

Der Treibhauseffekt: Eine Zusammenfassung von Wijngaarden und Happer

geschrieben von Chris Frey | 26. September 2021

Andy May

Der Begriff „Treibhauseffekt“, oft abgekürzt als „GHE“, ist sehr zweideutig. Er bezieht sich auf die Oberflächentemperatur der Erde und wurde nie beobachtet oder gemessen, sondern nur modelliert. Erschwerend kommt hinzu, dass es zahlreiche mögliche Komponenten gibt und die relativen Beiträge der möglichen Komponenten unbekannt sind. Grundlegende physikalische Überlegungen legen nahe, dass die Erdoberfläche wärmer ist, als sie es bei einer transparenten Atmosphäre wäre, d. h. ohne Treibhausgase, Wolken oder Ozeane. Wenn wir davon ausgehen, dass die Erde ein Schwarzer Körper ist, und dann die reflektierte Sonnenenergie von den hypothetisch nicht vorhandenen Wolken, der Atmosphäre, dem Land, dem Eis und den Ozeanen abziehen, können wir eine Oberflächentemperatur von 254 K oder -19°C berechnen. Die tatsächliche Durchschnittstemperatur liegt heute bei 288,7 K oder etwa $15,5^{\circ}\text{C}$. Diese modellierte Differenz von 35°C wird oft als allgemeiner Treibhauseffekt bezeichnet.

Ein Schwarzer Körper wird in der Regel als ein vollkommen schwarzer Hohlraum definiert, der auf einer konstanten Temperatur gehalten wird. Die gesamte Energie, die in den Hohlraum eindringt, wird von den Wänden des Hohlraums absorbiert, und sie geben genau die gleiche Energiemenge ab, aber die Wellenlänge der emittierten Strahlung ist nicht die gleiche wie die eingefangene Energie. Stattdessen hat die emittierte Strahlung eine Wellenlänge, die durch die konstant gehaltene Temperatur des Hohlraums bestimmt wird. Bei der Erde ist das nicht der Fall. Sie ist nicht schwarz, und sowohl die Atmosphäre als auch die Ozeane absorbieren die Sonnenenergie und verteilen sie um, wobei die absorbierte Energie oft lange Zeit, sogar Jahrhunderte oder Jahrtausende, zirkuliert, bevor sie wieder abgestrahlt wird. Ein Schwarzer Körper absorbiert und emittiert Energie mit einer Verzögerung von weniger als einer Sekunde. Die Oberflächentemperatur der Erde ist nicht konstant, wie die Temperatur eines Schwarzen Körpers, sondern schwankt stark je nach Breitengrad, Höhe, Jahreszeit und/oder Meerestiefe. Der Mond hat eine berechnete Schwarzkörpertemperatur von 270 K, keine Atmosphäre oder Ozeane und eine Durchschnittstemperatur am Äquator und in den mittleren Breiten von etwa [236 K](#), so dass selbst der Mond kein idealer Schwarzkörper ist.

Ein unbekannter Teil des gesamten GHE ist wahrscheinlich auf atmosphärische Treibhausgase (THG) zurückzuführen. Dazu gehören CO_2 , H_2O ,

CH₄, N₂O und O₃. Dr. William Wijngaarden und Dr. Will Happer untersuchen den wahrscheinlichen Einfluss dieser Treibhausgase anhand der [HITRAN-Datenbank](#) für molekulare Transmission und Absorption, die an der Harvard University unterhalten wird (Wijngaarden & Happer, 2020). Wir besprechen die wichtige [Arbeit](#) von Wijngaarden und Happer in diesem Beitrag und bezeichnen sie als W&H. HITRAN steht für high-resolution transmission molecular absorption. Die Datenbank stellt spektroskopische Parameter zusammen, die Computerprogrammierer verwenden können, um die Transmission und Emission von Licht in der Atmosphäre zu modellieren. W&H verwenden die Datenbank zur Modellierung eines hypothetischen Temperatur- und Treibhausgasprofils in den mittleren Breitengraden, um eine repräsentative Klimaempfindlichkeit für eine Verdopplung der Gase abzuleiten. Wir haben bereits über den GHE [geschrieben](#) und werden in diesem Beitrag, der sich hauptsächlich mit dem W&H-Modell befasst, nicht dasselbe Thema behandeln.

Dr. Clive Best untersuchte ebenfalls die HITRAN-Datenbank, allerdings nur für CO₂ (Best, 2013). Best untersuchte auch die Auswirkung der Schwerkraft oder des Luftdrucks auf die Oberflächentemperatur der Erde und kam zu dem Schluss, dass sie etwas zum gesamten Treibhauseffekt beitragen müssen, war aber nicht in der Lage, den Betrag zu modellieren. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik erreicht eine thermisch isolierte Atmosphäre über ihre gesamte Höhe eine konstante Temperatur, wenn die Entropie konstant bleibt. Die Schwerkraft bündelt jedoch die Luftmoleküle in der Nähe der Oberfläche und verringert ihre Entropie, wodurch die Temperatur steigt. Wenn die Temperatur steigt, nehmen die Strahlungsemissionen der Treibhausgase zu, was die Entropie erhöht. Der Gesamtanteil der Erwärmung der Erdoberfläche aufgrund von Treibhausgasen und der durch die Schwerkraft verursachten Erwärmung bleibt [unbekannt](#).

Was die Erwärmung der letzten 120 Jahre betrifft, so hat sich die Schwerkraft nicht verändert. Allerdings hat das der Atmosphäre zugeführte CO₂ den Oberflächendruck leicht erhöht, da CO₂ 50% dichter als trockene Luft ist. Messungen deuten darauf hin, dass der gesamte Wasserdampf in der Atmosphäre leicht abgenommen hat, aber diese Messungen sind aufgrund der Qualität der verwendeten Instrumente [umstritten](#). Wasserdampf hat eine um 40 % geringere Dichte als trockene Luft, so dass nicht bekannt ist, inwieweit sich der Luftdruck an der Oberfläche aufgrund der Unterschiede zwischen diesen beiden wichtigen Molekülen verändert hat.

In diesem Beitrag werden wir die Auswirkungen der Schwerkraft und des Luftdrucks an der Oberfläche ignorieren, obwohl die Schwerkraft die Sonne veranlasst, Wasserstoff zu Helium zu fusionieren und das Sonnenlicht auszusenden, das unseren Planeten erwärmt. Der Versuch, herauszufinden, wie viel die Schwerkraft zum gesamten GHE und zur jüngsten Erwärmung beiträgt, bereitet mir nur Kopfschmerzen und führt zu wütenden Diskussionen in den Kommentaren. Der Grund für die heftigen Diskussionen und meine Kopfschmerzen ist, dass es sich um ein kompliziertes thermodynamisches Argument handelt und niemand die

Thermodynamik wirklich [verstehen](#). Also erkennen wir einfach an, dass es eine gewisse Auswirkung auf die Gesamt-GHE haben [muss](#), und lassen es dabei bewenden.

Da die Erdatmosphäre für den größten Teil der Sonnenstrahlung durchlässig ist und die Erdoberfläche undurchsichtig ist, absorbiert die Oberfläche doppelt so viel Strahlung wie die Atmosphäre. Nach den Gesetzen der Thermodynamik muss ein Planet so viel Strahlung aussenden, wie er empfängt. Die Temperatur der Erde bestimmt die Art der Strahlung, die sie abgibt, und sie strahlt hauptsächlich im thermischen Infrarot. Der Bereich der abgestrahlten Frequenzen ist in Abbildung 1 als Wellenzahl mit der Einheit $1/\text{cm}$ dargestellt:

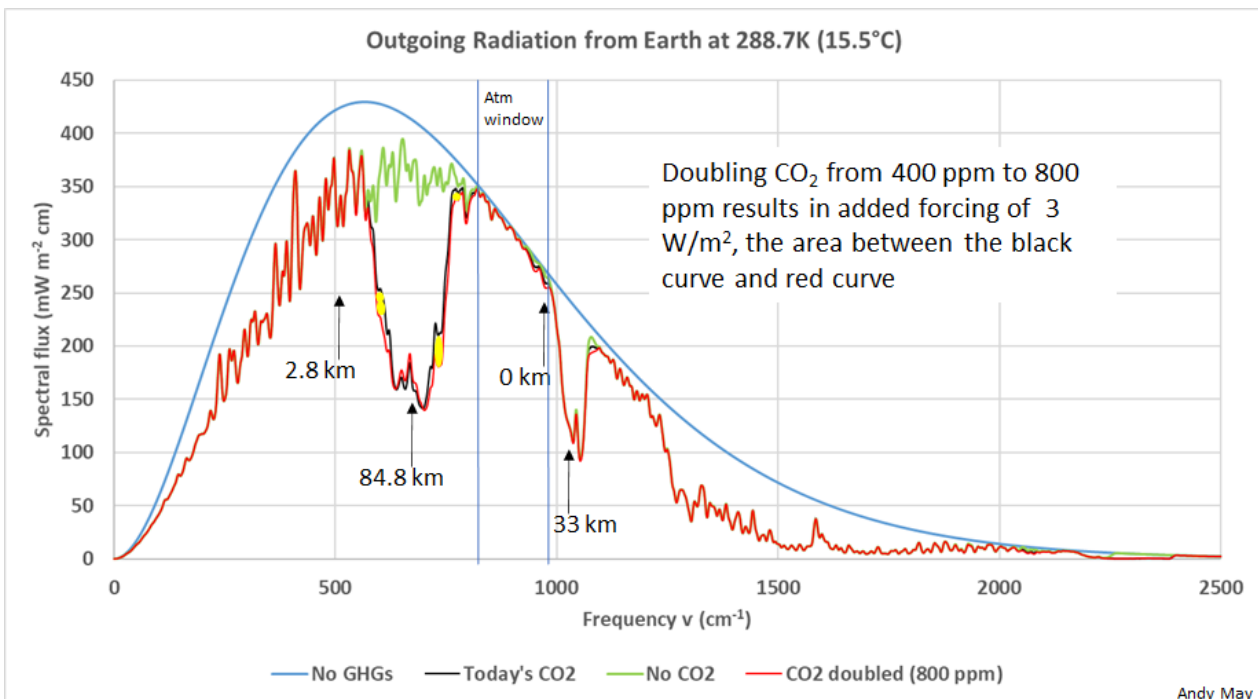


Abbildung 1: Das berechnete Spektrum der von der Erde ausgehenden Strahlungsflüsse bei einer Temperatur von 288,7 K. Die roten, grünen und schwarzen Kurven zeigen die emittierte Strahlung, die durch CO_2 (in verschiedenen Konzentrationen) und H_2O , O_3 , CH_4 und N_2O , die wichtigsten Treibhausgase, in ihren derzeitigen Konzentrationen verändert wird. Die blaue Kurve ist der Fluss ohne Treibhausgase in der Atmosphäre. Die schwarze Kurve stellt den Fluss mit 400 ppm CO_2 dar, der heutigen Konzentration. Die grüne Kurve zeigt den Fluss ohne CO_2 , und die rote Kurve zeigt den Fluss bei verdoppelter CO_2 -Konzentration (800 ppm). Die x-Achse ist die Frequenz in Wellenzahl-Einheiten und der Fluss ist in $(\text{mW cm})/\text{m}^2$ angegeben. Der durch die CO_2 -Verdopplung verursachte zusätzliche Antrieb ist die integrierte Fläche des Abstands zwischen der schwarzen und der roten Linie, wobei die größten Unterschiede gelb hervorgehoben sind. Der Rest der Abbildung wird im Text erläutert. Die verwendeten Daten stammen von HITRAN und die Abbildung ist Abbildung 4 in [Wijngaarden & Happer, 2020](#) sehr ähnlich.

Sowohl die Frequenz als auch die von den Molekülen abgestrahlte Leistung werden durch die Temperatur des Moleküls bestimmt. Wenn die Atmosphäre

in Abbildung 1 transparent ist und keine infrarot-absorbierenden Moleküle wie CO₂ enthält, würde das Emissionsspektrum bei 288,7 K wie die blaue Kurve aussehen. Die y-Achse in Abbildung 1 ist der spektrale Fluss oder die Energiemenge, die pro Frequenzeinheit durch den oberen Teil der Atmosphäre hindurchgeht; in diesem Fall wird die Frequenz als Wellenzahl oder die Anzahl der Wellen pro cm ausgedrückt. Mathematisch gesehen ist ν (Frequenz) der Kehrwert der Wellenlänge.

Eine vollkommen transparente Atmosphäre würde die gesamte von der Oberfläche abgestrahlte Energie entsprechend der blauen Linie in Abbildung 1 abstrahlen. Alle aufgezeichneten Kurven überlagern sich im atmosphärischen Fenster („Atm-Fenster“) von 824 bis 975 cm⁻¹. In diesem Fenster kann die Oberflächenstrahlung direkt in den Weltraum gelangen, daher ist es mit 0 km gekennzeichnet. Das bedeutet, dass die (aus dem spektralen Fluss ermittelte) Emissionstemperatur die modellierte Oberflächentemperatur von 288,7 K oder 15,5 °C widerspiegelt. Andere Beispiele für Abweichungen von der idealen blauen Planck-Helligkeitskurve sind mit der ungefähren Höhe der Emissionen, basierend auf ihrer Helligkeitstemperatur, gekennzeichnet. An diesen Orten kann die Atmosphäre unterhalb dieser Höhen aufgrund der Kombination der modellierten Treibhausgase als undurchlässig für die Oberflächenstrahlung angesehen werden.

Die grüne Kurve ist das berechnete Spektrum bei Anwesenheit aller Treibhausgase in ihren derzeitigen Konzentrationen, mit Ausnahme von CO₂. Die schwarze und die rote Linie sind die berechneten Energieströme für CO₂-Konzentrationen von 400 ppm bzw. 800 ppm. Die Flächendifferenz zwischen der grünen Linie und der schwarzen Linie ist repräsentativ für die CO₂-bedingte Erwärmung von Null CO₂ bis zur heutigen Konzentration von 400 ppm. Der Flächenunterschied zwischen 400 und 800 ppm ist viel kleiner und führt zu einer viel geringeren Erwärmung.

Die markierte Höhe von 84,8 km in der Mitte der CO₂-bedingten Einkerbung in der Energiekurve bedeutet, dass die Emissionen in diesem Frequenzbereich, etwa 609 bis 800 cm⁻¹, aus dieser Höhe stammen. Unterhalb dieser Höhe blockiert CO₂ die Strahlung bei diesen Frequenzen. In diesem kritischen CO₂-Bereich des Spektrums ist das CO₂ gesättigt und kann keine Strahlung mehr blockieren. 84,8 km ist fast der höchste Punkt der Atmosphäre, sehr hoch in der Mesosphäre.

Wenn sich die CO₂-Konzentration im Vergleich zu heute verdoppelt, steigt das Niveau der Strahlungsemission in der Troposphäre nach oben. Auf dem Weg nach oben sinkt die Emissionstemperatur, so dass die Menge der emittierten Energie abnimmt. Da die in den Weltraum abgestrahlte Energie geringer ist, muss sich die Erdoberfläche erwärmen.

In höheren Lagen, in der mittleren Stratosphäre, beginnt die Temperatur jedoch mit der Höhe zu steigen. Die Erwärmung ist auf eine Zunahme des Ozons (O₃) zurückzuführen, wie die gestrichelte rote Linie in der rechten Grafik von Abbildung 2 zeigt. Das bedeutet, dass mit zunehmender Höhe

der Emission mehr Energie ausgestrahlt wird. Dies führt zu einer Abkühlung, und wir sehen diesen Effekt am unteren Ende der CO₂-Kerbe in Abbildung 1. Die rote und die schwarze Kurve kehren ihre Positionen um, und das Hinzufügen von CO₂ bewirkt eine Abkühlung. Der Grund dafür ist in Abbildung 2 dargestellt:

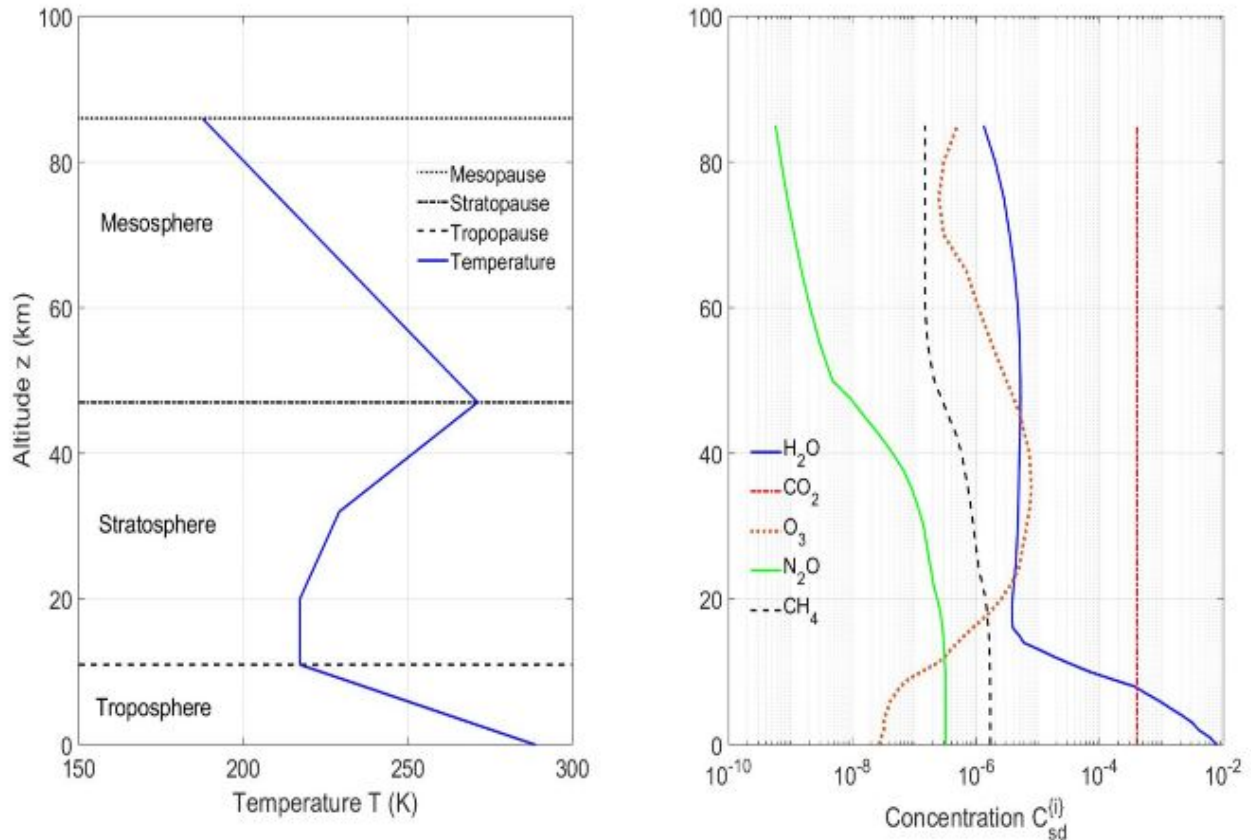


Abbildung 2: Die von W&H in ihrem Emissionsmodell verwendeten Profile der atmosphärischen Temperatur und der Treibhausgaskonzentration. CO₂ ist ein sehr stabiles Molekül und liegt in allen Höhenlagen in etwa der gleichen Konzentration vor, während die Konzentration der anderen Treibhausgase mit der Höhe variiert. Quelle: (Wijngaarden & Happer, 2020).

Die linke Grafik in Abbildung 2 zeigt das für das W&H-Modell verwendete atmosphärische Temperaturprofil. In der realen Welt variiert das Temperaturprofil stark von Ort zu Ort und mit der Zeit, insbesondere in der Troposphäre, aber W&H verwenden für ihr Modell einen einzigen Satz von Werten, die für die „Standardatmosphäre“ in den mittleren Breiten repräsentativ sind.

Oberhalb der Tropopause gibt es nur sehr wenig H₂O, und auch N₂O und CH₄, die in der Troposphäre bereits zu den kleineren Treibhausgasen gehören, nehmen ab. In der Stratosphäre dominiert die Erwärmung durch Ozon (O₃) und die Temperatur steigt an, bis die Mesosphäre erreicht wird, wo Ozon rasch abnimmt und die Abkühlung durch CO₂ zu dominieren beginnt. Am oberen Ende der Mesosphäre, in etwa 86 km Höhe, sind die Änderungen des

Energieflusses vernachlässigbar, weshalb W&H diesen Bereich als den oberen Rand der Atmosphäre oder TOA bezeichnen.

Oberhalb der Tropopause ist die Konvektion minimal, aber in der Troposphäre ist sie das wichtigste Mittel zur Wärmeübertragung. Wie Abbildung 1 zeigt, ist die untere Troposphäre (unterhalb von 2,8 km) mit Ausnahme des atmosphärischen Fensters für die langwellige (Infrarot-)Strahlung der Erde undurchlässig. Durch die Verdunstung von Wasser wird der größte Teil der von der Oberfläche abgegebenen Wärmeenergie als latente Wärme in höhere Lagen transportiert, wo sie von der Erde weggestrahlt werden kann. Die von kondensierendem Wasserdampf freigesetzte Wärmeenergie beginnt an der Basis von tiefliegenden Wolken und setzt sich in der gesamten Wolke fort. Wolken sind ein sehr wichtiger Bestandteil des Kühlsystems der Erde, können aber nicht modelliert werden, so dass sie im W&H-Modell nicht berücksichtigt werden. Sie sind Teil der allgemeinen Zirkulationsmodelle (GCMs) des IPCC, aber das IPCC geht von den Wolkenparametern und -auswirkungen aus und kann sie nicht berechnen. Der IPCC-Bericht AR6 räumt ein, dass „Wolken weiterhin den größten Beitrag zur Gesamtunsicherheit der Klimarückkopplungen leisten (hohes Vertrauen).“ (IPCC, 2021, S. TS-59). Wir teilen das hohe Vertrauen, dass Wolken die größte Unsicherheitsquelle bei der Berechnung der Auswirkungen des Menschen auf den Klimawandel sind.

Das W&H-Emissionsmodell ist ein Modell für den wolkenlosen Himmel und nur über den Wolken und in wolkenarmen Gebieten, wie den Polen und über Wüsten, genau. Ohne Wolken versuchen W&H, die Rückkopplung von Treibhausgasemissionen zu berücksichtigen. Sie untersuchten drei Fälle: eine feste relative Luftfeuchtigkeit mit einer konstanten troposphärischen Stauungsrate, eine feste relative Luftfeuchtigkeit mit einer variablen Stauungsrate und eine feste absolute Luftfeuchtigkeit. Die sich daraus ergebenden Klimasensitivitätswerte sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Results	Climate Sensitivity °C/2xCO ₂
Fixed absolute humidity	1.4
Fixed relative humidity, Lapse rate = 6.5 km ⁻¹	2.3
Fixed relative humidity, Lapse rate = variable	2.2

Tabelle 1. Die von W&H modellierten Klimasensitivitätswerte für drei Szenarien.

W&H verglichen auch ihre Emissionsberechnungen für drei spezifische Gebiete, die Saharawüste, den Mittelmeerraum und die Antarktis. Der Vergleich ist in Abbildung 3 dargestellt:

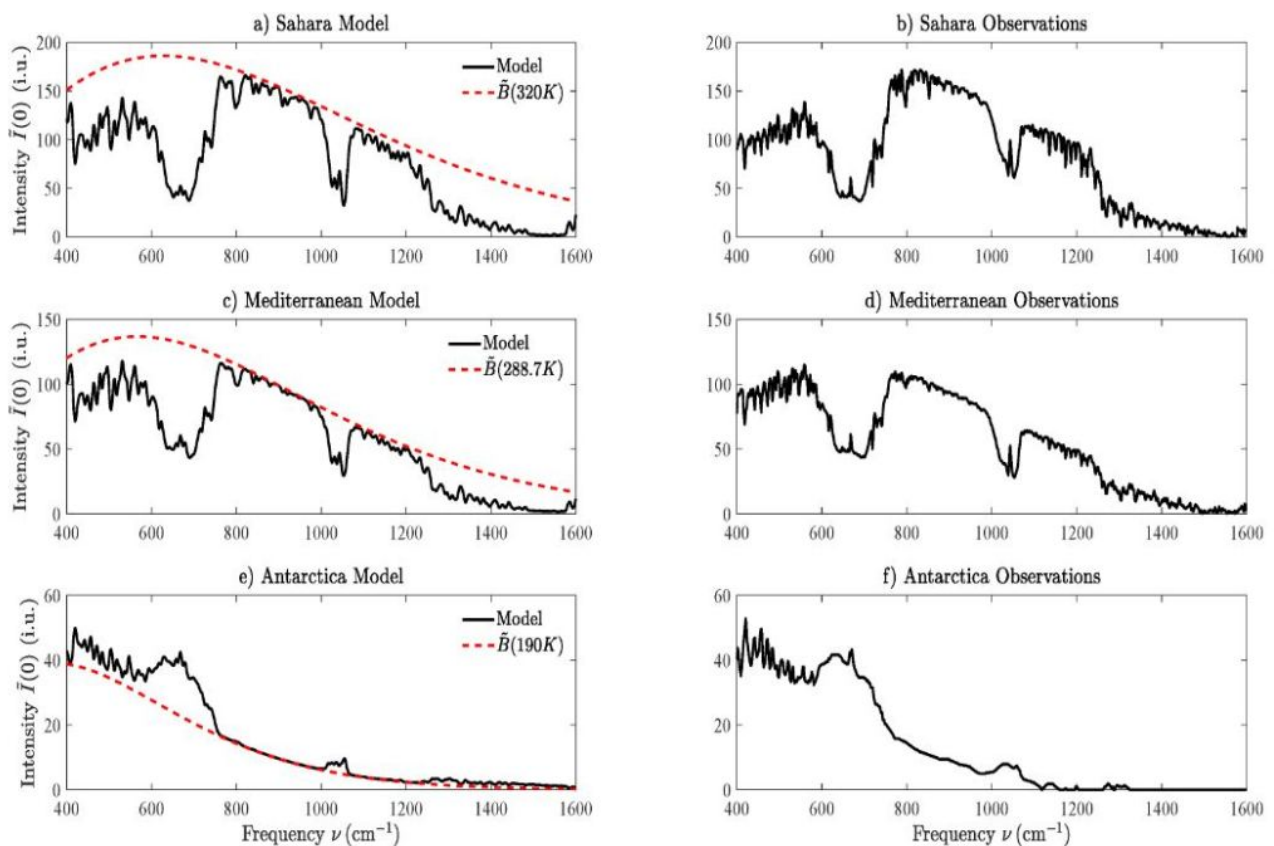


Abbildung 3. Die W&H-Modelle auf der linken Seite, verglichen mit den Satellitenmessungen auf der rechten Seite. Die modellierten Werte sind den Messungen sehr ähnlich. Quelle: (Wijngaarden & Happer, 2020).

Die in Abbildung 3 dargestellten Intensitätswerte unterscheiden sich von den in Abbildung 1 angegebenen Werten des spektralen Flusses um $1/\pi$. Die Werte des spektralen Flusses sind die Energie, die eine Elevation in alle Richtungen durchläuft, die Werte in Abbildung 3 beziehen sich auf die von einem Satelliten gemessene Helligkeit oder Intensität. Der Unterschied liegt nur in den Einheiten, beide messen die Emissionen der Erde. Die roten Planck-Helligkeitskurven in den linken Diagrammen sind charakteristische Oberflächentemperaturen für die angegebenen Orte: 320 K (47 °C) für die Sahara-Wüste, 288,7 K (15,5 °C) für das Mittelmeer und 190 K (-83 °C) für die Antarktis. Beachten Sie, dass die CO₂- und H₂O-Emissionstemperaturen in der Antarktis wärmer sind als die Oberflächentemperaturen im atmosphärischen Fenster, was bedeutet, dass die Luft über dem Boden wärmer ist als der Boden und dass die Treibhausgase die Luft kühlen und nicht erwärmen.

Summary and Conclusions

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass W&H uns ein detailliertes und genaues Emissionsmodell zur Verfügung gestellt haben, das nur eine mäßige Erwärmung (2,2 bis 2,3°C) zeigt, einschließlich der wahrscheinlichen Rückkopplung von Wasserdampf, aber ohne die Rückkopplung aufgrund von Veränderungen der Bewölkung. Sowohl das Ausmaß als auch das Vorzeichen der Netto-Wolkenrückkopplung zur Oberflächenerwärmung sind unbekannt [in deutscher Übersetzung beim EIKE [hier](#)]. Lindzen hat gezeigt, dass sie in den Tropen wahrscheinlich negativ (kühlend) ist, aber außerhalb der Tropen weiß das niemand.

Die Rückkopplung von Wasserdampf auf die Oberflächenerwärmung ist ebenfalls sehr unklar, wie Ferenc Miskolczi (2014) schreibt:

„Solange die Erde über einen unbegrenzten Wasservorrat (in den Ozeanen) mit seinen drei Phasen in der Atmosphäre und zwei Phasen auf der Erdoberfläche verfügt, wird die Stabilität des planetarischen Klimas durch die Gleichungen [siehe Papier, Seite 19] gesteuert. Diese beiden Gleichungen regeln zusammen mit der Clausius-Clapeyron-Gleichung den Transfer der latenten Wärme durch die Grenzschicht so, dass der Nettobetrag das planetarische Strahlungsgleichgewicht aufrechterhält.“ (Miskolczi, 2014).

Miskolczi und andere haben herausgefunden, dass der Gesamtwasserdampf in der Atmosphäre in den letzten 70 Jahren zurückgegangen ist, obwohl dies in Frage gestellt wird. Die Arbeit von W&M zu den Strahlungsemissionen deutet darauf hin, dass die künftige Erwärmung aufgrund von Treibhausgasen bescheiden sein wird. Spekulationen über die Rückkopplung der Erwärmung durch Wolken und Veränderungen des Gesamtwasserdampfes sind genau das: Spekulationen.

Die Ergebnisse der Studie sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

Greenhouse effect at 11 km and TOA (86 km)										
Molecule	Column Density x 10 ¹⁸	HITRAN lines used	Current Forcing (W/m ²) 11 km	Current Forcing (W/m ²) 86 km	Change if doubled (W/m ²) 11 km	Change if doubled (W/m ²) 86 km	Change if removed (W/m ²) 11 km	Change if removed (W/m ²) 86 km	Percent changed if doubled 11 km	Percent changed if doubled 86 km
CO ₂	46,700.0	20,569	52.4	38.9	5.5	3	-44.6	-30.2	4.0%	2.6%
H ₂ O	8,610.0	31,112	81.6	71.6	11.2	8.1	-72.6	-62.2	8.2%	6.9%
CH ₄	37.6	43,696	4.2	4.4	0.8	0.7	-2.1	-2.1	0.6%	0.6%
O ₃	9.2	210,295	6.1	10.5	2.5	2.5	-4.7	-8.1	1.8%	2.1%
N ₂ O	6.6	43,152	4.4	4.7	1.2	1.1	-2.2	-2.2	0.9%	0.9%
Combined			137	117						

Tabelle 2: Modellierter Parameter für jedes Treibhausgas in der W&H-Studie. Für jedes Treibhausgas sind die aktuellen Flüsse in 11 km und 86 km Höhe angegeben, dann die Werte, wenn sie verdoppelt und aus der Atmosphäre entfernt werden, und schließlich die prozentuale Änderung des Treibhauseffekts (W/m^2), wenn die aktuelle Konzentration verdoppelt wird. Nur CO_2 , H_2O und O_3 ändern sich bei einer Verdoppelung signifikant.

Tabelle 2 zeigt, dass die wichtigsten Treibhausgase CO_2 , H_2O und O_3 sind. Eine Verdopplung der Methan- oder N_2O -Konzentration verändert den ausgehenden Antrieb um weniger als ein Prozent. Aufgrund der Eigenschaften von Wasserdampf ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich seine atmosphärische Konzentration verdoppelt, aber selbst wenn dies der Fall wäre, würde dies den Antrieb in 11 km Höhe nur um acht Prozent erhöhen. Eine Verdopplung von CO_2 erhöht den Antrieb in 11 km Höhe nur um vier Prozent.

Die kombinierten aktuellen Werte für den 11-km- und 86-km-Antrieb in der Tabelle sind aufgrund von Überschneidungen nicht die Summe der Einzelwerte. Aus dieser Tabelle geht eindeutig hervor, dass alle Treibhausgase gesättigt sind und eine Erhöhung der derzeitigen Konzentrationen kaum einen Unterschied machen wird. Eine Verdopplung des CO_2 wird zu einer Abkühlung der Stratosphäre um etwa $10^\circ C$ führen, aber die Veränderungen der Oberflächentemperaturen in diesem Modell liegen alle unter $2,3^\circ C$, wie in Tabelle 1 gezeigt wird. Dies ist viel weniger als der vom IPCC AR6 bevorzugte Wert von $3^\circ C$ (IPCC, 2021, S. TS-57). In Anbetracht der Tatsache, dass der derzeitige Nettoeffekt der Wolken eine Abkühlung ist und es wahrscheinlich ist, dass der Gesamtwasserdampf in der Atmosphäre abnimmt oder gleich bleibt, deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass wir uns in Bezug auf steigende Treibhausgase wenig Sorgen machen müssen.

Link:

<https://andymaypetrophysicist.com/2021/09/20/the-greenhouse-effect-a-summary-of-wijngaarden-and-happer/>

Übersetzt von [Christian Freuer](#) für das EIKE