibt sich ein Wert von fast 90°C.

$$T(\theta) = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha) S_0}{\sigma}} \sqrt[4]{\cos \theta} \quad \text{mit } \theta = 0^\circ \text{ und } \alpha = 0,7 \text{ ergibt sich}$$

$$T(\theta = 0) = \sqrt[4]{\frac{0,7 \cdot 1368 \frac{W}{m^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}}} \sqrt[4]{\cos(0)} \approx 360 K \approx 87^\circ C$$

Eine so hohe bodennahe Temperatur wird nirgends auf der Erde erreicht.

Ebenso werden die für die Nachtseite und Pole errechneten -273°C nie erreicht.

Die Temperaturverteilungsfunktion $T(\theta)$ berechnet für jeden Ort die maximal erreichbare Temperatur, unter der Annahme, dass die von der Sonne eingestrahlte Leistung sofort und vollständig in IR-Strahlung umgewandelt wird. Uli Weber nennt diesen Wert Stefan-Boltzmann-Temperaturäquivalent um ihn von der wirklich messbaren Temperatur zu unterscheiden.

Auf der Erde ist eine solche direkte und vollständige Umwandlung in IR-Strahlung nicht möglich, weil die eingestrahlte Energie überwiegend in Wärme/Molekülbewegung (Thermalisierung) umgesetzt wird. Diese Wärme treibt die globalen Zirkulationen an und lädt die sehr großen Wärmespeicher dieser Zirkulationen auf. Der Wärmehalt der globalen Zirkulationen ist um ca. 4 Größenordnungen größer als die von der Sonne an einem Tag eingestrahlte bzw. von der Erde abgestrahlte Energie <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=150991>.

Wärmehalt Ozeane $\approx$ 50 000 Tage Sonneneinstrahlung

Ähnlich wie ein sehr großer Kondensator in elektrischen Schaltungen Spannungsspitzen glättet, wirkt sich diese gewaltige Wärmekapazität dämpfend auf Temperaturschwankungen aus.

Damit ergibt sich ein erstaunlich einfaches Konvektionsmodell. Der Wärmeeintrag erfolgt über die Einstrahlung der Sonne. Die Einstrahlung erfolgt mit S_0 (Solarkonstante 1367W/m²) über eine Kreisfläche mit der Größe πR^2 (R = Erdradius). Ca. 30% diese Strahlung wird von der Erde reflektiert (Albedo $\alpha \approx 0,3$). Es bleibt ein Wärmeeintrag von ca. 957W/m² über eine Fläche von πR^2 .

Dieser Wärmeeintrag wird in sensible Wärme umgewandelt, mittels der globalen Zirkulationen über die ganze Erde verteilt und dann über die gesamte Erdoberfläche ($4\pi R^2$) wieder ins Weltall abgestrahlt.

Ähnlich wie im „33°C-Treibhauseffektmodell“ ergibt sich so eine mittlere Abstrahlung (OLR outgoing long wave radiatio) von ca. 240W/m². Unter der Annahme eines thermischen Gleichgewichtes, ergibt sich.

Einstrahlung = Abstrahlung

$$S_0(1 - \alpha)\pi R^2 = OLR * 4\pi R^2$$

$$OLR = \frac{S_0(1 - \alpha)\pi R^2}{4\pi R^2} \approx \frac{957 \frac{W}{m^2}}{4} \approx 240 \frac{W}{m^2}$$

Aber im Gegensatz zum „33°C-Treibhauseffektmodell“ wird hier nicht unter Missachtung der Regeln der Arithmetik von der mittleren abgestrahlten Leistung auf die mittlere Oberflächentemperatur zurückgeschlossen. Die "Temperaturgenese" erfolgt in Uli Webers Modell direkt einstrahlseitig und lokal bevor der Mittelwert gebildet wird.

An der jeweiligen Einstrahlstelle wird die Sonnenstrahlung praktisch vollständig in sensible Wärme umgewandelt. Durch diese Umwandlung in sensible Wärme wird die eingestrahlte Leistung P bzw. die damit verknüpfte Wärmemenge Q zu einer linearen Funktion der Temperatur.

„Lokal“, für ein sehr kleines Flächenelement A, gilt dann (mit t =Zeit, C=Wärmekapazität des Flächenelementes A, σ = Boltzmannkonstante):

$$A * P * t = A * Q$$

oder

$$A * t * \sigma T^4 = A * C * T$$

oder

$$Q \sim T$$

56

Die eingestrahlte Leistung wird nach der Umwandlung in sensible Wärme Teil der globalen Zirkulationen, die dann für eine "arithmetisch korrekte" Mittelwertbildung sorgen.

Im der folgenden Graphik, die Uli Webers Artikel „Der hemisphärische Stefan-Boltzmann-Ansatz ist kein reines Strahlungsmodell – Teil 1“ (31. Dezember 2023) entnommen wurde ist das sehr anschaulich dargestellt (Abbildung 66). <https://eike-klima-energie.eu/2023/12/31/der-hemisphaerische-stefan-boltzmann-ansatz-ist-kein-reines-strahlungsmodell-teil-1/>

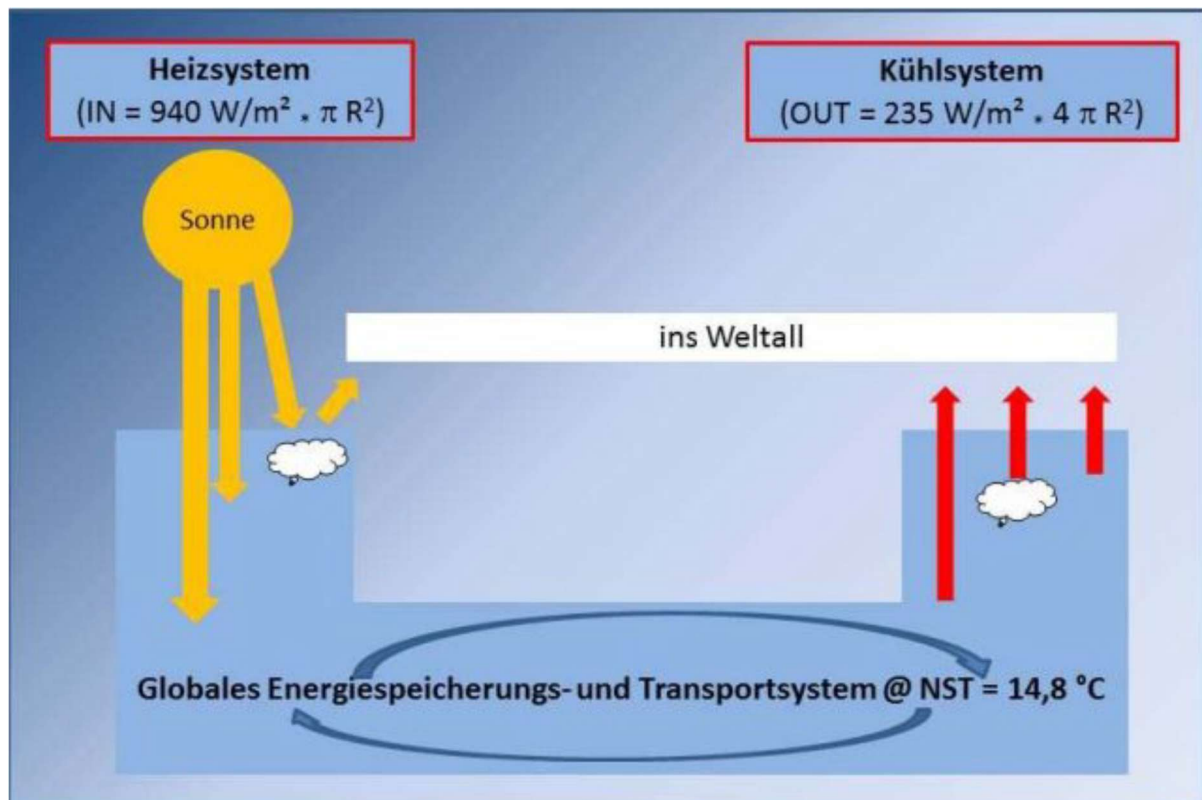


Abbildung 66 Quelle: Uli Weber Der hemisphärische Stefan-Boltzmann-Ansatz ist kein reines Strahlungsmodell – Teil 1 (31. Dezember 2023). Weber benutzt nicht exakt dieselben Zahlen wie in obiger Rechnung. Das ändert aber nichts am hier zu demonstrierenden Prinzip.

In Webers Modell ist demnach die mittlere Oberflächentemperatur der Erde T_m ausschließlich eine Funktion der Sonneneinstrahlung S_0 und des Reflexionsvermögens der Erde α .

$$T_m = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S_0}{\sigma}} \cdot \frac{4}{5}$$

T_m ist damit die maximale von einem Planeten mit sehr großer Wärmekapazität und dem Reflexionsvermögen α bei einer Sonneneinstrahlung S_0 erreichbare flächengemittelte, durchschnittliche Oberflächentemperatur.

Unter der Annahme einer einigermaßen konstanten Sonneneinstrahlung S_0 ist es dann das Reflexionsvermögen der Erde (Albedo α), das die durchschnittliche Oberflächentemperatur bestimmt.

$$T_m = T_m(\alpha) ; S_0 = \text{const.}$$

D.h. vor allem die Wolkenbedeckung (Wasser, Staub, SO_2 , ...) bestimmt die durchschnittliche Oberflächentemperatur.

Fehler in der Argumentation der Treibhauseffekttheorie

Nachdem nun in aller Ausführlichkeit gezeigt wurde, daß es den atmosphärischen Treibhauseffekt nicht gibt, will ich noch kurz auf die Argumentation der „Treibhauseffektgläubigen“ eingehen.

Strahlungstransportgleichungen

Wie schon erwähnt rechnet man in der modernen Klimawissenschaft den Treibhauseffekt dadurch herbei, daß man die Strahlungstransportgleichungen, unter der Annahme der Gültigkeit des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes in der Atmosphäre, löst. Wenn wir diesen frei erfundenen „Strahlungsenergieerhaltungssatz“ nicht als gegeben voraussetzen, hat das interessante Auswirkungen auf die Lösung der Strahlungstransportgleichungen.

Wir betrachten einen Lichtstrahl mit der Wellenlänge λ und der spezifischen Intensität I_λ , der von der Erdoberfläche Richtung Weltraum ausgesandt wird (Abbildung 67).

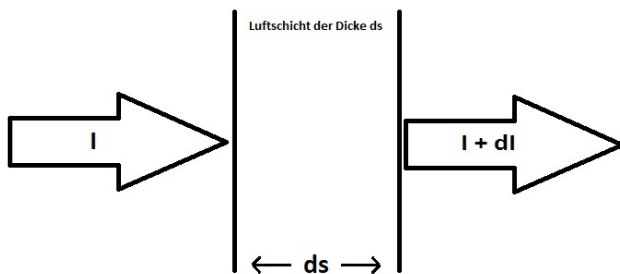


Abbildung 67: Strahlungstransport durch die Atmosphäre

58

Auf seinem Weg durch eine dünne Schicht ds der Atmosphäre wird der Strahl durch Emission der in der Luft enthaltenen Treibhausgase verstärkt. Gleichzeitig wird er durch Absorptionsvorgänge und Streuung geschwächt.

Für die Änderung der spezifischen Intensität dI_λ auf der Strecke ds ergibt sich damit.

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = \text{spezifische Emission der Wellenlänge } \lambda - \text{spezifische Absorption/Streuung der Wellenlänge } \lambda$$

oder

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = j_\lambda - \epsilon_\lambda I_\lambda$$

Statt die Gleichung vollständig zu lösen, sehen wir uns nur zwei Grenzfälle an.

Grenzfall 1: Spezifische Emission auf der Wellenlänge λ , $j_\lambda = 0$.

In den unteren Schichten der Atmosphäre ist diese Randbedingung recht gut erfüllt. Die praktisch vollständige Thermalisierung der angeregten Schwingungszustände der Treibhausgase, der Abtransport der dabei freigesetzten Wärme durch Konvektion und die kurzen Reichweiten der Treibhausgaswellenlängen bringen die Emission praktisch zum Erliegen. Die Strahlungstransportgleichung vereinfacht sich hier zu:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -\epsilon_\lambda I_\lambda$$

Eine Lösung dieser Differentialgleichung ist das Lambert-Beersche Gesetz. Wie zuvor besprochen, ergibt sich daraus die Undurchlässigkeit der unteren Atmosphäre für „IR-Treibgashaas-Frequenzen“.

Grenzfall 2: Spezifische Absorption/Streuung der Wellenlänge λ , $\epsilon_\lambda I_\lambda = 0$.

In großen Höhen nimmt die Luftdichte ab. Dadurch wird die Reichweite der „IR-Treibhaus-Frequenzen“ größer und die Thermalisierung verliert an Bedeutung, weil die Gasmoleküle hier nicht mehr so oft pro Zeiteinheit miteinander zusammenstoßen. Mit zunehmender Höhe ist die Randbedingung $\epsilon_\lambda I_\lambda = 0$ immer besser erfüllt und die Strahlungstransportgleichung vereinfacht sich zu:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = j_\lambda$$

D.h. die thermisch angeregte Emission wird in großen Höhen zum dominierenden Prozess.

Beim CO_2 haben wir zuvor berechnet, daß in Bodennähe nur einer von ca. 50.000 angeregten Zuständen der Biegeschwingung abstrahlen kann bevor er durch Zusammenstöße mit anderen Luftmolekülen deaktiviert wird. Wir sollten daher erwarten, daß diese Thermalisierung erst bei einem Druck der etwa um einen Faktor 50.000 geringer ist in den Hintergrund tritt.

$$\frac{100.000 \text{ Pa}}{50.000} = 2 \text{ Pa} \approx \text{Druck in } 80 - 90 \text{ km Höhe}$$

In recht guter Übereinstimmung mit dieser Annahme beobachtet man für die Biegeschwingung des CO_2 eine Emissionshöhe von ca. 85km von der aus das CO_2 ungestört in den Weltraum abstrahlen kann.

Anmerkung: Wie die Strahlungstransportgleichungen funktionieren sollen, kann man sich in entsprechenden Lehrbüchern ansehen (z.B. Radiative Transfer In The Atmosphere And Ocean, Knut Stamnes, Gary E. Thomas, Jakob J. Stamnes). Eine übersichtliche Herleitung und Integration dieser Gleichung von Ross Bannister findet man unter diesem Link:

<http://www.met.reading.ac.uk/~ross/Science/RadTrans.pdf>

59

Strahlungsantrieb oder Radiative Forcing

Um den Einfluß von Veränderungen der Umwelt auf die Energiebilanz der Erde zu beurteilen hat die moderne Klimawissenschaft Berechnungsmethoden hervorgebracht, die unter dem Begriff des Strahlungsantriebes oder Radiative Forcing zusammengefaßt werden. Man versucht mit diesen Methoden vorherzusagen wie Entwaldung, Veränderung der Solarkonstanten, Staubemissionen, Emission von Treibhausgasen, usw. sich auf die globale Temperatur auswirken. Wie schon der Begriff „Strahlungsantrieb“ bzw. „Radiative Forcing“ vermuten läßt, betrachtet man hauptsächlich den Einfluß auf die Strahlungsbilanz der Erde. Am Beispiel des CO_2 will ich kurz erklären wie man die Wirkung von Treibhausgasen zu beurteilen versucht.

Weil man zeigen will, wie sich Veränderungen von Treibhausgaskonzentrationen auf den Strahlungshaushalt der Erde auswirken, bietet sich die von der Erde ins Weltall abgegebene Wärmestrahlung als Ausgangspunkt zur Entwicklung einer Berechnungsmethode an. Diese Wärmestrahlung (OLR oder Outgoing Long Wave Radiation) kann mit Satelliten gemessen werden. In Abbildung 68 ist ein solches Spektrum (durchgezogene Linie) überlagert von einer Schar von „Schwarzkörperkurven“ (gestrichelte Linien) dargestellt. Im Bereich des Atmosphärischen Fensters folgt das vom Satelliten gemessene Spektrum der 320K-Kurve (ca. 47°C). D.h. hier mißt der Satellit direkt die Wärmestrahlung der, in diesem Fall recht warmen, Erdoberfläche. In den Bereichen, in welchen die Treibhausgase der Atmosphäre Wärmestrahlung absorbieren liegen die vom Satelliten gemessenen Intensitäten deutlich unter der 320K-Schwarzkörperkurve, die man für eine 47°C warme Erdoberfläche ohne die Absorption durch Treibhausgase erwarten würde.

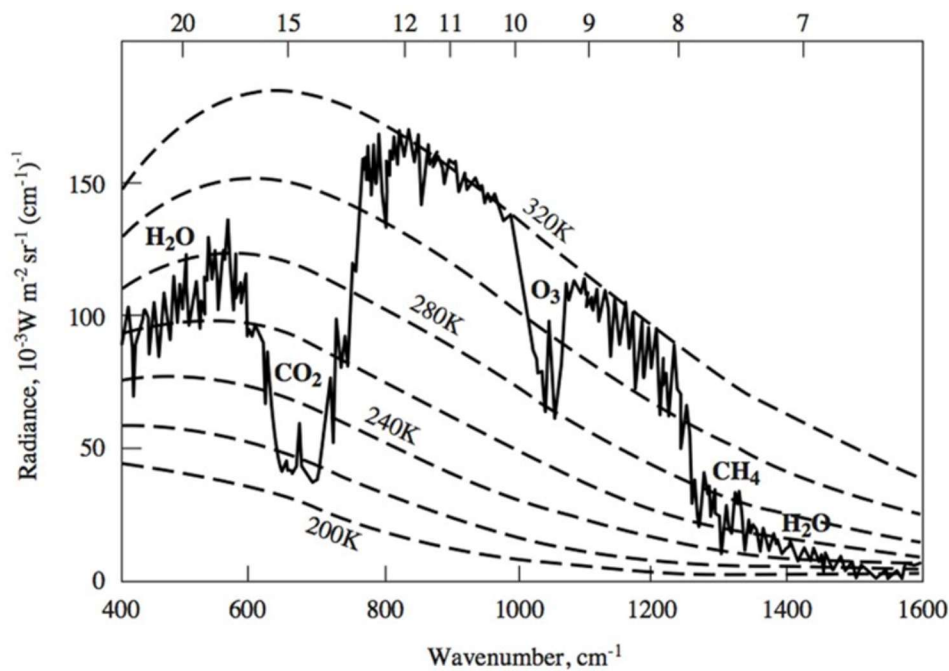


FIGURE 11. These are the data from Figure 8 with a superimposed series of black body curves for decreasing temperatures (beginning at the surface).

Abbildung 68: OLR-Emissionsspektrum, Quelle: Dr. Jerry A. Bell "Climate Science concepts Fit Your Classroom A Workbook for Teachers", <http://scifun.org/ClimateWorkbook/greenhouse-effect.html>

Die Flächen unter den Schwarzkörperkurven, bzw. dem gemessenen Spektrum haben die Dimension eines Strahlungsflusses. Die in Abbildung 69 gelb markierte Fläche ist die Differenz des Strahlungsflusses, den man von einer 47°C-warmen Erdoberfläche ohne Atmosphäre erwarten würde und dem tatsächlich vom Satelliten gemessenen Strahlungsfluß.

Gemäß der Treibhauseffekttheorie sollen die Treibhausgase durch Rückstrahlung die Abstrahlung der Erdoberfläche in den Weltraum behindern. Entsprechend dieser Annahme deutet man (fälschlicher Weise) die gelb markierte Fläche als einen, durch die Treibhausgase verursachten, „Abstrahlungswiderstand“.

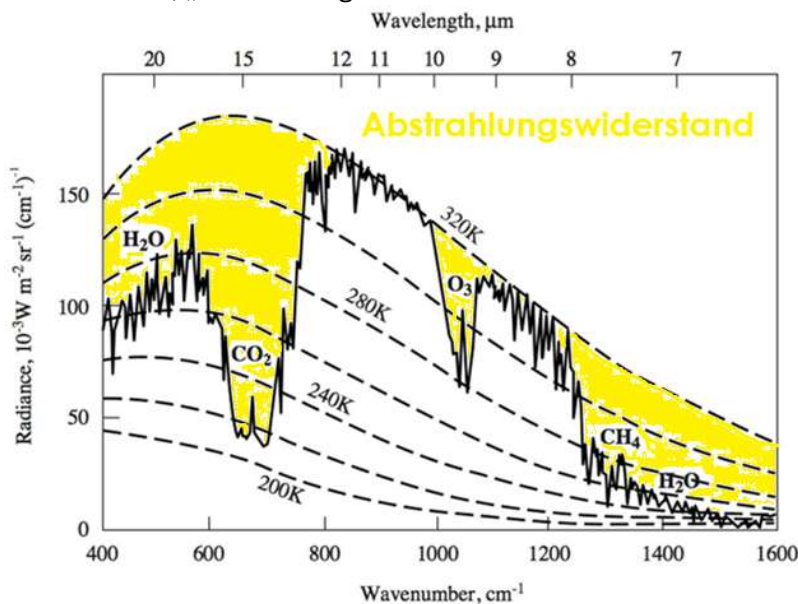


Abbildung 69: „Abstrahlungswiderstand“

Wenn nun durch Veränderung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen dieser frei erfundene „Abstrahlungswiderstand“ der Atmosphäre verändert wird, soll sich der Strahlungsfluß

durch die Atmosphäre ändern. Das Gleichgewicht zwischen eingestrahelter und abgestrahlter Leistung soll dadurch gestört werden. Als Reaktion auf diese Störung soll sich die Oberflächentemperatur der Erde verändern bis das Gleichgewicht zwischen Ein- und Abstrahlung wieder hergestellt ist.

Im Fall einer Treibhausgaskonzentrationserhöhung soll der „Abstrahlwiderstand“ größer werden. Dadurch soll der Strahlungsabfluß vermindert werden. Durch den verminderten Strahlungsabfluß soll es zu einem Wärmerückstau kommen. Der Wärmerückstau soll die Erdoberfläche solange erwärmen bis sich eine Oberflächentemperatur eingestellt hat, die so hoch ist, daß der erhöhte „Abstrahlwiderstand“ überwunden werden kann. Dadurch soll sich eine neue, höhere Gleichgewichtstemperatur auf der Erdoberfläche einstellen, bei der Einstrahlung und Abstrahlung wieder miteinander im Gleichgewicht sind.

Den Bemühungen die Veränderung des „Abstrahlwiderstandes“ durch Änderungen in den Treibhausgaskonzentrationen zu beurteilen, kommt der Umstand, daß man OLR-Spektren recht gut berechnen kann, entgegen.

Wie schon angedeutet kann man bei bekannter Temperatur unter Zuhilfenahme der Maxwell-Boltzman-Verteilung abschätzen wie hoch der Anteil der Luftmoleküle ist, die ausreichend kinetische Energie haben bestimmte Schwingungsmodi von Treibhausgasen anzuregen. In Kombination mit gemessenen Temperaturprofilen der Atmosphäre, bekannten Treibhausgaskonzentrationen und IR-Datenbanken lassen sich OLR-Spektren berechnen, die wirklich gemessenen Spektren sehr ähnlich sehen. Ein Vergleich von gemessenen und berechneten Spektren ist in Abbildung 70 dargestellt.

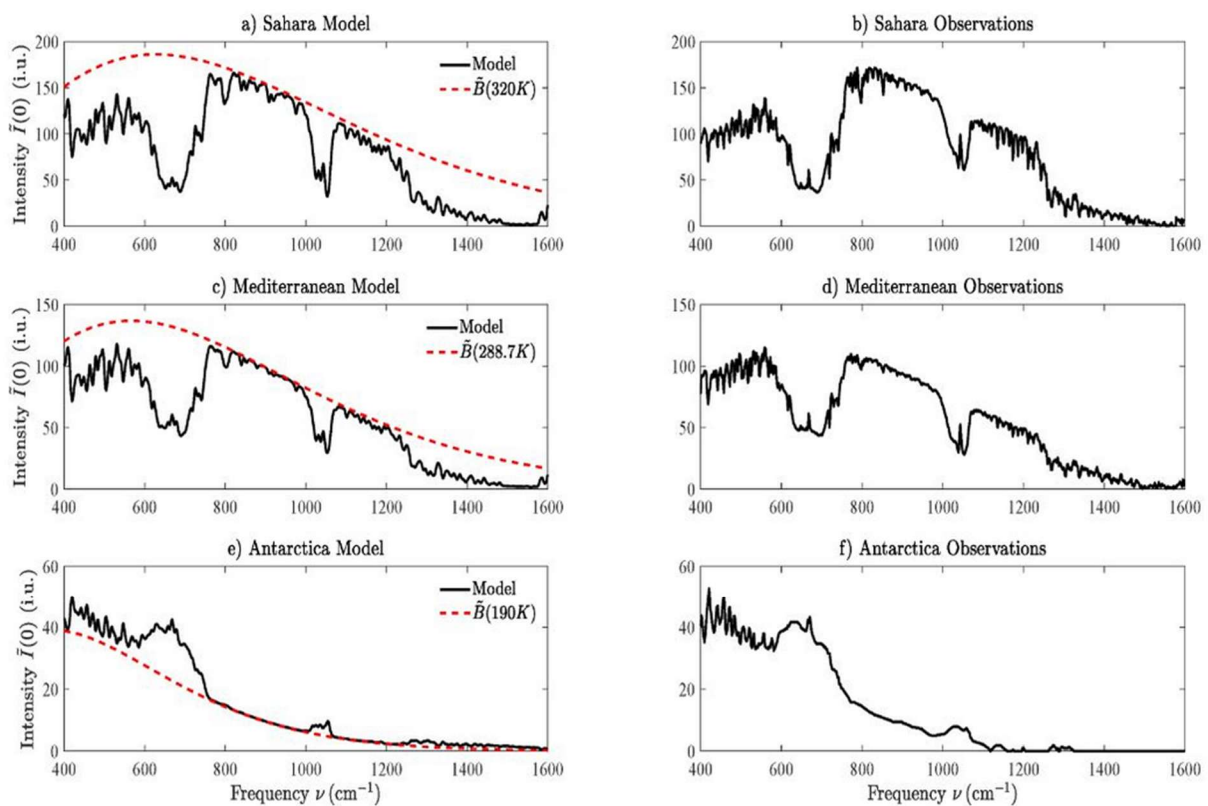


Figure 3. The W&H models on the left, compared to satellite measurements on the right. The modeled values are very similar to the measurements. Source: (Wijngaarden & Happer, 2020).

Abbildung 70: Vergleich gerechnete vs. gemessene OLR-Spektren, Quelle: Andy May „The Greenhouse Effect, A Summary of Wijngaarden and Happer“ ; <https://www.co2science.org/articles/V24/sep/a2.php>

Auf der Grundlage dieser guten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Spektren kann man dann in den Modellen den Einfluß sich ändernder Treibhausgaskonzentrationen auf den „Abstrahlungswiderstand“ untersuchen.

Die University of Chicago, USA stellt ihr MODTRAN-Programm, das es erlaubt solche OLR-Spektren zu berechnen unter diesem Link <https://climatemodels.uchicago.edu/modtran/modtran.html> zur Verfügung. Die hier zur Veranschaulichung des Konzeptes des Strahlungsantriebes gezeigten OLR-Spektren habe ich mit diesem Programm erzeugt. In Abbildung 71 ist ein MODTRAN-Spektrum mit der aktuellen CO₂-Konzentration von ca. 400ppm dargestellt.

MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

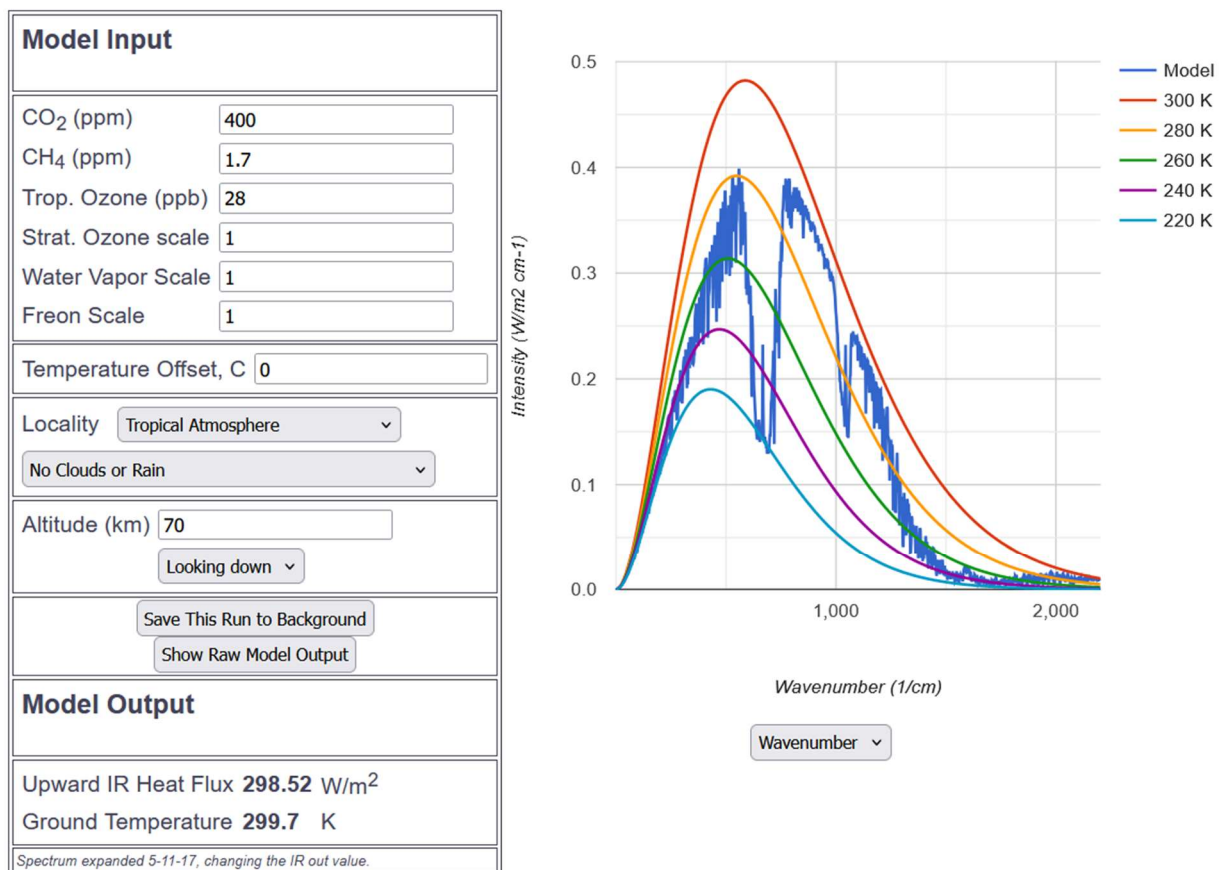


Abbildung 71: Mit MODTRAN berechnetes OLR-Spektrum mit 400ppm CO₂

Für eine Bodentemperatur von ca. 27°C berechnet das Programm einen Strahlungsfluß ins Weltall von ca. 299W/m².

Zu Demonstrationszwecken habe ich im nächsten Spektrum die CO₂-Konzentration auf 800ppm erhöht (Abbildung 72).

Model Input	
CO ₂ (ppm)	800
CH ₄ (ppm)	1.7
Trop. Ozone (ppb)	28
Strat. Ozone scale	1
Water Vapor Scale	1
Freon Scale	1
Temperature Offset, C 0	
Locality	Tropical Atmosphere
No Clouds or Rain	
Altitude (km)	70
Looking down	
Delete Background Model Run	
Show Raw Model Output	
Model Output	
Upward IR Heat Flux	295.191 W/m ²
IR Heat Loss (Background)	298.52 W/m ²
... Difference, New - BG	-3.33 W/m ²
Ground Temperature	299.7 K
Spectrum expanded 5-11-17, changing the IR out value.	

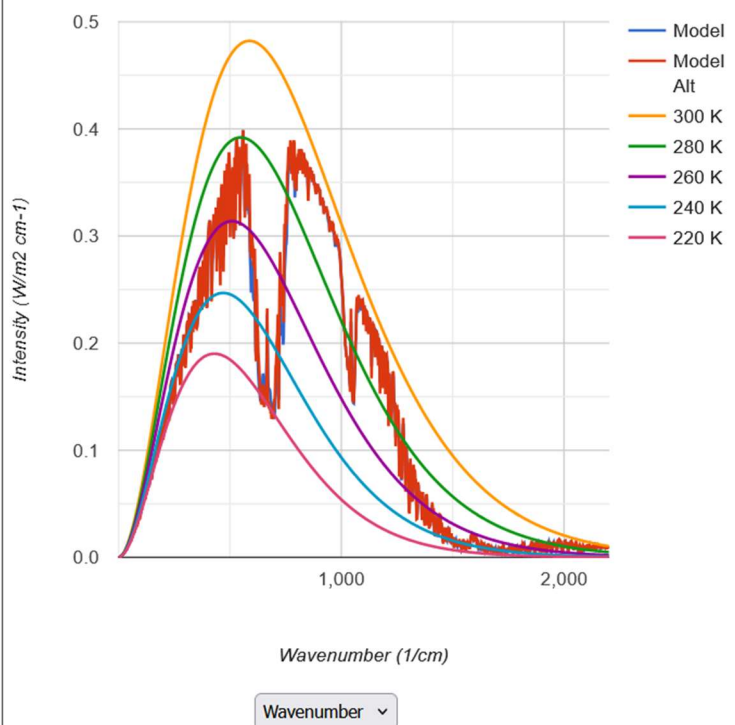


Abbildung 72: Mit MODTRAM berechnetes OLR-Spektrum mit 800ppm CO₂

Das Modell berechnet für diese Verdoppelung der CO₂-Konzentration eine Zunahme des „Abstrahlungswiderstandes“ um 3,3W/m². Im Spektrum ist diese Zunahme mit etwas gutem Willen als ein paar blaue „Zipfel“, die aus der CO₂-Absorption herausragen zu erkennen.

Der hier lokal für eine tropische Atmosphäre ermittelte Wert erhöht sich, wenn man einen globalen Mittelwert bildet, auf 3,7W/m². Weil wir großzügig sind und auch nur das Grundprinzip des Strahlungsantriebes vorführen wollen rechnen wir mit 4W/m², um den angeblichen Erwärmungseffekt einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration von 400ppm auf 800ppm zu berechnen.

Man geht mit der vom IPCC bestimmten Durchschnittstemperatur der Erde (15°C bzw. 288K) in die Stefan-Boltzmann-Gleichung.

$$P/A = \sigma T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \times 288^4 \text{ K}^4 = 390 \text{ W/m}^2 \quad \text{mit } \sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Mit dieser Durchschnittstemperatur ergibt sich eine durchschnittliche Abstrahlung der Erde von 390W/m².

Die durch die Verdoppelung der CO₂-Konzentration verursachte zusätzliche Rückstrahlung von 4W/m² addieren wir zu den 390W/m². Weil die zusätzlich eingestrahlte Leistung im thermischen Gleichgewicht auch wieder abgestrahlt werden muss ergibt sich.

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma A}} = \sqrt[4]{\frac{394}{5,67 \cdot 10^{-8}}} K = 288,7 K = 15,7^\circ C$$

Die Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration soll demnach eine Erhöhung der Welterdschnitttemperatur um 0,7°C bewirken. Dieser eher moderate Temperaturanstieg soll dann durch wenig plausible Rückkopplungen mit dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre auf 2,5°C bis 4,5°C verstärkt werden.

Den Klimaeffekt der anderen Treibhausgase „berechnet“ man in analoger Weise.

Wer sich näher mit dieser „Phantasiephysik“ beschäftigen will, findet einen nett gemachten Einstieg in dieses Thema auf der Seite des Instituts für Umweltphysik der Universität Bremen (https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/Handbuch/index.html).

Wie ich in aller Ausführlichkeit gezeigt habe, ist die Emission der Erdoberfläche auf den Treibhausgasfrequenzen von der Emission der Treibhausgasfrequenzen aus den hohen Schichten der Atmosphäre ins Weltall durch eine für diese Frequenzen undurchlässige Konvektionsschicht getrennt. Der konvektive Wärmetransport durch diese Konvektionsschicht ist der begrenzende Faktor im Wärmefluß von der Erdoberfläche ins Weltall. D.h. aus den hohen Schichten der Atmosphäre wird die Wärmeenergie schneller durch thermisch angeregte Emission abgestrahlt, als sie durch Konvektion nachgeliefert werden kann. OLR-Spektren können daher keine Auskunft über einen angeblich durch Rückstrahlung verursachten „Abstrahlungswiderstand“ der Atmosphäre liefern. Sie geben lediglich Auskunft darüber ab welchen Höhen/Drücken die Atmosphäre so dünn wird, daß die Treibhausgase ungestört von Thermalisierung und Absorption in den Weltraum abstrahlen können.

Die Emission der Treibhausgasfrequenzen ins Weltall erfolgt ausschließlich durch thermisch angeregte Emission. Im Fall einer thermisch angetriebenen Emission, ist ein „Rückstau“ auf bestimmten Frequenzen nicht möglich. Wärme, die durch Absorption dieser Frequenzen frei wird verteilt sich gemäß dem **Gleichverteilungssatz** auf alle Bestandteile der Gasmischung und fließt dann durch thermisch angeregte Emission auf Frequenzen, die weniger stark absorbiert werden, ab.

Im Gegensatz zu CO₂, Ozon, Methan und Lachgas (N₂O) hat Wasser einen recht hohen Siedepunkt. Es kondensiert deshalb unter Wolkenbildung bevor es durch Konvektion und Diffusion in große Höhen transportiert werden kann. Oberhalb der Tropopause, bei Temperaturen von -60°C bis -80°C, ist Wasser praktisch vollständig aus der Atmosphäre ausgefroren. **Das hat zur Folge, daß die von Wasser abgestrahlte Wärmestrahlung oberhalb der Tropopause, ungestört durch Absorption, ins Weltall abgegeben werden kann** (Abbildung 73).

Wärme die durch Absorption höherfrequenter Treibhausgasfrequenzen frei wird, staut unter diesen Bedingungen nicht zurück, sondern treibt die Emission der niederfrequenten Wasseremissionen. Diese Absorption kurzwelliger Treibhausgasfrequenzen und Umwandlung in langwellige Wasseremissionen ist mit einem Entropiegewinn verbunden.

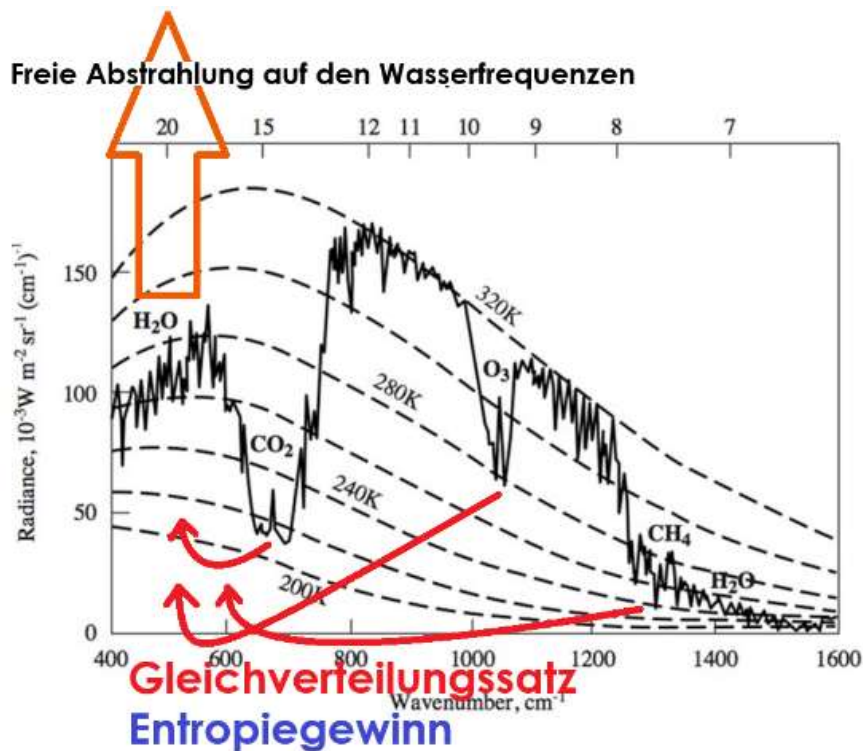


Abbildung 73: Der Gleichverteilungssatz „läßt es nicht zu“, daß es auf bestimmten Treibhausfrequenzen zu einem Wärmestau kommt.

Deshalb übernimmt Wasser den Löwenanteil der Abstrahlung auf den Treibhausgasfrequenzen.

Stratospheric Cooling (S.Manabe)

65

Zum Abschluß müssen wir noch kurz auf die mit einem Nobelpreis ausgezeichnete Theorie von Syukuro Manabe eingehen, der zufolge „Stratospheric Cooling“ das Problem sein soll.

In kompakter Form kann man sich das in einem Vortrag des 2021-Nobelpreisträgers ansehen (Abbildung 74, mit Videolink).

Mechanism of Global Warming

Height

Solar radiation

Top of the atmosphere

Longwave radiation

A

B

Greenhouse effect

Temperature

SYUKURO MANABE
Nobel Prize in Physics 2021

THE NOBEL PRIZE

16:45 / 32:57

Abbildung 74: S. Manabes Erklärung des Treibhauseffektmodells <https://www.youtube.com/watch?v=VNKJ2IbRoo&list=TLPQMDUwNTlwMjTG56XBsb8DQw&index=2>

Zu Beginn seines Vortrages weist Manabe darauf hin, daß das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz in der Erdatmosphäre gültig ist. Anhand eines idealisierten Temps (Temperaturhöhenprofil) erklärt er die Auswirkungen einer Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen. In Abbildung 74 bezeichnet er mit Punkt A die Lage der mittleren Emissionshöhe von der aus, die Atmosphäre ins Weltall abstrahlt. Das "effektive Zentrum der Rückstrahlung" bezeichnet er mit B.

Wenn in diesem Modell die Treibhausgaskonzentration erhöht und damit die Durchlässigkeit der Atmosphäre für IR-Strahlung vermindert wird, verschiebt sich die mittlere Emissionshöhe (Punkt A) auf dem Temp nach oben, weil dann erst in größeren Höhen der Abstand zwischen den Treibhausgasmolekülen so groß wird, dass die durch thermisch angeregte Emission freigesetzte Strahlung in den Weltraum entweichen kann. Das hat zur Folge, dass nun die Emission bei niedrigeren Temperaturen erfolgt („Stratospheric Cooling“). Gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ($P/A = \epsilon \sigma T^4$) soll dadurch die Abstrahlung der oberen Atmosphäre abnehmen.

Um wieder ins Gleichgewicht mit der von der Sonne eingestrahnten Leistung zu kommen muss sich die Atmosphäre erwärmen bis sie wieder so viel abstrahlt wie die Sonne einstrahlt (Wärmestau => neues Fließgleichgewicht => Global Warming).

Gleichzeitig wandert das effektive Zentrum der Abwärtsstrahlung auf dem Temp nach unten, weil die Reichweite der Oberflächenstrahlung abnimmt. Dadurch erfolgt die Abwärtsstrahlung bei höheren Temperaturen, was zu einer Verstärkung der Abwärtsstrahlung führt (wieder gemäß: $P/A = \epsilon \sigma T^4$ => Global Warming).

Das hört sich gar nicht so unplausibel an, ist aber falsch.

Manabe setzt die Gültigkeit des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes voraus, obwohl dieses Gesetz auf konvektive Systeme, wie die Troposphäre, nicht anwendbar ist.

Die Annahme, dass ein Absinken des „effektiven Zentrums der Abwärtsstrahlung“ zu einer verstärkten Rückstrahlung und damit zu einer Erhöhung der Bodentemperatur führt, vernachlässigt den Umstand, dass eine verminderte Reichweite der Oberflächenstrahlung auch dazu führt, dass das Luftvolumen in dem die Strahlung der Erdoberfläche absorbiert wird, abnimmt. Dadurch heizt sich die bodennahe Luft schneller und stärker auf, was zu einer Verstärkung des konvektiven Wärmeabflusses führt.

Die Annahme, dass die Anhebung des effektiven Emissionsniveaus und die damit verbundene niedrigere Emissionstemperatur zu einem Wärmestau in der Atmosphäre führt, setzt voraus, dass die Abstrahlung aus den oberen Schichten der Atmosphäre der geschwindigkeitsbestimmende Vorgang („Flaschenhals“) im Energiefluss von der Erdoberfläche in den Weltraum ist. Wenn das der Fall wäre sollte gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz eine σT^4 - Abhängigkeit zwischen Bodentemperatur und dem von der oberen Atmosphäre ausgesandten Strahlungsfluß bestehen. Wie schon erwähnt, beobachtet man stattdessen einen linearen Zusammenhang, der ein Hinweis darauf ist, dass der konvektive Wärmetransport durch die Troposphäre der geschwindigkeitsbestimmende Vorgang ist (Abbildung 75). Ein Wärmestau ist deshalb nicht zu erwarten.

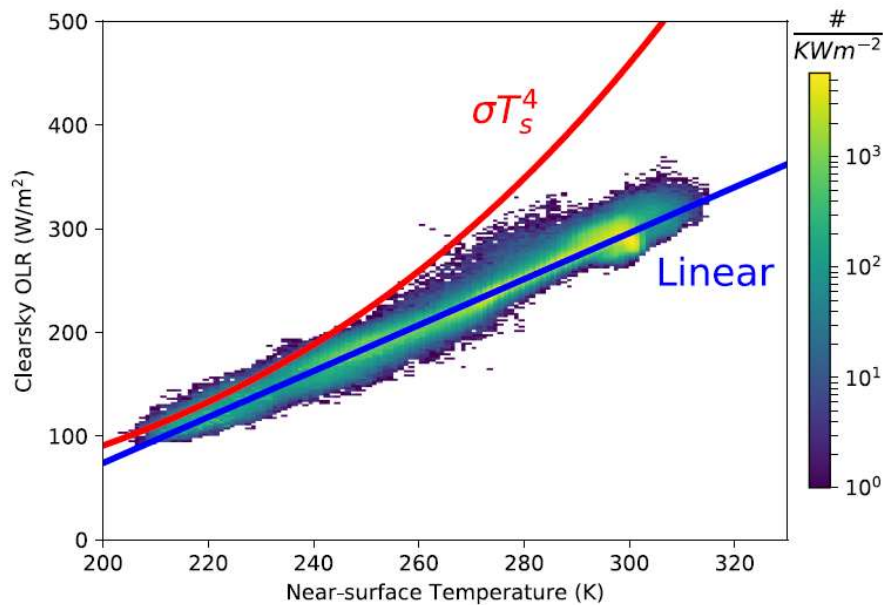


Fig. 1. Earth's OLR strongly deviates from the thermal emission of a black-body, σT_s^4 . Instead, the dependence of OLR on surface temperature can be approximated as a linear function. Shown are monthly mean clear-sky OLR from a satellite data product and near-surface temperatures from reanalysis (*Materials and Methods*). Colors show the density of data points, and the blue curve is a simple linear regression ($r^2 = 0.97$).

Abbildung 75, Quelle: Earth's outgoing longwave radiation linear due to H₂O greenhouse effect Daniel D. B. Kolla, 1 and Timothy W. Cronina (2018) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30254153/>

67

Yong Zhong hat darauf hingewiesen, dass in diesem Zusammenhang auch die durch höheren Gasdruck verursachte Verbreiterung der IR-Absorptionsbanden zu beachten ist. Ein gutes Erklärvideo zu diesem Thema ist auf seinem YouTube-Kanal Yong Tuiton zu finden.
<https://www.youtube.com/watch?v=2y8uqeBRU9E>

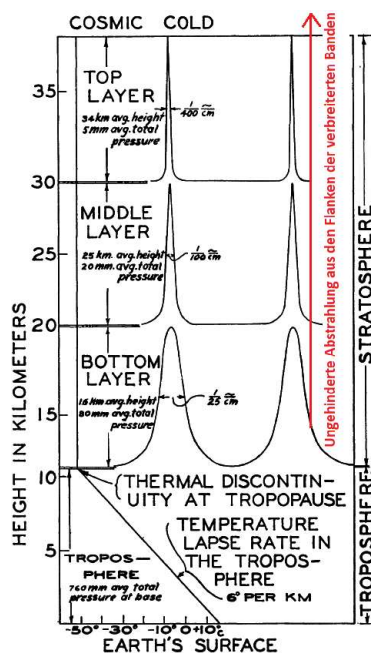


FIG. 1.—Line width, pressure, and temperature of the atmosphere. This figure illustrates the importance of line width for radiative cooling.

Abbildung 76: Druckbedingte Bandenverbreiterung der Treibhausgasabsorptionen in der Stratosphäre Quelle: John Strong 1950 <https://adsabs.harvard.edu/full/1950ApJ...112..365S>

In den unteren Bereichen der Stratosphäre werden die Treibhausgasabsorptionsbanden, bedingt durch den höheren Druck und den dadurch häufiger werdenden Kollisionen mit anderen Luftmolekülen, immer breiter.

Das hat zur Folge, dass aus den breiten Flanken der Treibhausgasmolekülbanden in der unteren Stratosphäre abgestrahlte IR-Strahlung ungehindert an den schmalen Absorptionsbanden der oberen Stratosphäre vorbei in den Weltraum entweichen kann (Abbildung 76).

Dieser Effekt wirkt in der Stratosphäre einer Rückstrahlung bzw. einem „Wärmestau“ entgegen. Es ist deshalb nicht anzunehmen, dass die Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen wirklich zu einer deutlichen Anhebung des Emissionsniveaus führt.

John Strong sieht in diesem Effekt einen Hauptgrund für die stabile/konvektionsfreie Schichtung der Stratosphäre.

Und wie schon erwähnt, macht auch der Gleichverteilungssatz einen solchen Wärmerückstau unmöglich, weil die Wärme ungehindert über die Wasserdampffrequenzen abfließen kann.

Welche Auswirkungen hat eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen in der realen Welt?

Auch im Konvektionsmodell führt eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen dazu, dass sich das „effektive Zentrum der Abwärtsstrahlung“ (Punkt B) auf dem Temp nach unten verschiebt. Bedingt durch die geringen Reichweiten der Treibhausgasfrequenzen in der unteren Atmosphäre (Sättigung) verschiebt sich Punkt B aber nur um ein paar Meter nach unten. Als Rechenbeispiel nehmen wir wieder CO₂ mit ca. 2.6% Wasserdampf (Abbildung 78).

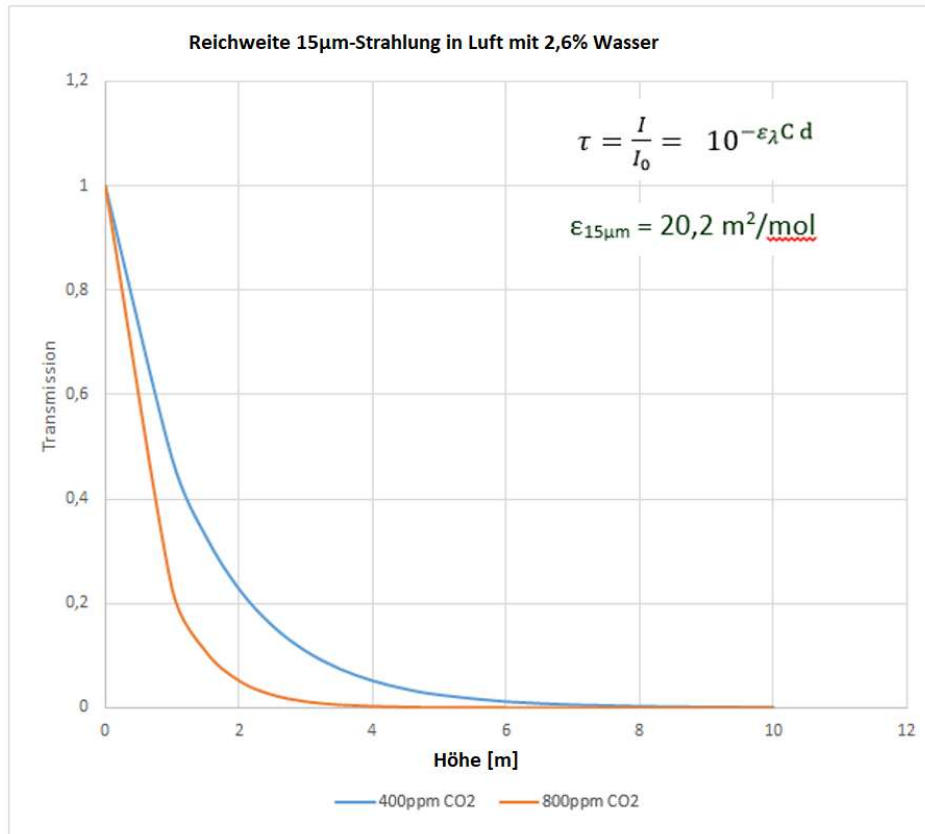


Abbildung 78: Reichweite der 15µm-Strahlung bei 400ppm und 800ppm

Bei ca. 400ppm wird auf einer Höhe von ca. 10m eine 99%ige Absorption erreicht, während bei 800ppm CO₂ schon nach ca. 5m etwa die gleiche Absorption erreicht wird. Diese 5m-Verschiebung des "effektiven Zentrums der Abwärtsstrahlung" hat ganz sicher keinen nennenswerten Einfluss auf die Emissionstemperatur der Rückstrahlung.

Was sich aber bemerkbar macht ist, dass sich das Luftvolumen in dem die Oberflächenstrahlung absorbiert wird, deutlich vermindert. In diesem Rechenbeispiel etwa auf die Hälfte für die 15µm-Strahlung. Das hat zur Folge, dass sich die bodennahe Luft deutlich schneller aufheizt und die Konvektion früher im Tagesverlauf anspringt. Nach Anspringen der Konvektion, erwärmt sich die Bodenluft messbar langsamer als vor Thermik/Konvektionsbeginn.

Diese messbare Verminderung der Aufheizrate wird in der Segelflugmeteorologie als Knickpunkt bezeichnet und gilt als Anzeichen des morgendlichen Thermikbeginns.

Da, wie zuvor beschrieben, davon auszugehen ist, dass die Konvektion der Flaschenhals im Energiefluss von der Erdoberfläche ins Weltall ist, hat die durch einen höheren Treibhausgasanteil verstärkte Konvektion im Konvektionsmodell, wenn überhaupt eher einen kühlenden Einfluss.

Ein einfaches Gedankenexperiment von Paul Linsay

Zum Abschluß möchte ich auf ein von Paul Linsay vorgeschlagenes Gedankenexperiment eingehen, das besonders klar zeigt wie abwegig und physikalisch falsch die Theorie des atmosphärischen Treibhauseffektes ist.

Wir betrachten eine dunkle, kalte Erde mit einer im Vergleich zu ihrem Durchmesser recht dünnen Atmosphäre. Die Atmosphäre enthält keine Treibhausgase. D.h. die Atmosphäre ist vollkommen durchlässig für Wärmestrahlung und nur die Erdoberfläche kann Wärmestrahlung in den Weltraum abgeben (Abbildung 79, Bild 1).

Wenn wir diese kalte Erde der Sonne aussetzen, erwärmt sich die Erdoberfläche. In ihrer Atmosphäre kommen dann Konvektionsströmungen in Gang. Durch diese Konvektionsströmungen wird die Atmosphäre erwärmt (Abbildung 79, Bild 2).

Zum Sonnenuntergang hat sich die Atmosphäre erwärmt und die Konvektionsströmungen kommen zum Erliegen (Abbildung 79, Bild 3). Weil die Atmosphäre im Vergleich zum Durchmesser der Erde recht dünn ist, können Konvektionsströmungen, die für einen Austausch zwischen Tag- und Nachtseite sorgen, vernachlässigt werden.

Über Nacht strahlt die Erdoberfläche Wärmestrahlung ab und es bildet sich eine dünne Inversionsschicht an ihrer Oberfläche aus (Abbildung 79, Bild 4). Die Inversionsschicht verhindert, daß die immer noch warme Atmosphäre Wärme an die inzwischen abgekühlte Erdoberfläche abgeben kann. Nach der Ausbildung der Inversionsschicht kann sich deshalb die Atmosphäre nicht mehr weiter abkühlen.

An den nächsten Tagen wiederholt sich dieser Vorgang und die Atmosphäre heizt sich immer weiter auf bis sie die maximale Temperatur der sonnenbeschienenen Erdoberfläche erreicht hat.

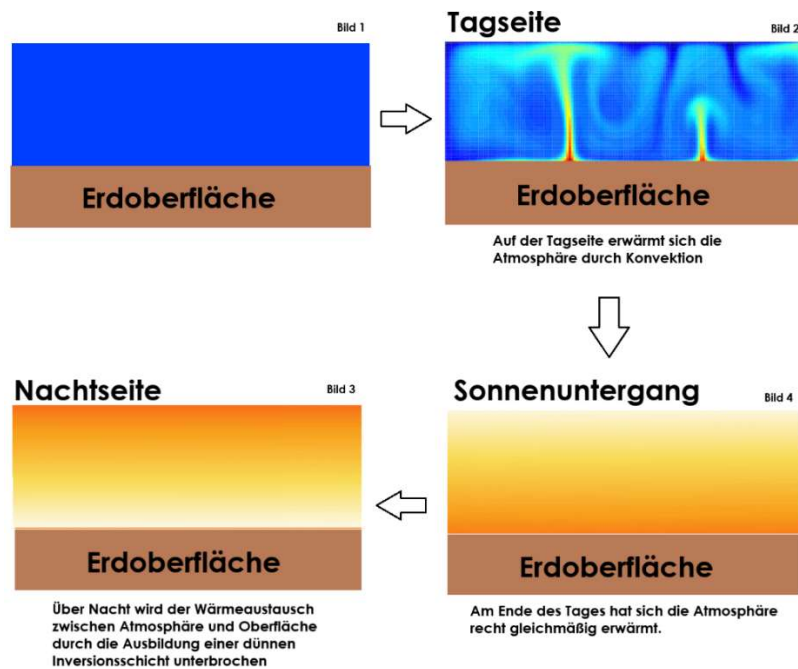


Abbildung 79: Eine Atmosphäre ohne Treibhausgase ist sehr warm, weil sie sich nicht abkühlen kann.

Fazit des Gedankenexperimentes: Eine Atmosphäre ohne Treibhausgase kann sich nicht durch Abstrahlung in den Weltraum abkühlen und ist deshalb sehr warm. **Treibhausgase kühlen die Erdatmosphäre** und die Propaganda der letzten Jahrzehnte versucht uns vom Gegenteil zu überzeugen.

Wie kam dieser Unsinn zustande?

Vor dem Hintergrund des bisher gesagten, ist es nur schwer nachvollziehbar wie sich ein ganzer Wissenschaftszweig über Jahrzehnte so „irren“ konnte.

Ich vermute, dass die moderne Klimawissenschaft ein Kind des Computerzeitalters ist. Noch in den 70er Jahren waren leistungsstarke Computer an Universitäten Prestigeobjekte. Jeder der auch nur ein bisschen Ehrgeiz hatte wollte so eine Maschine für seinen Arbeitskreis. Im Gegensatz zu Konvektionsmodellen, haben Strahlungsmodelle den Charme ohne allzu komplizierte Berechnungen Zahlen zu generieren. Es war daher verlockend diesen Irrweg einzuschlagen. Peer Review und politisch motivierte Förderung taten ein Übriges. So wurde aus wissenschaftlichem „Irrtum“ eine Ideologie, die als Waffe gegen den (vormals) „freien Westen“ eingesetzt wird.

Vor dem Hintergrund des rapide wachsenden Energiebedarfs neuer Technologien, beobachten wir aktuell (Sommer 2026), daß der IPCC seine Warnungen stark relativiert. Wahrscheinlich sieht man sich beim IPCC dazu veranlaßt, um einer öffentlichen Untersuchung seiner „Klimavorhersagen“ durch Vertreter der neuen Technologien zuvorzukommen.

Schlußbemerkung: P.M. Robitaille weist darauf hin, daß das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz kein universal gültiges physikalisches Gesetz ist (<https://www.youtube.com/@SkyScholar>). Ungeachtet dessen findet Kirchhoffs Strahlungsgesetz weite Anwendung in der Astronomie. Man kann deshalb davon ausgehen, daß diese Wissenschaft ähnlich zuverlässige Aussagen macht wie die moderne Klimawissenschaft. Manchmal habe ich den Eindruck, daß man die

Astronomen weiter Unsinn machen läßt, weil eine entsprechende Korrektur auch die moderne Klimawissenschaft in Mitleidenschaft ziehen könnte.

Über den Autor:



Der promovierte Chemiker Markus Ott arbeitet seit 1994 als Forscher und Entwickler in der chemischen und pharmazeutischen Industrie. Er hat sich vor allem mit der Entwicklung photolithographischer Methoden zur Herstellung von Biochips sowie mit der Entwicklung lichthärtender Kunststoffe beschäftigt. Neben den theoretischen Grundlagen verfügt er über die notwendige praktische Erfahrung, um die Wechselwirkung von Licht mit Materie zu beurteilen. Als begeisterter Flieger beschäftigt er sich seit seiner Jugend mit den Vorgängen in unserer Atmosphäre. Der vorliegende Text „Die unglaubliche Physik des Treibhauseffektes“ bzw. die englische Version „The Fake Physics of the Greenhouse Effect“ sollen in möglichst verständlicher Form zeigen, daß das zentrale Dogma der modernen Klimawissenschaft jeder physikalischen Realität entbehrt.