

Energie und Materie

geschrieben von Chris Frey | 6. Februar 2025

[Andy May](#) & Tom Shula

Im Grunde läuft die ganze Idee der vom Menschen verursachten CO₂-Erderwärmung, wie auch immer man sie nennt, auf die Wechselwirkung von Energie und Materie hinaus. Der einzige Grund, warum CO₂ und andere Treibhausgase etwas Besonderes sind ist, dass sie den größten Teil der von der Erdoberfläche abgegebenen Strahlung absorbieren. Wasserdampf absorbiert fast das gesamte Emissionsspektrum und ist bei weitem der wichtigste Absorber. Die wolkenfreie Atmosphäre ist für das Sonnenlicht weitgehend transparent, so dass die Erdoberfläche den größten Teil des Sonnenlichts absorbiert, das durch die Wolken dringt. Als Reaktion auf diese Anregung gibt sie Infrarotstrahlung (IR) ab.

Da die feuchte untere Atmosphäre für den Großteil der von der Oberfläche ausgehenden Strahlung, die sich außerhalb der atmosphärischen Fenster befindet, nahezu undurchlässig ist, werden die Oberflächenemissionen von den Treibhausgasen sehr nahe an der Oberfläche absorbiert. Auf Meereshöhe werden 99,9 % der gesamten Oberflächenstrahlung außerhalb der atmosphärischen Fenster normalerweise in den unteren 10 Metern der Atmosphäre absorbiert (Hug, 2000). Ebenso stammt jede „Rückstrahlung“, die außerhalb der atmosphärischen Fenster an die Oberfläche gelangt, aus den unteren 10 Metern der Atmosphäre; die restlichen Emissionen aus den unteren 10 Metern der Atmosphäre werden von anderen Treibhausgasen, fast immer Wasserdampfmolekülen, aufgefangen.

Emissionen in den Frequenzen, die nicht von Treibhausgasen absorbiert werden können, also in den so genannten „atmosphärischen Fenstern“, werden nicht erfasst; dies sind die Frequenzen, die von IR-Thermometern und -Scannern verwendet werden. Wasserdampf ist in Teilen dieser Fenster oft ein sehr schwacher Absorber und Emittent. Die Strahlung, die man sieht, wenn IR-Thermometer und -Scanner auf den Himmel gerichtet sind, ist Strahlung, die von atmosphärischen Partikeln und Wolken gestreut wird. Wie in van Wijngaarden und Happer (2025) dargelegt, wird langwellige IR-Strahlung nur von Wassertröpfchen, Eis oder anderen Partikeln gestreut; die Streuung von IR-Strahlung durch Moleküle ist vernachlässigbar, insbesondere in den atmosphärischen Fenstern.

Wenn Treibhausgasmoleküle Strahlungsemissionen von der Oberfläche oder anderen Treibhausgasen absorbieren, werden sie angeregt und steigen über ihren molekularen Grundzustand hinaus, um dann entweder die überschüssige Energie durch Kollisionen als kinetische Energie an ihre Nachbarn abzugeben oder die Energie entsprechend ihrer spezifischen Emissionsfrequenz zu emittieren (Hug, 2000). In der unteren Atmosphäre ist die Dissipation viel häufiger als die Emission, aber wenn eine Emission stattfindet, wird die emittierte Energie schnell von nahe

gelegenen Treibhausgasen aufgefangen und an ihre Nachbarn abgegeben. Strahlungsenergie von der Oberfläche oder anderen Treibhausgasen, die von einem Treibhausgasmolekül eingefangen wird, wird relativ lange gehalten, etwa eine halbe Sekunde, bevor sie wieder abgegeben wird. In dieser halben Sekunde hat das Molekül etwa drei Milliarden Zusammenstöße mit anderen Molekülen auf Meereshöhe (Siddles et al.). Siddles et al. berichten außerdem, dass die Wahrscheinlichkeit, dass das angeregte Molekül überschüssige Energie abgibt, 50.000 Mal höher ist als die Wahrscheinlichkeit, dass es Energie auf Meereshöhe abgibt. Die Strahlungsrückkehr in den Grundzustand ist in der unteren Atmosphäre unbedeutend (Hug, 2000).

Die Ableitung der überschüssigen Energie durch Kollisionen erwärmt die Umgebung der angeregten Treibhausgasmoleküle und wird als Thermalisierung bezeichnet. Die Thermalisierung erhöht die fühlbare Wärme des Gases und regt die Konvektion an. Diese Prozesse erhöhen sowohl die Verdunstung als auch die Wärmeleitung von der Oberfläche. Durch Konduktion wird die fühlbare Wärme direkt von der Oberfläche auf die Luft übertragen und durch Verdunstung wird die latente Wärme abgeführt.

Jetzt kommen wir an einen Punkt, an dem es verwirrend wird. Die Oberfläche hat den größten Teil ihrer überschüssigen Wärmeenergie abgegeben und den Rest gespeichert. Was geschieht nun? Die meisten Beschreibungen des Treibhauseffekts betonen den Wärmetransport durch die Atmosphäre mittels Strahlung und ignorieren entweder den Wärmetransport durch Konvektion oder fälschen eine Anpassung der troposphärischen Stornorate zur „Korrektur“ der Konvektion. Wenn ein vertikales atmosphärisches Temperaturprofil mit einem Strahlungstransportmodell erstellt wird, stimmt es nicht mit den Beobachtungen überein. Um ein vernünftiges atmosphärisches [Strahlungs-Wärmeübertragungsmodell](#) zu erstellen, muss man daher ein Temperaturprofil annehmen, das der Realität nahe kommt. Ein typisches angenommenes Profil ist in van Wijngaarden und Happer (2020) als Teil ihrer Abbildung 1 zu sehen.

In Manabe und Wetherald (1967) sowie in Manabe und Strickler (1964) wird die Stornorate einfach unter $6,5^{\circ}\text{C}$ gedrückt, um den Effekt der Konvektion zu berücksichtigen. Durch die Konvektion sinkt die Stornorate auf durchschnittlich $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ von etwa $9,8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ im Fall eines reinen Strahlungsgleichgewichts, wie in Abbildung 1 von Manabe und Strickler dargestellt. Diese Verringerung ist darauf zurückzuführen, dass durch konvektive Prozesse zusätzliche Wärme im Klimasystem zurückgehalten wird. Die Übertragung von Wärme durch Strahlung erfolgt schneller als die Abkühlung durch Konvektion, und die Ozeane und die Atmosphäre (zusammen das „Klimasystem“) haben eine beträchtliche Wärmekapazität und speichern Wärmeenergie über unterschiedlich lange Zeiträume. Die Annahmen zur Strahlungswärmeübertragung im herkömmlichen „Konsens“-Treibhausgasmodell des Klimawandels stimmen nicht mit der Realität überein, so dass das vertikale Temperaturprofil angenommen werden muss, es kann nicht modelliert werden.

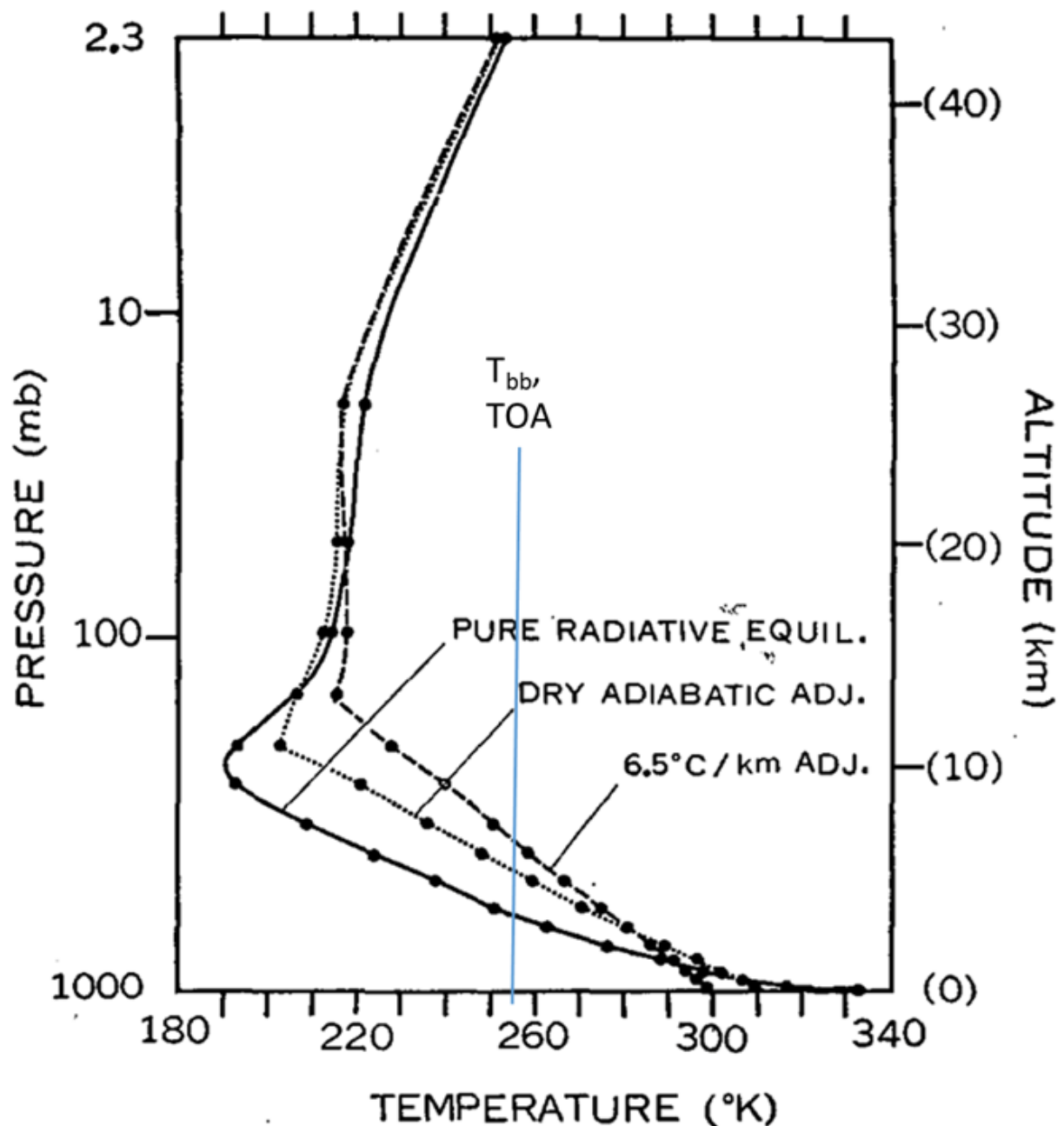


Abbildung 1. Die Abbildung von Manabe und Strickler zeigt ihre modellierten Temperaturprofile für reine Strahlungskühlung, Kühlung in der trockenen Atmosphäre und ihre „angepassten“ realen Kühlungsraten. Am oberen Ende der Atmosphäre (TOA) erzeugt die Strahlungskühlung eine viel niedrigere Temperatur als in der realen Welt. Die blaue Linie liegt bei der durchschnittlichen Strahlungsemissionstemperatur ([255 K](#) oder -18 °C) der Erde.

Konvektion

Wenn die Sonne die Temperatur steigen lässt, führen Wärmeleitung und Verdunstung dazu, dass die Dichte der unteren Luftschicht abnimmt, und sie beginnt zu steigen. Die Konvektion setzt spontan ein. Durch die Konvektion wird sowohl die latente als auch die fühlbare Wärme höher in

die Atmosphäre transportiert, wo es kälter ist. Der Wasserdampf kondensiert in der kühleren oberen Luft, wobei seine latente Wärme freigesetzt wird, und die daraus resultierende trockenere und dichtere Luft sinkt nach unten, um mehr Wasser zu verdampfen und die Zirkulation fortzusetzen.

Die oberste Grenze der Zirkulation ist die Tropopause an der Obergrenze der Troposphäre. An der Tropopause sind der Luftdruck und die Dichte geringer, und der Wasserdampf ist fast verschwunden. Die Tropopause befindet sich weit oberhalb der so genannten „Emissionsschicht“ (durchschnittlich etwa 5 km, mit einer Temperatur von etwa 255 K), in der Wasser kondensiert und im Durchschnitt den größten Teil seiner latenten Wärme als Strahlung in den Weltraum abgibt. Die latente Wärmeabgabe erwärmt die Treibhausgase (hauptsächlich Wasserdampfmoleküle) in der Umgebung und regt sie an, was zu Emissionen führt. In diesem Bereich der Atmosphäre, zwischen der Emissionsschicht und der Tropopause, verschwindet der Wasserdampf weitgehend, die Konvektion lässt nach, und die meisten OLR-Emissionen in den Weltraum finden statt. Die Thermisierung ist aufgrund der geringeren atmosphärischen Dichte und der niedrigen Luftfeuchtigkeit schwieriger zu erreichen, und die emittierte Strahlung reicht weiter. In einer gewissen Höhe in dieser Region und bei einigen Frequenzen auch darunter kann die emittierte Strahlung in den Weltraum entweichen.

Die oben beschriebene Thermalisierung kann auch in umgekehrter Richtung funktionieren. Moleküle, die durch latente Wärme erwärmt werden, die bei der Kondensation von Wasserdampf oder der Aufwärtskonvektion warmer Luft freigesetzt wird, können mit Treibhausgasen kollidieren und diese anregen, sodass sie Strahlung aussenden. Dies gilt insbesondere für Wasserdampf, der durch Kollisionen leichter angeregt wird als CO_2 . Dies ist ein weiterer Grund, warum fast alle Emissionen in den Weltraum aus Wasserdampf stammen.

Koll & Cronin

[Koll & Cronin](#) (2018) zeigen, dass für typische terrestrische Temperaturen die Größe der gesamten ausgehenden langwelligen Strahlung (OLR) eine lineare Funktion der Temperatur ist. Dies steht im Einklang mit dem Newton'schen [Gesetz](#) der Abkühlung.

Der größte Teil der in den Weltraum entweichenden Energie stammt aus Wasserdampf-Emissionen, die Emissionen anderer Treibhausgase sind unbedeutend. Koll und Cronin analysieren ihre Daten sehr umständlich, um Wasserdampf weiterhin als „Rückkopplung“ zum CO_2 zu bezeichnen, aber ihre Daten zeigen, dass der Wasserdampf die Hauptrolle spielt und die anderen Treibhausgase nur einen geringen Einfluss auf die Abkühlungsrate der Erde haben. Alle Treibhausgase können die von der Oberfläche abgestrahlte Energie absorbieren, aber fast die gesamte Energie (außer in den Wüsten und an den Polen im Winter) wird von Wasserdampf absorbiert. In der Troposphäre gibt es viel mehr Wasserdampfmoleküle als

Moleküle der anderen Treibhausgase, so dass Wasserdampf fast die gesamte Strahlung sowohl absorbiert als auch abgibt. Dieses Prinzip wird als [Äquipartition](#) bezeichnet.

In einer strahlenden Welt könnte man annehmen, dass die OLR mit der [Stefan-Boltzmann-Gleichung](#) (σT^4) übereinstimmt, doch die Daten von Koll und Cronin zeigen, dass dies nicht der Fall ist, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Das Newton'sche Gesetz der Abkühlung sagt voraus, dass die Oberflächentemperatur in einer konvektiven Atmosphäre linear mit der OLR ist. Die einzige Bedingung ist, dass sich die Eigenschaften des Fluids nicht wesentlich ändern dürfen. Für die durch Wärmestrahlung übertragene Wärme sollte die rote Kurve in Abbildung 1 gelten.

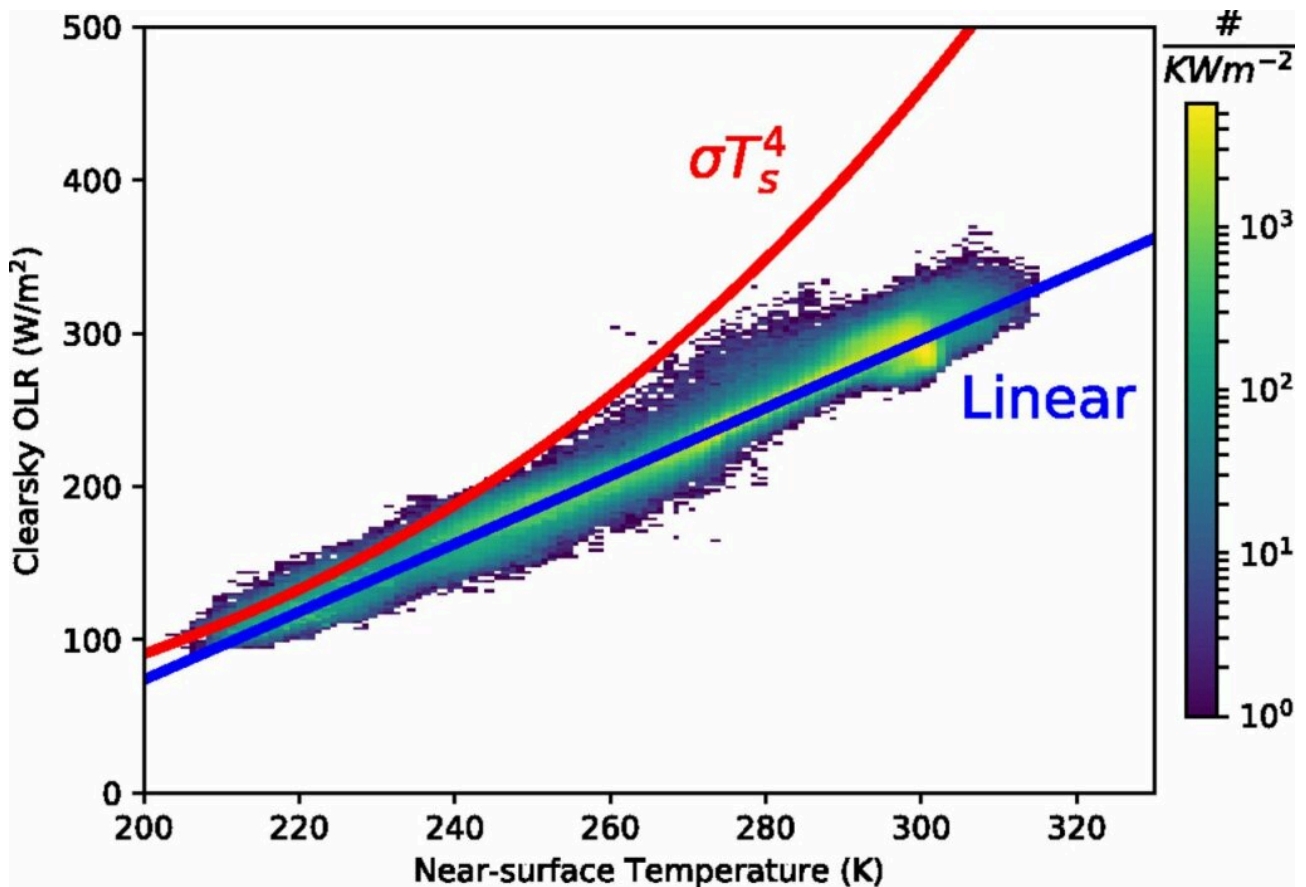


Abbildung 2. Vergleich der Stefan-Boltzmann-Gleichung mit gemessenen Emissionen der Erde als Funktion der Oberflächentemperatur. Bei den aufgezeichneten Daten handelt es sich um die monatlichen Mittelwerte der OLR bei klarem Himmel von den CERES-Satelliten (EBAF, V. 4). Die Oberflächentemperatur stammt aus der NCEP-Reanalyse 4. Die Farben stellen die Anzahl der Punkte dar. Das R^2 der linearen Anpassung der kleinsten Quadrate an die Daten beträgt 0,97. Quelle: (Koll & Cronin, 2018).

[Shula & Ott](#) schlagen vor, dass die von der Oberfläche emittierte Strahlung und die von einem Satelliten beobachtete Strahlung durch die Umwandlung von Oberflächenstrahlung in fühlbare Wärme durch

Treibhausgase in Oberflächennähe, die die Konvektion antreiben, voneinander entkoppelt werden. Durch die Konvektion wird Wärmeenergie nach oben transportiert, und in der kritischen Region zwischen etwa 2 und 7 km werden spontane Strahlungsemissionen, hauptsächlich von Wasserdampf, in den Weltraum abgestrahlt. Es ist nicht verwunderlich, dass die bereits erwähnte „Emissionsschicht“ bei 5 km, die aus den OLR-Beobachtungen der Satelliten abgeleitet wurde, mit einer Temperatur von etwa 255 K (-17,5 °C) in der Mitte dieser Region liegt. Zwischen 2 und 7 km kondensiert oder gefriert aufsteigender Wasserdampf aus der Luft, wobei seine latente Wärme freigesetzt wird, und bildet Wolken. Die zusätzliche Wärme regt andere Wassermoleküle (und einige andere kleinere Treibhausgase) an und veranlasst sie, Strahlung abzugeben, von der ein großer Teil ins All gelangt. Hermann Harde hat die Wasserdampfemissionen aus 12,5 km Höhe modelliert; Abbildung 3 zeigt das Spektrum seines Modells (Harde 2013):

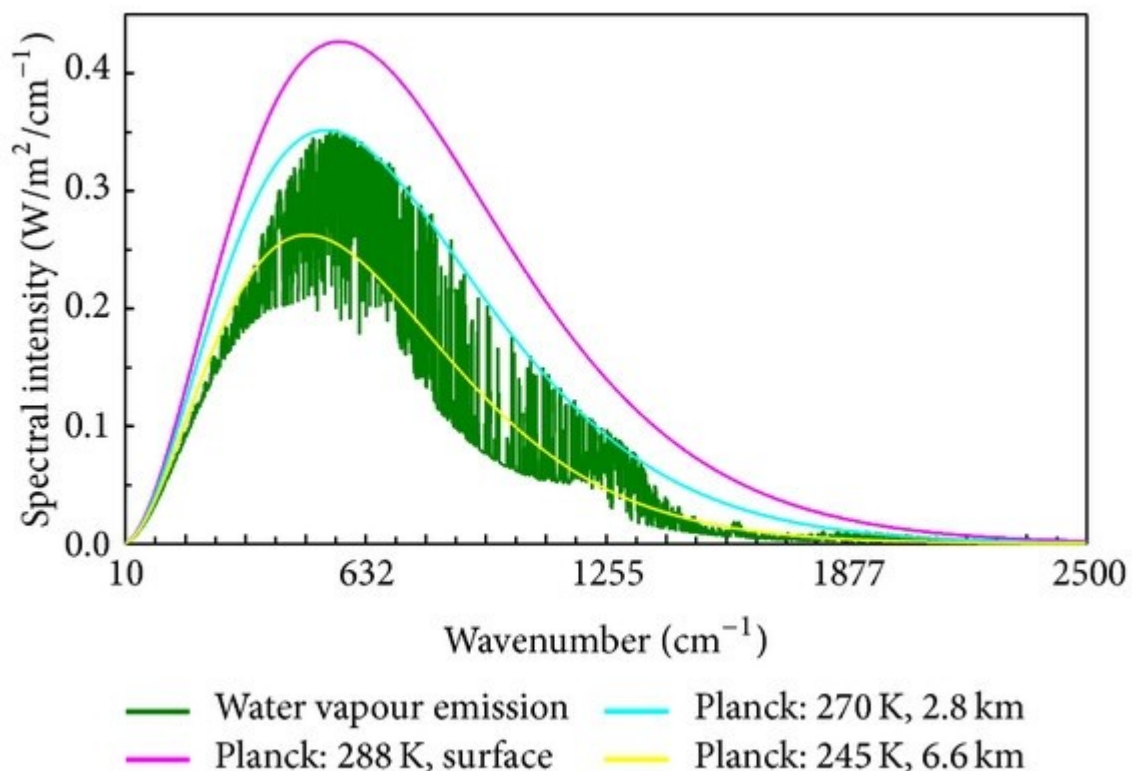


Abbildung 3. Die modellierten Wasserdampfemissionen sind in grün dargestellt. Die Begrenzungskurven sind die Planck-Temperaturen von 270 K (hellblau) und 245 K in gelb. Diese entsprechen ungefähr den Höhen von 2,8 km und 6,6 km gemäß der Internationalen [Standardatmosphärentabelle](#). Quelle: [Harde](#), 2013.

Wasserdampf dominiert die atmosphärischen OLR-Emissionen, da er fast das gesamte IR-Spektrum abstrahlen kann. Wasserdampf lässt sich auch leichter zur Abgabe von Strahlung anregen als andere

Treibhausgasmoleküle (Harde, 2013).

Diskussion

Die meisten Beschreibungen des strahlenden Treibhauseffekts sind eindimensional und stützen sich auf durchschnittliche Temperaturprofile und Sonneneinstrahlung. Um diese eindimensionalen Modelle in einem dreidimensionalen globalen Klimamodell verwenden zu können, berufen sich die Modellierer auf ein hypothetisches lokales Strahlungsgleichgewicht. Das lokale thermodynamische Gleichgewicht (LTE) ist eine mathematische Abstraktion und ein Werkzeug, das in Klimamodellen verwendet wird. Es bedeutet, dass sich innerhalb eines „Luftpakets“ beliebiger Größe alle Moleküle im thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Die Luftpakete befinden sich jedoch nicht im thermodynamischen Gleichgewicht miteinander. Luftpakete bewegen Wärme und Masse untereinander, aber nicht im Inneren. Die Größe und Definition eines Pakets wird vom Computermodellierer festgelegt und ist normalerweise zu groß, um realistisch zu sein. Es liegt auf der Hand, dass sich die Atmosphäre in großen Gebieten nahe der Oberfläche nie im Gleichgewicht befindet und die Konvektion andauert. Wenn ein Paket groß genug ist, um einen Tornado zu enthalten, befindet es sich offensichtlich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht.

In modernen allgemeinen Klimamodellen (GCMs oder ESMs, kurz für Earth System Models in AR6) sind die [Zellen](#) im Modell („Luftpakete“) ein Grad Breitengrad mal ein Grad Längengrad oder mehr als 10.000 Quadratkilometer am Äquator. Diese Zellen können leicht ein großes Gewitter mit mehreren Tornados enthalten. Selbst regionale Modelle mit höherer Auflösung sind nicht besser als 100 km² ([AR6](#), WGI, Seite 1140). Zum Vergleich: Der durchschnittliche [Durchmesser](#) eines Gewitters beträgt 24 km, das ist eine Fläche von etwa 450 km².

Die Erde als Ganzes ist ein dynamisches System mit tages- und jahreszeitlichen Zyklen und befindet sich nie im Gleichgewicht. Die Energiezufuhr und -abgabe durch Strahlung ist auf der Erdoberfläche niemals gleich oder im Gleichgewicht, außer in sehr kleinen Mengen über sehr kurze Zeiträume. Das gesamte Konzept des Treibhauseffekts geht davon aus, dass sich Energiezufuhr und Energieabfuhr auf dem gesamten Planeten in etwa die Waage halten (Manabe und Wetherald, 1967), und alles, was übrig bleibt, das „Energieungleichgewicht“, ist das, was den Planeten im Durchschnitt erwärmt oder abkühlt (Trenberth, et al. 2014).

Falls der Planet einen konstanten Input hätte und die Strahlungswärmeübertragung der eigentliche Kühlmechanismus wäre, könnte dies zutreffen. In diesem Szenario würde eine Störung des Modells durch Erhöhung der CO₂-Konzentration, um einen „Strahlungsantrieb“ zu erzeugen, zu einer anderen Gleichgewichtstemperatur führen. In Wirklichkeit findet die Strahlungswärmeübertragung nur am oberen und unteren Rand der Atmosphäre statt, also zwischen den Konvektionsregeln, und die Konvektion ist sehr komplex mit einer Vielzahl von sich ständig

ändernden Wärmespeichern, genauer gesagt von thermischer Energie, verbunden. Standard-Strahlungsmodelle verwenden vereinfachende Annahmen, um die durch Konvektion verursachten durchschnittlichen Änderungen in der vertikalen Temperaturverteilung zu berücksichtigen. Mit diesen Annahmen lassen sich zwar vernünftige eindimensionale Modelle erstellen, aber sie funktionieren nicht in unserer dreidimensionalen, rotierenden realen Welt. In der Realität ändern sich das vertikale Temperaturprofil und die Konvektionsrate ständig und von Ort zu Ort.

Konvektion ist nicht nur ein Zug, der überall mit gleichbleibender Geschwindigkeit Wärme von der Oberfläche zur TOA transportiert. Ihr Verlauf und ihre Effizienz ändern sich ständig, was zu unserem Wetter führt. Außerdem verfügt sie über eine sehr leistungsfähige Energiespeicherzelle am Boden, den Weltozean. Wenn sich die Zirkulation ändert, ändert sich auch die Menge der im Ozean gespeicherten Energie. Die Menge ist für den Ozean mit seiner immensen Wärmekapazität unbedeutend, so dass sich seine Temperatur normalerweise nicht wesentlich ändert, außer in der flachen [Mischschicht](#). Wenn sich jedoch die atmosphärische und ozeanische Zirkulation ändert und mehr oder weniger effizient wird, ändert sich die Temperatur der Atmosphäre aufgrund ihrer geringeren Wärmekapazität und Dichte drastisch. Alle scheinen die beträchtliche Wärmespeicherung im Klimasystem und den Faktor der Speicherzeit zu ignorieren. Die [Verweilzeit](#) der Energie macht einen Unterschied, und sie ändert sich mit der Zeit. Die Erdoberfläche enthält [mehr Wärme](#) (auch thermische Energie genannt) als die Oberfläche der Venus, dennoch beträgt die Oberflächentemperatur auf der Venus 464 °C, da es auf der Venus weder Wasser noch Ozeane gibt.

Wie sich die Energiespeicherung im Klimasystem auswirkt, lässt sich an langfristigen Temperaturaufzeichnungen ablesen, z. B. an der von [Petit et al.](#) erstellten Vostok-Aufzeichnung. In Abbildung 4 ist zu sehen, dass der Eintritt in eine warme Zwischeneiszeit sehr schnell erfolgt, da diese durch eine erhöhte Sonneneinstrahlung auf die kritischen nördlichen Kontinente verursacht wird. Der Abstieg in die nächste Eiszeit ist jedoch sehr langsam, da die Ableitung der in den Ozeanen gespeicherten Wärme ein sehr langsamer Prozess ist. All dies muss in die Klimamodelle einfließen, damit sie mehr Sinn ergeben. Auf kürzeren Zeitskalen lassen sich die Auswirkungen der sich verändernden Ozeanspeicherung auf unser Klima am ENSO-Zyklus (siehe Abbildung 2.4 [hier](#)), an der Atlantischen Multidekadischen Oszillation (AMO, siehe Abbildung 6 [hier](#)) und an der Pazifischen Dekadischen Oszillation (PDO, siehe Abbildung 4.8 [hier](#)) ablesen. Siehe auch die Diskussion über die AMO und die globale durchschnittliche Temperatur um Abbildung 2 von [May & Crok](#) 2024.

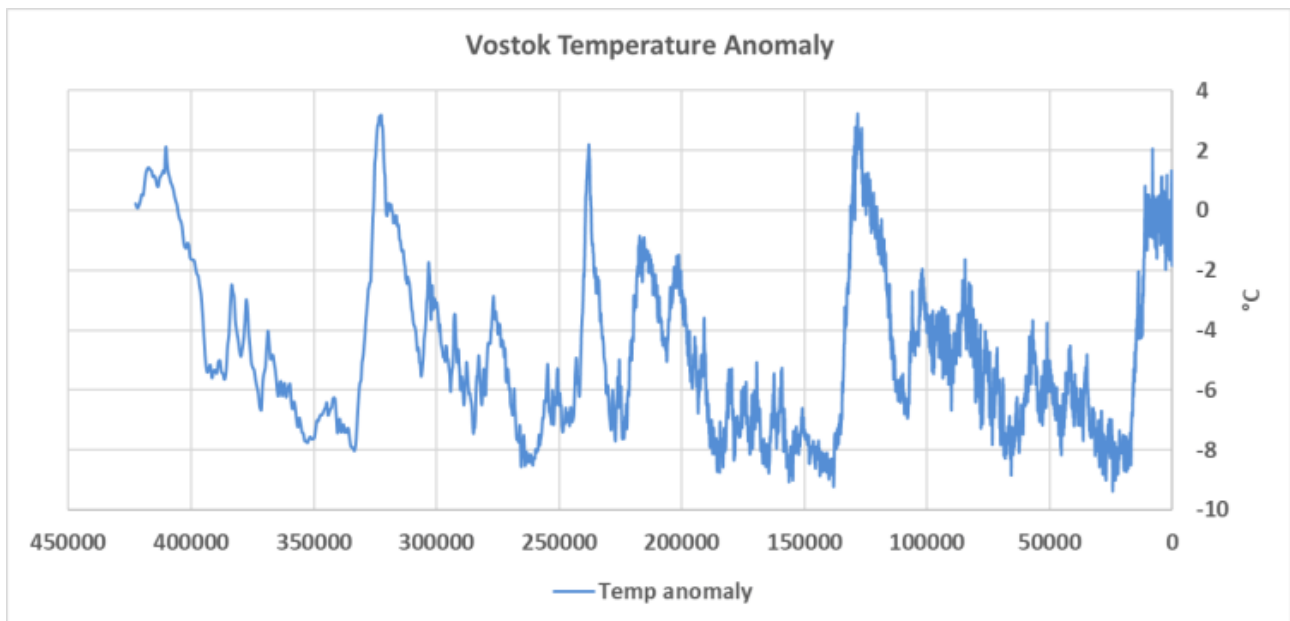


Abbildung 4. Vostok-Eiskern-Temperaturaufzeichnung für die letzten 400.000 Jahre. Quelle: (Petit, et al., 1999).

Strahlungsmodelle ermöglichen sehr realistische Rekonstruktionen der von Satelliten gemessenen Intensität der ausgehenden Strahlung, wie man bei van Wijngaarden und Happer sehen kann, die damit eine hervorragende Arbeit geleistet haben. Es stimmt auch, dass die (von Satelliten gemessene) OLR ungefähr der Temperatur [folgt](#). Ein richtig konstruiertes Strahlungsmodell kann also einige Beobachtungen reproduzieren. Die Instrumente auf den Satelliten messen jedoch die Strahlungsintensität in einer bestimmten Richtung und nicht den tatsächlichen Nettostrahlungsfluss oder die wahre Richtung des Flusses. Wie von Michael Mishchenko und früher von Max Planck erläutert, haben Strahlungsemissionen keine Richtungsabhängigkeit, sie bewegen sich unabhängig in alle Richtungen. Sie sind [keine](#) Ansammlung von „lokalisierten punktförmigen Lichtteilchen“. Es ist also ungewiss, wie nützlich Satellitenmessungen bei der Bestimmung des Energieungleichgewichts auf der Erde sind. Die Realität ist komplexer, als wir sie heute erklären können, und wir haben noch nicht einmal die Auswirkungen von [Schwankungen](#) der Bewölkung berücksichtigt (van Wijngaarden & Happer, 2025)!

Ein großer Teil dieses Beitrags ist das Ergebnis von Gesprächen mit Markus Ott.

Tom Shula is interviewed by Tom Nelson on this topic [here](#).

Tom and Markus' slides can be downloaded [here](#).

Tom and Markus' paper can be downloaded [here](#).

Markus Ott has done two interviews with Tom Nelson explaining their model, one on the [2nd Law of thermodynamics and the GHE](#) and another on

[Back Radiation](#). These provide more details than we could put in this summary.

A bibliography for this post can be downloaded [here](#).

Link: <https://andymaypetrophysicist.com/2025/02/01/energy-and-matter/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE

Anmerkung des Übersetzers: In diesem Beitrag geht es um Strahlung. Da dies nicht mein Fachgebiet ist, kann ich für die sachliche Richtigkeit an manchen Stellen nicht garantieren.