

Hans K. Hartmann, August 2020

Anmerkung: Der Autor ist sehr daran interessiert, Kommentare und Kritiken zu diesem Artikel zu erhalten, um möglicherweise dessen Inhalt noch zu verbessern. Entsprechende Zuschriften bitte an hhart49@t-online.de. Bitte bei Zustimmung diesen Artikel auch an Bekannte weiterleiten.

Eine neue Deutung des Treibhauseffekts und der globalen Erwärmung

Inhalt:

1. Einleitung
2. Fakten
3. Der Wirkungsmechanismus der Treibhausgase
4. Einfluss von Wolken sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Erdbodens
5. **Einfluss unterschiedlicher Wolkenbildung durch die unterschiedliche Erwärmung von Land und Meer**
6. **Möglicher Einfluss von Flugverkehr auf die Erdtemperatur**
7. Detailliertere Ergänzungen zum Verständnis des Treibhauseffekts
8. Weitere Kandidaten für die Ursache der Erderwärmung
9. Ein weiteres verwandtes Thema - Die Historie der Erdtemperaturen
10. Schlussfolgerungen
11. Anhang

1. Einleitung

Der Treibhauseffekt ist so real wie noch nie. Unbestreitbare Tatsache ist inzwischen leider, dass die mittlere globale Oberflächentemperatur der Erde alleine in den vergangenen 20 Jahren um knapp 0,5 °C angestiegen ist. Dieser Trend wird sich aufgrund der thermischen Trägheit der Meere definitiv noch sehr lange, mindestens einige Jahrzehnte fortsetzen, selbst wenn man es schaffen würde, wenigstens die CO₂-Emissionen in kürzester Zeit völlig zu unterbinden.

Es ist allerdings sehr wahrscheinlich, dass CO₂ bei der derzeitigen Temperaturerhöhung eine zwar immer noch enorm wichtige, aber bei weitem nicht mehr die allein verantwortliche Rolle spielt. Zu beachten sind hierbei zum Beispiel die Farbänderungen der Erde, hauptsächlich durch den Rückgang der Eis- und Schneebedeckungen im Winter. Ganz besonders hinweisen möchte ich jedoch auf zwei noch weitgehend unbekannte Effekte: Erstens den wahrscheinlichen Rückgang der Bewölkung über Land. Verursacht wird dieser Bewölkungsrückgang alleine durch das Ungleichgewicht in der Temperaturerhöhung zwischen Land und Meer, wodurch die Luft über Land im Mittel trockener wird und dadurch weniger kühlende Wolken bildet. Zweitens gab es bereits während des 2. Weltkriegs eine vorübergehende globale Erwärmung, ziemlich genau über dessen Dauer. Wohingegen in diesem Jahr (Stand Juli 2020) die Temperaturen bisher eher mäßig bis kühl ausgefallen sind, zumindest in Mitteleuropa (die entsprechenden Temperaturen in anderen Erdteilen sind mir nicht bekannt). Liegt dies vielleicht am derzeit fehlenden Flugverkehr aufgrund der Corona-Krise? Meiner Einschätzung nach sind diese beiden Faktoren inzwischen sogar ganz entscheidend für die derzeitige und künftige Erderwärmung!!! Siehe hierzu die Abschnitte 5 und 6.

Der Vollständigkeit halber werden noch andere mögliche Einflüsse auf die Erdtemperatur angesprochen. Sicher ist vieles noch diskussionswürdig und muss noch detaillierter ausgearbeitet werden. Auch sind viele der folgenden Zahlenangaben nur sehr grobe Schätzwerte, die genauer zu erfassen wären. Die grobe Richtung dürfte jedoch durchaus stimmen.

Schwerwiegende, extrem aufwendige Maßnahmen gegen die Erwärmung sind unausweichlich und rasch zu ergreifen, sonst endet es in einer gigantischen Katastrophe. Nur CO₂-Emissionen künftig zu vermeiden, genügt keinesfalls mehr.

2. Fakten

Dass sich die Erderwärmung in neuester Zeit sehr beschleunigt hat, ist inzwischen leider unbestreitbar (Abb. 1). Alleine in den letzten 20 Jahren ist die Durchschnittstemperatur der Erde um etwa ein halbes Grad angestiegen, in den letzten 10 Jahren sogar um gut 0,3 Grad. Der Temperaturanstieg ist auf dem Land etwa doppelt so hoch

wie über dem Meer, durchschnittlich etwa 0,7 Grad über dem Meer und schon etwa 1,4 Grad auf dem Land¹, gegenüber dem Durchschnitt der 1950-iger Jahre. Der Unterschied zwischen Land und Meer ist eine zwangsläufige Folge der riesigen thermischen Trägheit der Meere. Im Gegensatz zum Land benötigen sie zumindest einige Jahrzehnte, um sich auf eine neue Gleichgewichtstemperatur einzustellen. Die Balance zwischen den Temperaturen über Land und über Meer ist dadurch eindeutig aus dem Gleichgewicht geraten. Die Meere werden diesen Temperaturunterschied unweigerlich versuchen aufzuholen, im Verlauf der nächsten Jahrzehnte. Sie werden dabei auch die Temperatur an Land noch weiter ansteigen lassen, selbst wenn man sofort die Emission sämtlicher Treibhausgase unterbinden könnte.

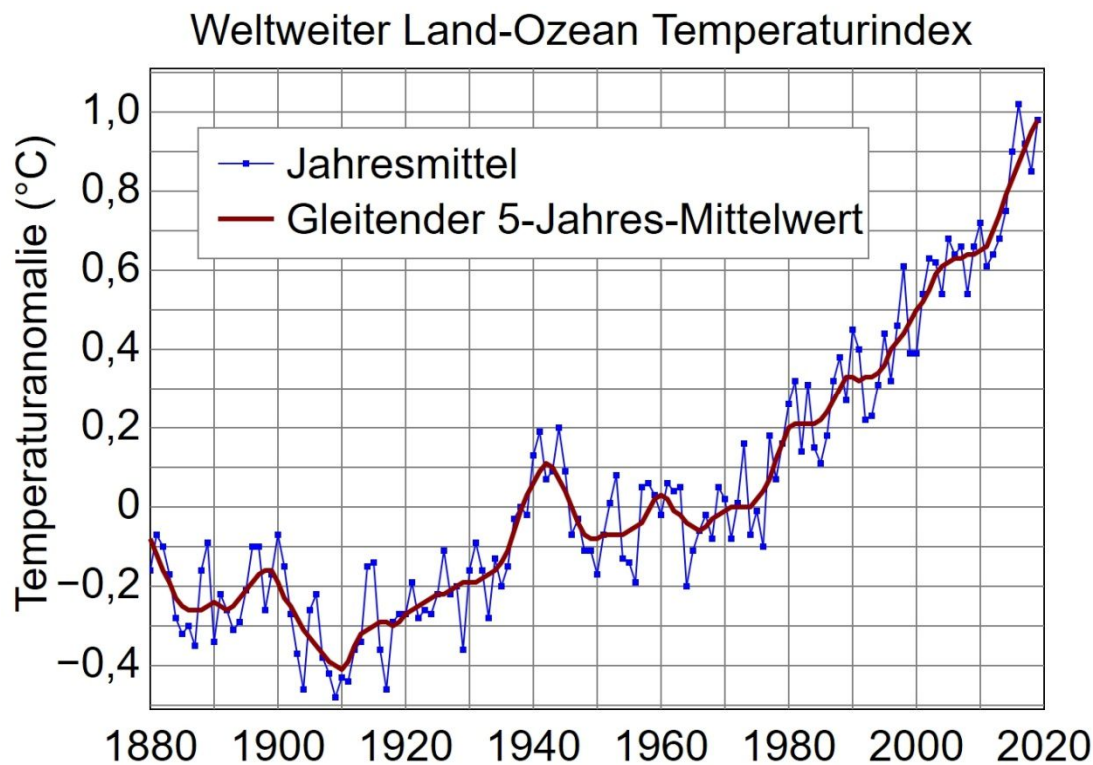


Abb. 1: Globaler Temperaturindex Oberflächentemperaturen Land und See 1880–2019 relativ zum Mittelwert von 1951–1980 (Quelle: NASA Goddard Institute for Space Studies)

Würde durch irgendeinen fiktiven Mechanismus die Luft auf der gesamten Erde stets daran gehindert werden, vom Land zum Meer und vom Meer zum Land zu wehen, und deshalb keinen Ausgleich zwischen Land und Meer bewirken können, dann wären die mittleren Temperaturerhöhungen an Land bereits heute vermutlich schon etwa 2,5 bis 3 °C über dem Niveau von 1950. Dies ist dann auch die eigentliche Gleichgewichtstemperatur der Erde im derzeitigen Zustand. Über dem Meer hingegen wäre die Erwärmung deutlich geringer. Das Meer und damit die Luft darüber würde diese Erwärmung jedoch mit der Zeit unerbittlich nachholen.

Leider ist die Verzögerungswirkung der Meere und damit die Zeit, wie lange sich der Temperaturanstieg nach Einstellung aller Erwärmungsmechanismen noch fortsetzen würde, nur ungenügend bekannt. Man kann zwar folgendes grob abschätzen: Wenn die Meere komplett und ausreichend rasch umgewälzt würden, müsste man die Wärmekapazität des gesamten Meerwassers berücksichtigen. Ein durch die Treibhausgase eingeschlagener Trend würde sich dann unweigerlich noch 200 bis 300 Jahre fortsetzen bevor er wieder abklingen kann, d.h. bevor ein Temperaturgleichgewicht wieder erreicht ist. So schlimm ist es glücklicherweise nicht. Nur ein (zwar großer) Teil der Meere nimmt nennenswert an einer großflächigen Umwälzung teil, aber die Umwälzung dieses Anteils dauert mindestens in der Größenordnung 1000 Jahre. Daraus folgt, dass nur ein geringerer Teil des gesamten Meerwassers an der derzeitigen Erwärmung teilnimmt und daher berücksichtigt werden muss. Der inzwischen existierende Unterschied zwischen Erwärmung Land und Meer von etwa 0,7 °C zeigt meines

¹ siehe beispielsweise im Internet: Anna von der Heydt, *Die Physik der Ozeanströme*, oder auch José L. Lozán, *Ozeane - Schlüsselsystem im Klimageschehen*.

Erachtens allerdings ziemlich eindeutig, dass derjenige Teil der Meere, der derzeit mit betroffen ist, mit der Erwärmung mindestens einige Jahrzehnte hinterherhinkt und diesen Unterschied erst noch aufholen muss.

Die in den letzten 20 Jahren stattgefundene extrem rapide globale Temperaturerhöhung von knapp 0,5 °C kann unmöglich alleine durch den Anstieg von CO₂ erklärt werden. Nicht einmal, wenn man noch die anderen bekannten Treibhausgase hinzunimmt. Es müssen inzwischen noch zusätzliche Faktoren eine deutliche Rolle spielen. Kandidaten hierfür sind beispielsweise die allmähliche Änderung des Reflexionsvermögens der Erde, hauptsächlich infolge des Rückgangs der durchschnittlichen Schnee- und Eisbedeckungen und der daraus folgenden erhöhten Absorption der Erdoberfläche, aber insbesondere auch der allmähliche Rückgang der Bewölkung speziell über Landflächen. Und aller Voraussicht nach werden diese Faktoren sich im Laufe der Zeit noch verstärken und die Temperaturen letztendlich noch schneller steigen lassen. CO₂ selbst kann hierbei nur noch eine untergeordnete Rolle spielen, selbst wenn es höchstwahrscheinlich der ursprüngliche Auslöser für den Temperaturanstieg war, und nach wie vor als sehr gefährlich gelten muss. Soviel zur Theorie mancher Fantasten (lediglich Optimisten kann man sie beim besten Willen nicht mehr nennen), die immer noch glauben, man könnte durch künftiges Vermeiden von CO₂-Emissionen die Erhöhung der Erdtemperatur noch auf 2 oder gar 1,5 °C begrenzen.

Es gab ja in der Erdgeschichte schon früher mehrere Warmzeiten, die oft unglaublich rasch aufgetreten sind.

3. Der Wirkungsmechanismus der Treibhausgase

Ein spezielles Treibhausgas wirkt deswegen, weil es die thermische Emission der Erdoberfläche absorbiert und dadurch teilweise verhindert, dass diese ungehindert in den Weltraum entweichen kann. Für jede Sorte von Treibhausgas (beispielsweise CO₂, Methan, usw.) sind es jeweils nur ganz bestimmte und für jede Sorte von Treibhausgas andere individuelle Wellenlängen (verbreiterte Spektrallinien im thermischen Bereich), in denen dies geschieht. Bei den übrigen Wellenlängen ist die Atmosphäre für ein spezielles Treibhausgas jeweils weitgehend transparent. Dieses Treibhausgas setzt dafür aber genau in diesen Spektrallinien, bei denen es absorbiert, auch eine Eigenemission entsprechend seiner aktuellen Temperatur frei. Es ist eine Art thermischer Emission dieses Treibhausgases, die jedoch auf diejenigen Spektrallinien beschränkt bleibt, in denen es auch absorbiert. Der auf den Erdboden fallende Anteil dieser Eigenemission ist unter dem Begriff "atmosphärische Gegenstrahlung" bekannt (siehe Internet). Diese Strahlung geht natürlich auch in Richtung Weltraum. Im Endeffekt wird dadurch bei den Absorptionswellenlängen eines Treibhausgases nicht die Bodenstrahlung in den Weltraum freigesetzt, stattdessen die aufgrund der niedrigeren Temperatur in der Regel niedrigere Strahlung dieser Eigenemission aus größerer Höhe über dem Boden. Dies führt dann zu einer Temperaturerhöhung am Boden, weil sonst weniger Strahlung in den Weltraum wieder entweichen würde als einfällt. Der sichtbare Anteil des Sonnenlichts dringt nämlich trotzdem zum großen Teil bis zum Boden durch und erwärmt diesen. Durch Erhöhung der Bodentemperatur und damit erhöhter Abstrahlung wird dieses infolge der reduzierten Eigenemission verursachte Ungleichgewicht der Abstrahlung in den Weltraum dann wieder ausgeglichen. Im Mittel muss nämlich genau soviel Energie von der Erde wieder in den Weltraum abgestrahlt werden, wie von der Sonne eingestrahlt wird. Ist dies aus irgendwelchen Gründen nicht der Fall, dann ändert sich die Oberflächentemperatur der Erde so lange, bis dieses Gleichgewicht wieder erreicht ist, was aufgrund der thermischen Trägheit der Meere einige Jahrzehnte dauert.

Definition: Diejenige Höhe, von der im Mittel die (extrem wellenlängenabhängige) direkte Abstrahlung in den Weltraum erfolgt, d.h. ohne weitere Wechselwirkung mit anderen Atmosphärenmolekülen, wird nachfolgend "Emissionshöhe" genannt.

Die Absorption der Treibhausgase kann auch durch die sogenannte optische Dichte beschrieben werden. Je stärker die Absorption durch diese Treibhausgase, umso größer die optische Dichte, und umso mehr wird die eigentliche Ausgleichsstrahlung in den Weltraum im Mittel in die Höhe verlagert. Dadurch wird dann auch die Gleichgewichtstemperatur der Abstrahlung in den Weltraum entsprechend weiter in die Höhe verlagert.

4. Einfluss von Wolken sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Erdbodens

Wolken-Tröpfchen sind physikalisch gesehen kleine Festkörper, die thermische Strahlung entsprechend ihrer Temperatur emittieren und absorbieren wie jeder andere Festkörper auch. Sie können deswegen thermisch näherungsweise als Schwarzkörper angesehen werden. Bezüglich thermischer Abstrahlung in den Weltraum stellt die jeweilige Wolkenobergrenze daher in etwa die eigentliche Oberfläche des Planeten dar, sofern sie in ihrer Gesamtheit die darunter liegenden Flächen ausreichend abdecken (d. h. die Wolken ausreichend dick bzw. dicht sind) und sofern nicht Treibhausgase eine letztendliche Abstrahlung aus noch größerer Höhe bedingen. Sie lassen aber trotzdem sichtbares Licht teilweise durch bzw. streuen dies nur. Schließlich ist

beispielsweise Glas ja auch ein Festkörper, der thermische Strahlung entsprechend seiner Temperatur absorbiert und emittiert.

Da die Temperatur der zuoberst liegenden Wolken-Tröpfchen und damit deren thermische Emission in den Weltraum von deren Höhe in der Atmosphäre abhängt, ist ihre Wirkung auf die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche von dieser Höhe abhängig. Im Allgemeinen wird ein Großteil der Sonnenstrahlung von ihnen reflektiert, sie besitzen ein im Vergleich zur durchschnittlichen Erdoberfläche sehr hohes Reflexionsvermögen für Sonnenlicht. Daher wäre die Gleichgewichtstemperatur an der Oberseite dieser Wolken ohne die Wirkung von Treibhausgasen sehr niedrig, bei angenommenen 30 % Absorption und 70% Reflexion läge sie bei etwa -67°C globaler Mitteltemperatur², wenn die Erde einheitlich von ihnen bedeckt wäre. Da die tatsächliche Temperatur dieser Wolken-Tröpfchen abhängig von der Höhe dieser Wolken deutlich höher ist, und damit deren thermische Abstrahlung nach oben, haben Wolken im allgemeinen eine deutlich kühlende Wirkung auf die Erdtemperatur - nur mäßig bei einer Wolkenobergrenze nahe der Stratosphäre, aber umso mehr, je tiefer die Wolkenobergrenze ist und damit je größer die thermische Emission dieser Wolken-Tröpfchen wird (bei Wolken in mehreren Schichten zählt dabei jeweils die oberste). Insbesondere Kumuluswolken haben einen geradezu gewaltigen kühlenden Einfluss auf die mittlere Erdtemperatur. Dieser Effekt wird durch die Anwesenheit von Treibhausgasen über diesen Wolken gedämpft, weil sie bei bestimmten Wellenlängen die thermische Strahlung der Wolken-Tröpfchen absorbieren, dafür jedoch auch ihre eigene Strahlung mit gewöhnlich deutlich niedrigerer Temperatur und damit niedrigerer Intensität letztendlich in den Weltraum abstrahlen. Die kühlende Wirkung von Kumuluswolken wird andererseits jedoch dadurch noch verstärkt, weil sie abends und nachts in der Regel wieder verschwinden und dadurch dann die Wärmeabstrahlung direkt vom Boden nicht mehr behindern.

In wolkenfreien Regionen ist für die Höhe der Gleichgewichtstemperatur die Absorptionseigenschaft des Bodens maßgeblich, wenn man zunächst von Treibhausgasen absieht. Die folgenden beiden Skizzen versuchen, diese Verhältnisse etwas zu verdeutlichen. In diesen Skizzen wird allerdings nur sehr grob zwischen Eis/Schnee (ca. 30% Absorption) und davon verschiedenen Flächen (ca. 90% Absorption) unterschieden, in Wirklichkeit gibt es sehr viele jeweils unterschiedlich absorbierende Oberflächen. Es wird hierbei von einer durchschnittlichen Sonneneinstrahlung außerhalb der Atmosphäre von etwa 335 W/m^2 über den gesamten Planeten ausgegangen (Solarkonstante / 4).

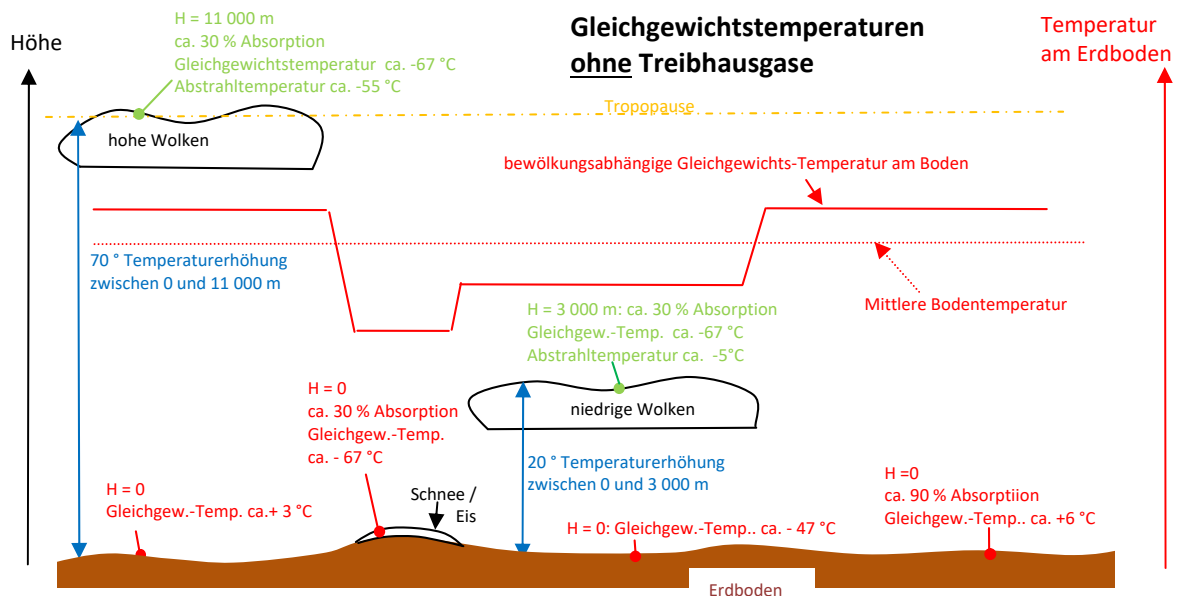
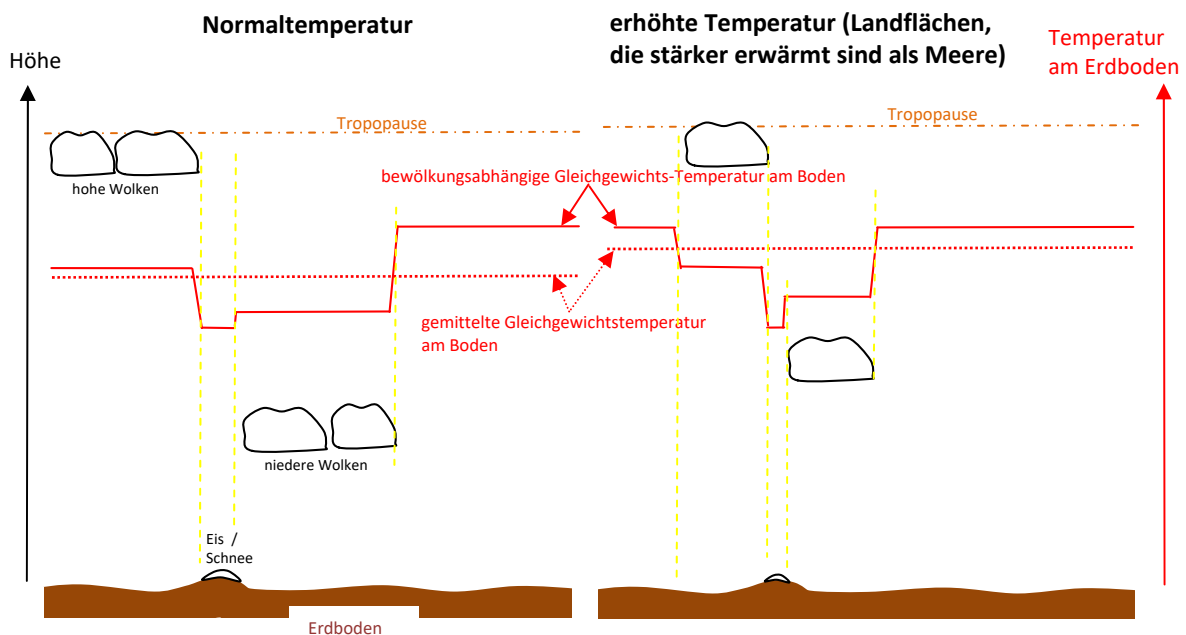


Abb. 2a Gleichgewichtstemperaturen ohne Treibhausgase (gemittelte globale Temperaturen). Bei der Berechnung der Bodentemperaturen unterhalb von Wolken wurde ein mittlerer Temperaturgradient von $0,65^{\circ}\text{C}$ pro 100 m zugrunde gelegt.

² Für die mittlere Oberflächentemperatur eines Planeten ohne Treibhausgase gilt:

$(T_{\text{Planet}})^4 = (T_{\text{Sonne}})^4 \cdot (\alpha_{\text{Planet}} / \epsilon_{\text{Planet}}) \cdot (r_{\text{Sonne}} / r_{\text{Planetenumlauf}})^2 / 4$. α ist die Absorptivität und ϵ die Emissivität. Hierbei wird die Sonne als idealer Schwarzkörper angesehen, mit einer effektiven Temperatur von 5776 K (laut Wikipedia). Wenn die Emissivität des Planeten ϵ_{Planet} gleichfalls 1 gesetzt wird, d.h. gleichfalls ideale Schwarzkörperstrahlung, ergeben sich die angegebenen mittleren Oberflächentemperaturen. Die Annahme $\epsilon_{\text{Planet}} = 1$ ist zwar in der Literatur weit verbreitet, wird von mir jedoch angezweifelt. Die berechneten Werte sind ungefähre Mittelwerte über den gesamten Planeten.

Auch wenn der Unterschied minimal erscheinen mag, könnten die Folgen dramatisch sein: Über Land wird dadurch die Wolkenbildung etwas reduziert - es entstehen im statistischen Mittel weniger kühlende Wolken⁴. Außerdem dürften die verbliebenen Schönwetter-Wolken inzwischen leicht höher zu liegen kommen. Die beiden vergangenen Jahre, insbesondere die beiden heißen und trockenen Sommer 2018 und 2019 haben bei mir durchaus diesen Eindruck erweckt, zumindest in Mitteleuropa. Ich weiß nicht, wie es in der übrigen Welt aussah. Durch die etwas trockenere Luft entsteht insbesondere im Sommer auch deutlich weniger Niederschlag über Land, obwohl global aufgrund der auch höheren Meerestemperatur mit Sicherheit inzwischen mehr Wasser verdunsten und wieder als Regen oder Schnee herunterfallen muss. Aufgrund des unterschiedlichen Anstiegs der Temperaturen zwischen Land und Meer fällt dieser Niederschlag jedoch inzwischen verstärkt über den Meeren, wo es niemand registriert. Auch auf Inseln (Beispiel Mallorca 2018) und in erweiterten Küstenregionen (Beispiel Florida 2018) kann und wird es inzwischen viel stärkere und teilweise katastrophale Niederschläge geben, wenn Regenwolken vom Meer übers Land geweht werden. Im Landesinneren wird es dagegen deutlich weniger. Im Winter, wenn die Landtemperaturen im Mittel trotzdem unter die Meerestemperaturen fallen, dürfte sich dieser Trend möglicherweise etwas umkehren, weil dann der vermehrte Niederschlag auch über Land niedergehen kann.



Der Rückgang von Wolken über Land heizt speziell das Land noch weiter auf. Dadurch kommt sehr wahrscheinlich ein sich selbst verstärkender Effekt zustande. Die Temperaturdifferenz zwischen Land und

⁴ In der englischen Wochenzeitschrift "New Scientist" vom 20. Juni 2020 habe ich hierzu in einer Leserschrift (S. 96) folgende interessante Notiz gefunden: "....over 23 years from 1983, the average percentage cover of low cloud fell from about 12 to 10 per cent. The reason for this isn't clear" Es wird nicht gesagt, dass es später weitergeht, aber möglicherweise stammt die ursprüngliche Feststellung einfach noch aus dem Jahr 2007 oder kurz danach.

Meer steigt dadurch noch weiter an, wodurch sich dann über Land noch weniger Wolken bilden, was die Temperatur dort wiederum noch mehr steigen lässt.

Dieser sich selbst verstärkende Effekt dürfte allerdings eine Obergrenze besitzen. Unter der Voraussetzung, dass nicht noch andere Faktoren die Temperaturen dann zusätzlich hochtreiben, gilt: Spätestens wenn sämtliche Wolken über Land verschwunden sind, können die Temperaturen über Land nicht mehr wesentlich weiter steigen (eine Ausnahme besteht darin, dass eine noch folgende Erhöhung der Meerestemperatur auch die Landtemperatur noch etwas ansteigen lässt). Wenn die Meere dann die Temperaturdifferenz aufholen, dürften sich dann auch die ersten Wolken wieder bilden und die Temperatur über Land dürfte dadurch sogar wieder etwas sinken, so lange bis sich Land- und Meerestemperatur im Schnitt wieder angeglichen haben.

Es wäre eminent wichtig, diesen Zusammenhang von Erwärmung und Wolkenbildung näher zu erforschen und damit zu quantifizieren. Ein sich etwas ändernder mittlerer Temperaturgradient der Atmosphäre könnte hierbei auch noch eine gewisse Rolle spielen.

Eigentlich müssten die dafür erforderlichen Daten auch schon wenigstens teilweise vorhanden sein: Aus Satellitenbildern der Erde aus der Vergangenheit lassen sich unter Umständen langfristige Änderungen von Wolkenbedeckung und auch durchschnittlicher Wolkenhöhe herauslesen. Und eine Änderung des Temperaturgradienten könnte aus bisherigen Temperaturaufzeichnungen von Flugzeugen ermittelt werden. Vielleicht lässt sich sogar aus früheren Flugbeobachtungen eine allmähliche Änderung der durchschnittlichen Wolkenhöhe herauslesen.

6. Möglicher Einfluss von Flugverkehr auf die Erdtemperatur

Es fällt auf, dass dieses Jahr (Status Juli 2020) die Sommertemperaturen zumindest in Deutschland bisher bei weitem nicht so hoch ausgefallen sind wie in den vergangenen Jahren. Ich weiß nicht, wie es im Rest der Welt ausgesehen hat, ob das also nur eine lokale Erscheinung ist oder doch global. Ein gleichfalls lokales Gegenbeispiel sind allerdings die in diesem Jahr bisher höchsten jemals gemessenen Temperaturen in Sibirien.

Wenn man den Temperaturverlauf weiter oben in Abb. 1 genau betrachtet, dann fällt auf, dass ausgerechnet in den Jahren des 2. Weltkrieges, von 1940 bis 1945, die mittlere Jahrestemperatur gegenüber der damaligen langfristigen Mitteltemperatur deutlich, um etwa 0,2 °C, überhöht war (das Jahr 1939 zählt insofern noch nicht, weil der Krieg erst im September begann). In diesen Jahren hatte der Flugverkehr enorm zugenommen (Bombardierungen und Luftkämpfe). Im Jahr 2020 ist stattdessen der weltweite zivile Flugverkehr aufgrund der Corona-Krise extrem zurückgegangen. Wenn man 2 und 2 zusammen zählt, dann könnte dies für einen enormen Einfluss des Flugverkehrs auf die Erdtemperatur sprechen. Man kann gespannt sein, wie die globale mittlere Jahrestemperatur 2020 letztendlich ausfallen wird. Derzeit ist es noch verfrüht, detailliertere Aussagen zu machen, aber so wie es aussieht, könnte der Einfluss des Flugverkehrs bisher gewaltig unterschätzt worden sein. Selbst wenn im Endeffekt die Temperatur 2020 so hoch oder gar leicht höher ausfällt wie 2016, wäre dies noch nicht ohne weiteres ein Grund, diese Möglichkeit völlig auszuschließen!

Wichtig in diesem Zusammenhang wäre, ob es primär die Kondensstreifen sind, die die Abstrahlung der Oberfläche behindern, oder ob es die Abgase generell sind, die dadurch vermehrt in große Höhen transportiert werden, oder beides. Was die Kondensstreifen betrifft: Eine erhebliche Verbesserung wäre meines Erachtens möglich, wenn die Weltgemeinschaft sich darauf einigen könnte, Flüge überwiegend nur noch tagsüber durchzuführen, solange die Kondensstreifen das Sonnenlicht abschatten. Voraussetzung ist hier allerdings, dass die Kondensstreifen in ausreichend kurzer Zeit ihre Wirkung wieder verlieren und nicht nur sich so in der Atmosphäre ausbreiten, dass man zwar visuell nichts mehr sieht, die Auswirkungen aber nach wie vor noch vorhanden sind. Nachts tragen die Kondensstreifen massiv zur Erwärmung bei, weil sie dann nur die thermische Abstrahlung der Erdoberfläche behindern.

7. Detailliertere Ergänzungen zum Verständnis des Treibhauseffekts

Nachfolgendes sind ergänzende Erläuterungen zum Treibhauseffekt, die allerdings gewisse physikalische Kenntnisse voraussetzen und daher nicht jedermann verständlich sein dürften. Für das tiefe und vollständige Verständnis des Treibhauseffekts sind sie zwar durchaus wichtig, aber dennoch von untergeordneter Bedeutung. Wer sich hier überfordert fühlt, kann diesen Abschnitt 7 gerne einfach ignorieren.

7.1 Die Abhängigkeit des Treibhauseffekts vom Atmosphärendruck (Druckverbreiterung von Spektrallinien)

CO₂ und andere Treibhausgase können nur sehr selektiv ganz bestimmte sogenannte Spektrallinien absorbieren, für andere Wellenlängen sind sie transparent. Offensichtlich wird dies beispielsweise in den

Spektren von Sternen, in denen die verschiedenen Stoffe, aus denen diese Sterne bestehen (hier meist nur Atome, keine Moleküle), ganz bestimmte Spektrallinien absorbieren oder teilweise auch emittieren, je nachdem, ob dieser Stoff aus einer deutlich kühleren oder deutlich heißeren Region des Sternes emittiert wird als die restliche thermische Strahlung des Sterns. Normalerweise sind diese sogenannten Spektrallinien sehr schmal. Sie können jedoch verbreitert sein, wenn der Atmosphärendruck in der Region, aus der diese Strahlung stammt, hoch genug ist. Mit anderen Worten: Die Breite dieser Spektrallinien hängt unter anderem vom Atmosphärendruck ab. Sie ist proportional zu diesem. Das Zustandekommen dieser sogenannten Druckverbreiterung ist sehr schwer zu verstehen: Im Prinzip läuft es darauf hinaus, dass sich ein angeregter Zustand eines Atoms oder Moleküls, der normalerweise einfach eine gewisse natürliche Zerfallszeit besitzt, auf die Zeit zwischen 2 Stößen verkürzt, wenn die Dichte des Gases so hoch ist, dass die mittlere Stoßzeit kleiner wird als die natürliche Zerfallszeit. Dies führt aufgrund der Heisenberg'schen Unschärferelation zu einer entsprechend größeren Energieunschärfe, d.h. Verbreiterung der normalerweise sehr schmalen Absorptionslinien (jedes Atom/Molekül besitzt eine größere Anzahl davon). In der mathematischen Formel für diese Druckverbreiterung steckt der Term λ^2 (λ =Wellenlänge). Diese Druckverbreiterung ist daher im thermischen Spektralbereich wellenlängenmäßig mehrere 100 mal größer als im sichtbaren Licht, wo sie auf der Erde praktisch noch keine Rolle spielt.

Beispielsweise führt die auf Mars infolge des ungefähr 150 mal niedrigeren Atmosphärendrucks nahezu fehlende Druckverbreiterung dazu, dass dort kein nennenswerter Treibhauseffekt vorhanden sein kann (durch Temperaturmessungen bestätigt), obwohl die Atmosphäre dort nahezu ausschließlich aus CO_2 besteht. Die Menge an CO_2 pro Flächeneinheit ist auf Mars immer noch etwa das 25-fache der Menge auf der Erde, aber wegen des viel geringeren Atmosphärendrucks ist die Druckverbreiterung und damit der Treibhauseffekt von CO_2 trotzdem sehr klein. Die CO_2 -Absorptionslinien sind dort schlichtweg zu schmal, um die Temperatur nennenswert ansteigen zu lassen.

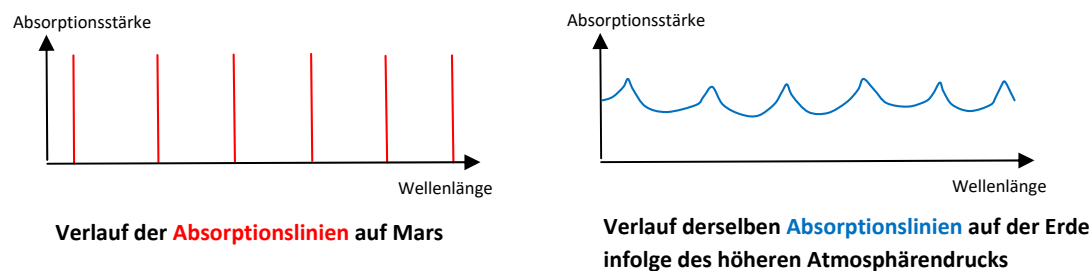


Abb. 4 Qualitativer Vergleich der Form der Absorptionslinien auf Erde und Mars (jeweils am Boden). Der Maßstab der Absorptionsstärke ist nicht linear.

Wichtig zum Verständnis ist jedoch noch: Der Atmosphärendruck nimmt ja mit der Höhe ab. Dadurch werden auch auf der Erde in größeren Höhen CO_2 und andere Treibhausgase abseits der Zentren ihrer jeweiligen Absorptionslinien durchlässiger. In etwa 35 km Höhe sind diese Absorptionslinien dann so schmal wie auf Mars am Boden und aufgrund der sehr geringen Menge noch um ein vielfaches unwirksamer. Es führt außerdem dazu, dass die mittlere Absorptionshöhe, d.h. diejenige Höhe, ab der ein von einem Treibhausgas-Molekül nach oben emittiertes Photon ungehindert in den Weltraum entweichen kann, mit zunehmender Treibhausgas-Konzentration abseits der Zentren der Spektrallinien viel weniger stark ansteigt, als man zunächst vermuten würde.

Vermutung: Vielleicht kann man sich den Übergang von reiner Linienstrahlung eines einzelnen Atoms oder Moleküls bis hin zur Schwarzkörper-Strahlung eines Festkörpers so vorstellen: Ein weitgehend isoliertes Atom/Molekül, das nur sehr selten mit anderen Atomen/Molekülen zusammenstößt und dabei angeregt wird, kann nur sehr scharf begrenzte Linienstrahlung absorbieren und wieder emittieren. Werden die Stöße häufiger, dann findet die sogenannte Stoß- oder Druckverbreiterung statt. Die Absorptions- und Emissionslinien dieses Atoms/Moleküls sind jetzt nicht mehr ganz so scharf begrenzt, werden proportional zur Häufigkeit der Stöße breiter. Mit nochmals zunehmender Stoßhäufigkeit verschmelzen die einzelnen vormals isolierten Spektrallinien zu einem kontinuierlichen Spektralband. In einem Festkörper oder einer Flüssigkeit schließlich sind die gegenseitigen "Stöße" (hier sagt man vielleicht eher Vibrationen) unter den individuellen Atomen/Molekülen so häufig, dass daraus die kontinuierliche thermische Schwarzkörperstrahlung wird.

7.2 Emissionsspektrum der Erde

Es gibt einen japanischen Umweltsatelliten namens GOSAT (Greenhouse Gas Observation by Satellite). Dieser hat die spektrale Emission von wolkenfreien Regionen der Erde in den Weltraum gemessen (Fig. 8 des entsprechenden Artikels).

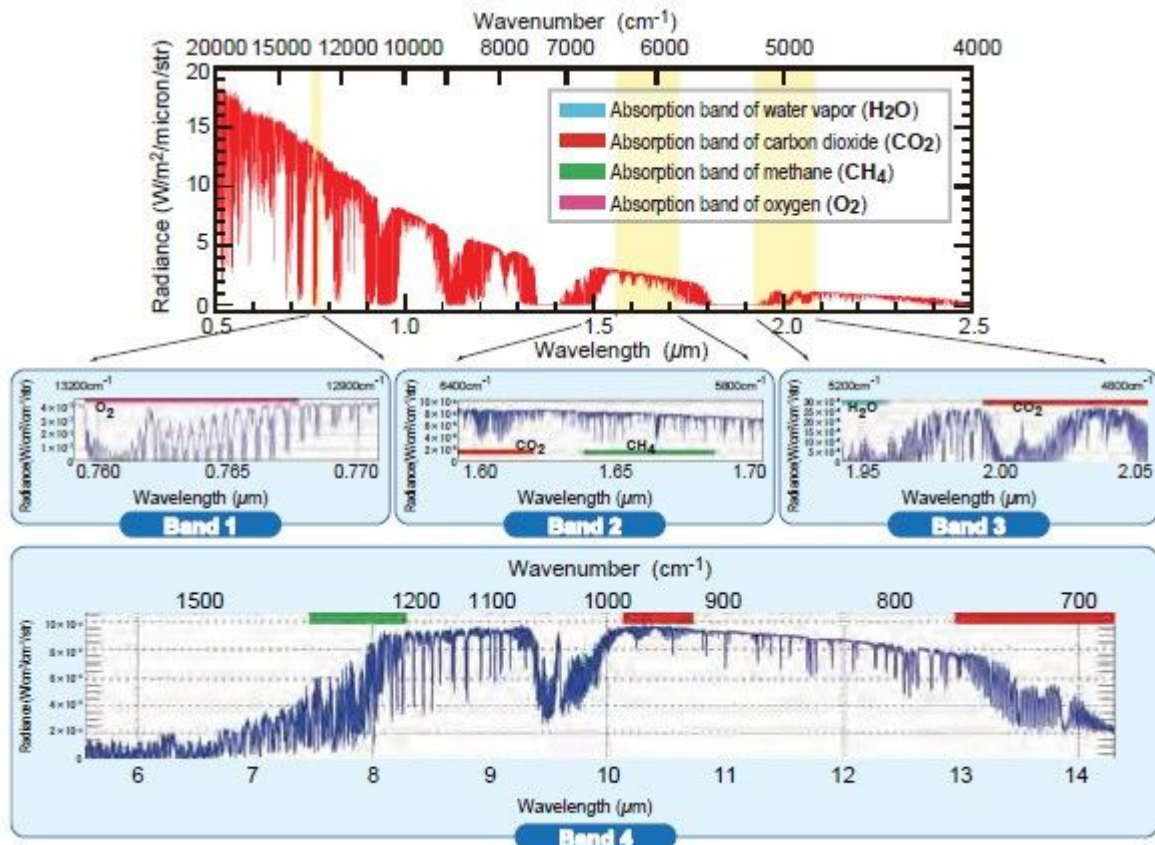


Abb. 5: Fig. 8 aus GOSAT_pamphlet_201409_en-1.pdf (siehe Internet)

Band 1 bis 3 ist nicht von Interesse, es beinhaltet nur reflektierte Sonnenstrahlung und nicht die thermische Emission der Erde. Interessant ist jedoch die in Band 4 gezeigte spektrale Emission der Erdwärmestrahlung am äußersten rechten Rand, im Bereich 13 - 14 μm . Dort hauptsächlich absorbiert CO_2 . Allerdings geht die CO_2 -Absorption noch weiter bis etwa 17 μm , was hier nicht gezeigt wird. Die einzelnen Absorptionslinien stehen in diesem Bereich dicht an dicht. Ähnliches ist bei anderen Wellenlängen auch für andere Treibhausgase der Fall.

Was man hier möglicherweise herauslesen kann: Die Emissionen im Bereich oberhalb von 14 μm scheinen einem nahezu konstanten Wert zuzustreben, der außerdem deutlich niedriger ist als die Werte, die man thermisch von der Erdoberfläche erwarten würde. Kann das dahingehend interpretiert werden, dass hier die Spektrallinien so dicht an dicht stehen, dass auch in der Mitte zwischen zwei dieser Spektrallinien die Eigen-Emission von CO_2 schon aus Höhen in der Nähe oder über der Tropopause erfolgen? Wäre dies tatsächlich der Fall, dann könnte CO_2 in diesem Bereich so gut wie nichts mehr zur weiteren Temperaturerhöhung beitragen.

Um das Ganze vielleicht noch etwas klarer zu machen, zeigt die nachfolgende Skizze die Zusammenhänge im Detail. Sie stellt einen sehr schmalen Ausschnitt aus dem in Abb. 5 gezeigten Spektrum dar, beispielsweise von 13,30 bis 13,35 μm :

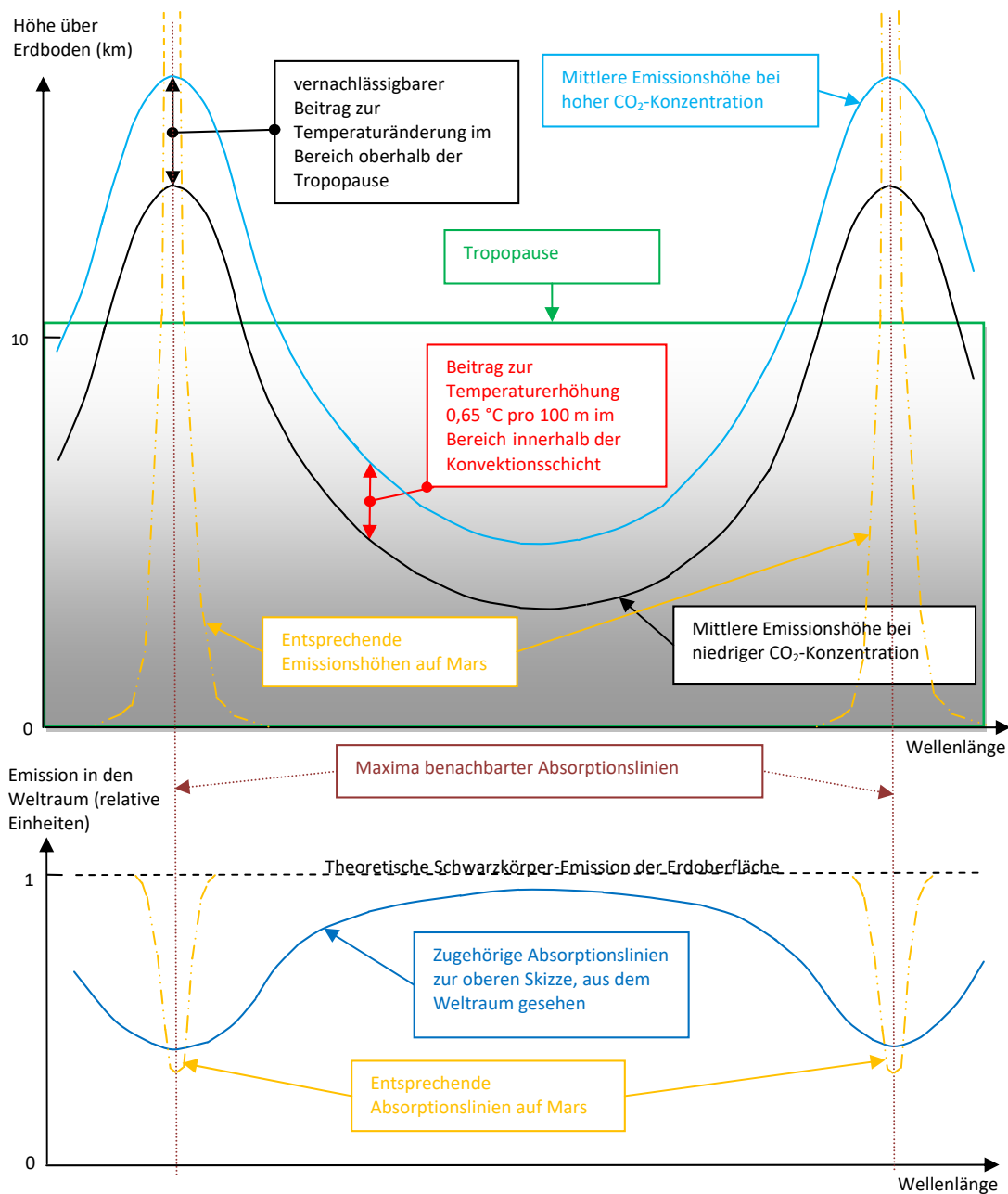


Abb. 6: Oberer Teil: Skizze des Zusammenhangs zwischen Veränderung der mittleren Emissionshöhe und der Temperaturerhöhung am Boden. Der Beitrag von $0,65\text{ °C pro }100\text{ m}$ resultiert aus dem Temperaturgradienten der unteren Atmosphäre

Unterer Teil: Zugehörige Absorptionslinien (Abstrahlung in den Weltraum).

Die beiden Skizzen zeigen im Prinzip einen sehr schmalen, aber typischen Ausschnitt aus dem Wellenlängenspektrum, beispielsweise von $13,30$ bis $13,35\text{ }\mu\text{m}$, wie er auch im GOSAT-Spektrum ("Band 4" der zitierten Fig. 8 in Abb. 5) zu erkennen ist. Die Skizzen gelten nur für wolkenfreie Gebiete. Mit skizziert (gelb-orange gestrichelt) sind die entsprechenden Emissionshöhen und zugehörigen Absorptionslinien auf Mars.

Bei Erhöhung der Treibhausgas-Konzentration steigt die Emissionshöhe weiter an. Die Schicht, aus der die direkte Abstrahlung in den Weltraum erfolgt, hat in den Wellenlängen dieses Treibhausgases dadurch eine geringere Temperatur, sofern sie noch innerhalb der konvektiven Schichtung der Atmosphäre liegt (unterhalb der Tropopause). Durch diese geringere Temperatur reduziert sich die Eigenemission in den Weltraum entsprechend. Dadurch entsteht zunächst ein Ungleichgewicht zwischen Einstrahlung von der Sonne und

Abstrahlung in den Weltraum - es wird von der Erde jetzt weniger Energie abgestrahlt als von der Sonne eingestrahlt wird. Der Planet erwärmt sich dadurch so lange, bis durch erhöhte Temperatur das Strahlungsgleichgewicht wieder hergestellt ist.

Bei Anwesenheit von Wolken ist die Emissionshöhe mindestens ungefähr der jeweiligen Wolkenobergrenze gleichzusetzen, mit Ausnahme bestimmter Wellenlängen, bei denen die Treibhausgase eine noch größere Emissionshöhe bedingen.

Es kann auch bezweifelt werden, ob sich eine Erhöhung des CO_2 -Gehalts nennenswert bis in große Höhen fortsetzt. CO_2 -Moleküle sind schwerer als N_2 und O_2 , und eine Durchmischung der Atmosphärenschichten mittels Konvektion findet oberhalb der Tropopause nicht statt.

8 Weitere Treibhausgase und sonstige mögliche Einflüsse auf die Erdtemperatur

8.1 Die Wirkung von Wasser als Treibhausgas

Wasser in der Atmosphäre wirkt als Treibhausgas. In der derzeitigen Menge trägt es sogar - gemäß der derzeit gängigen Theorie - etwa dreimal so viel zur Temperaturerhöhung bei wie CO_2 .

Der Gehalt an gasförmigem Wasser in der Atmosphäre kann zwar vom Menschen so gut wie gar nicht direkt beeinflusst werden. Verdampft der Mensch Wasser, so regnet dies in kurzer Zeit einfach zusätzlich wieder ab. Wenn sich jedoch die mittlere Temperatur erhöht, erhöht sich der Wassergehalt der Atmosphäre, weil wärmere Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann. Dadurch steigt dann auch der durch Wasserdampf verursachte Teil des Treibhauseffektes. Dieser Beitrag ist allerdings begrenzt: Eine durch andere Faktoren außer Wasser zunächst verursachte Temperaturerhöhung um beispielsweise 1°C schiebt letztendlich einfach die bisherige Wasserdampfsäule aufgrund des existierenden Temperaturgradienten von $0,65^\circ/100\text{ m}$ um etwa 155 m nach oben. Damit steigt in den relevanten Absorptionswellenlängen des Wassers die Emissionshöhe um etwa 155 m an, und würde dort nochmals eine Temperaturerhöhung um ein weiteres Grad verursachen. Da Wasser jedoch nur in einem Teil der thermischen Wellenlängen wirkt, ist die tatsächliche zusätzliche Temperaturerhöhung durch Wasser schätzungsweise nur etwa 20 - 30% der zunächst durch andere Faktoren bewirkten Temperaturerhöhung. Zur Verdeutlichung dieser Zusammenhänge siehe Abb. 7. Außerdem ist Wasser zum größten Teil im gleichen Wellenlängenbereich wirksam wie ohnehin schon CO_2 , was diesen Beitrag wahrscheinlich weiter reduziert.

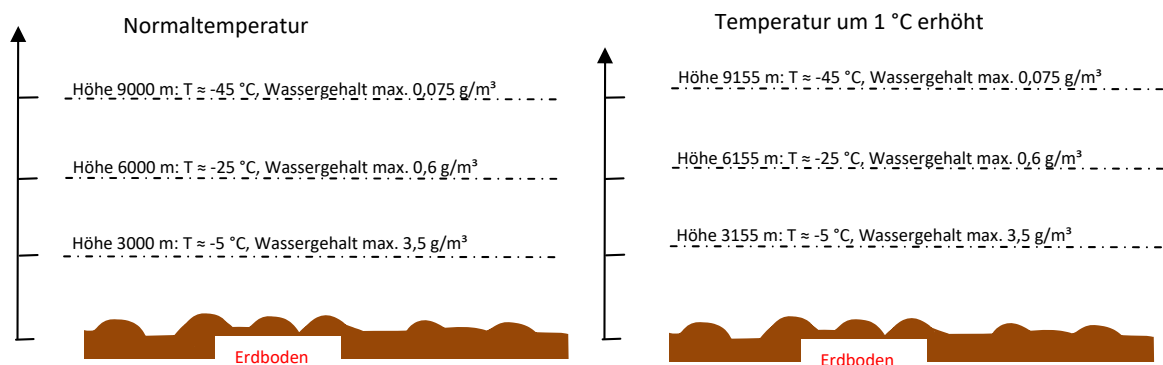


Abb. 7: Maximaler Wassergehalt der Atmosphäre in wolkenfreien Regionen bei normaler und erhöhter Temperatur. Die angegebenen Zahlen entsprechen jeweils 100 % relativer Feuchte bei den entsprechenden Temperaturen. Es zeigt eindeutig, dass eine Temperaturerhöhung nur eine mäßige zusätzliche Temperaturerhöhung durch den Treibhauseffekt des Wassers bewirken kann.

8.2 Sonstige Einflüsse

Es gibt eine ganze Reihe anderer Faktoren, die die Erdtemperatur zusätzlich beeinflussen können. Wie bereits erwähnt, kann die derzeit stattfindende extreme Erwärmung auch nicht alleine auf CO_2 zurückzuführen sein. Es müssen noch andere Faktoren beträchtlich dazu beigetragen haben.

Zu diesen anderen Faktoren: Ob und inwieweit sie im einzelnen wirklich eine Rolle spielen, mag großenteils noch zu klären sein. Ich möchte an dieser Stelle aber einfach mal alles ansprechen, was möglicherweise wichtig sein könnte.

Ein sicher wichtiger Faktor ist, wie bereits erwähnt, die mittlere Änderung der Absorption der Erdoberfläche. Beigetragen dazu hat vor allem der Rückgang der Schneebedeckung im Winter, sowie der Rückgang der Eisbedeckung in den Polar- und auch etwas in den Gletscherregionen. Wenn die winterliche Schnee- und Meereisbedeckung gegenüber früher im Durchschnitt beispielsweise einen Monat pro Jahr weniger dauert, macht sich das deutlich bemerkbar⁵. Es erhöht die übers Jahr gemittelte Absorption der Erdoberfläche, was zwangsläufig zu höheren Temperaturen führt (mit derselben Zeitverzögerung wie für alle anderen Beiträge).

Es steht daher zu befürchten, dass der Rückgang der Schnee- und Eisbedeckung, noch verstärkt durch den allmählichen Rückgang der niedrigen Bewölkung sowie ein genereller Anstieg der Wolkenhöhe künftig die Hauptursachen für weiteren Temperaturanstieg sein werden, weil hier sich jeweils selbst verstärkende Effekte in Gang gesetzt wurden. Aber auch andere, teilweise auch durch die Menschheit verursachte Faktoren können nicht ausgeschlossen werden.

Aus der Tatsache, dass die Erde über Jahrmilliarden hinweg stets eine für das Leben einigermaßen akzeptable Temperatur beibehalten hat, trotz der langsamen Strahlungserhöhung der Sonne, und trotzdem sich Temperaturänderungen durch Sekundäreffekte beträchtlich verstärken können (Beispiel Farbänderung bei weniger oder mehr Schnee- und Eisbedeckung), kann nur geschlossen werden, dass in der Vergangenheit irgendetwas dem immer aktiv entgegenwirkte. Ein sehr wahrscheinlicher Kandidat hierfür ist der globale Pflanzenbewuchs, der möglicherweise je nach herrschender Temperatur bisher durch allmähliche Änderungen seiner Farbe mehr oder weniger Strahlung in den Weltraum zurückreflektiert und damit die Erdtemperatur in Grenzen gehalten hat. Die etwas helleren tropischen Pflanzen könnten beispielsweise bei Temperaturanstieg allmählich die dunkleren Wälder des Nordens teilweise ersetzt haben. Diesen möglichen Ausgleichsmechanismus, sofern er denn tatsächlich eine signifikante Rolle spielt, hat der Mensch insbesondere in den letzten 50 - 100 Jahren gründlich durcheinander gebracht, indem er massiv Wälder abholzt und den Pflanzenbewuchs nur seinen Bedürfnissen anpasst. Wobei die Richtung, in die diese Störung wirkt, alles andere als klar ist.

Der Vollständigkeit halber: Es gibt auch noch andere klimarelevante Gase, beispielsweise Methan.

9. Ein weiteres verwandtes Thema - die Historie der Erdtemperaturen

Betrachten wir noch die Historie der Temperaturen in der Erdgeschichte. Vielleicht ergeben sich da ja auch einige Hinweise. Trotz einer stetig zunehmenden Intensität der Sonnenstrahlung - sie hat sich in 4 ½ Milliarden Jahren um rund 30 % erhöht - scheint die Erdtemperatur im Wesentlichen dieselbe geblieben zu sein. Natürlich mit einigen deutlichen Abweichungen sowohl nach oben als auch nach unten. Man spricht hier sogar vom Paradoxon der schwachen jungen Sonne⁶. Es könnte auf folgendes zurückzuführen sein: Wie gezeigt wurde, ist die Wirksamkeit des Treibhauseffekts stark vom Atmosphärendruck abhängig. Außerdem spielt die durchschnittliche Wolkenhöhe noch eine nicht unwesentliche Rolle. Nehmen wir mal an, der Atmosphärendruck war früher deutlich höher, hat dann durch ständig in den Weltraum entweichendes Gas langsam abgenommen. Zusätzlich haben gelegentlich sehr große Asteroiden-Einschläge dazu beigetragen, weil sie jeweils einen kleinen Teil der Atmosphäre in den Weltraum schleuderten. Nicht alle werden damit einverstanden sein, es gibt auch Stimmen, die behaupten, dass der Atmosphärendruck früher zeitweilig sogar niedriger war als heute. Aber das sind Spekulationen, die stimmen mögen oder auch nicht. Wenn der Atmosphärendruck früher höher war, war damals auch der Treibhauseffekt beziehungsweise die Wirksamkeit der Treibhausgase entsprechend stärker als heute. Somit könnte eine langsame Abnahme des Atmosphärendrucks durchaus die langsame Erhöhung der Solarstrahlung in etwa kompensieren. Aber es muss hierbei auch berücksichtigt werden, dass sich die Gaszusammensetzung im Laufe der Erdgeschichte geändert hat.

⁵ Ich habe versucht, das mal ganz grob abzuschätzen: Dabei bin ich von folgenden etwas willkürlichen Randbedingungen ausgegangen: Winterliche Schneebedeckung auf 40° - 90° geogr. Breite sowie winterliche Eisbedeckung auf 60° - 90° um jeweils 1 Monat pro Jahr gegenüber vorindustriellen Zeiten reduziert. Keine Berücksichtigung der Erdoberflächenneigung. Anstieg der Absorption von 0,3 (Schnee/Eis) auf 0,9 (Eis- und Schneefrei) in 50 % wolkenfreien Gebieten. Unter diesen Annahmen erhöht sich die durchschnittliche Absorption der Erde um knapp ein viertel %, was etwa 0,2 °C Temperaturanstieg bedeuten würde. Allerdings ist hierbei noch die große Zeitverzögerung zu berücksichtigen. Die bisherige Temperaturänderung beträgt nur etwa die Hälfte dieses Wertes. Die Annahmen bei dieser Betrachtung dürften jedoch selbst nur auf einen Faktor 2 - 3 genau sein, so dass im Prinzip auch eine dadurch derzeit schon verursachte Temperaturerhöhung von bis zu einem viertel Grad möglich wäre. Eine genauere Abschätzung ist im Prinzip möglich und würde sich auch lohnen, wäre jedoch eine ungeheure Fleißaufgabe, die meine Möglichkeiten weit übersteigt. Erforderlich wäre als Minimum ein Vergleich der Schnee- und Eisbedeckungen heute mit denen um die Jahre 1840 - 1950 an möglichst vielen verschiedenen Orten, verteilt über die ganze Welt - soweit Aufzeichnungen darüber verfügbar. Auf alle Fälle sollte man den künftigen Rückgang der Eis- und Schneebedeckung im Auge behalten.

⁶ Siehe https://de.wikipedia.org/wiki/Paradoxon_der_schwachen_jungen_Sonne.

Es gab ja in der Erdgeschichte sowohl ausgesprochene Kalt- als auch Warmzeiten. Interessant wäre, zu erfahren, ob speziell zu den Kaltzeiten der Atmosphärendruck niedriger und zu den Warmzeiten höher war. Es wird allerdings dadurch verkompliziert, dass der CO₂-Gehalt in der Historie auch sehr stark variierte.

10. Schlussfolgerungen

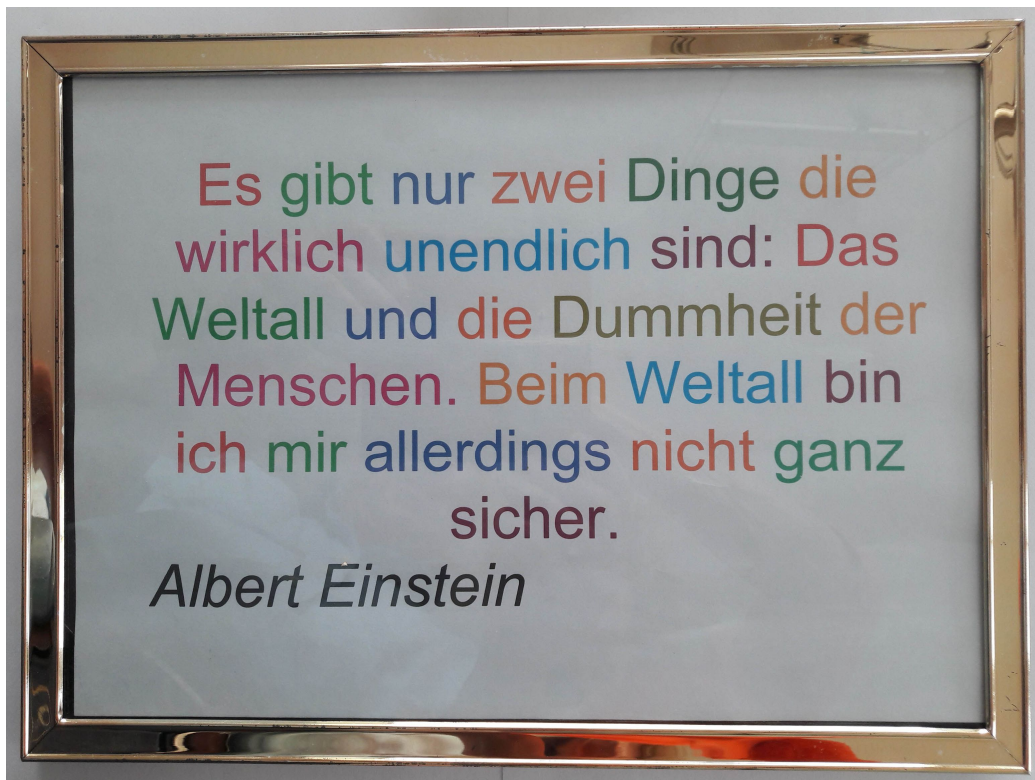
Obwohl das letzte Wort sicher noch nicht gesprochen ist, insbesondere was die wahren Ursachen des Temperaturanstiegs und seine weitere Entwicklung betrifft, muss trotzdem sehr rasch etwas geschehen. Sonst wird es höchstwahrscheinlich weitaus katastrophaler, als sich das jemand vorstellen kann. Man darf nicht mehr warten, bis alles hieb- und stichfest bewiesen ist, weil es dann gegebenenfalls viel zu spät sein wird für Gegenmaßnahmen.

Meiner persönlichen Einschätzung nach wären die Folgen ungeheuer katastrophal, wenn außer der künftigen Vermeidung von CO₂-Emissionen (was ohnehin zu bezweifeln ist) nichts Weiteres gegen die Erwärmung unternommen würde. Eine Menschheit, die so unsäglich dumm wäre, das Problem zu ignorieren und hier untätig zu bleiben, wäre ganz sicher nicht plötzlich doch noch so vernünftig, die ungeheuer gewaltigen Probleme, die genau dadurch dann nach und nach auftauchen würden, mit noch friedlichen Mitteln lösen zu wollen. Es könnte dann sogar auf totale Vernichtung der gesamten Menschheit hinauslaufen, zumindest der Vernichtung jeglicher Zivilisation, wenn die Probleme überhand nehmen, d.h. die bewohnbaren und für den Menschen nutzbaren Landflächen sehr viel kleiner und immer noch kleiner werden. Einerseits durch den steigenden Meeresspiegel und andererseits - möglicherweise sogar noch sehr viel stärker - durch die steigenden Temperaturen in auch jetzt schon heißen Regionen der Erde. Wodurch auch vom Meeresspiegel-Anstieg nicht betroffene, leicht höher gelegene tropische und subtropische Landflächen sowohl unbewohnbar als auch landwirtschaftlich nicht mehr nutzbar werden. Schon lange vor Ende dieses Jahrhunderts könnten dann hunderte von Millionen oder gar mehr als eine Milliarde Menschen verzweifelt auf der Suche nach neuem Lebensraum sein. Es **muss** uns daher etwas dagegen einfallen, und zwar rasch. Und es muss sofort und äußerst intensiv damit begonnen werden, weil jede erdenkliche Gegenmaßnahme mit Sicherheit sehr lange Zeit in Anspruch nehmen wird, bis sie soweit gediehen ist, dass sie einigermaßen wirkt. Siehe hierzu meinen Artikel über einen global wirkenden Sonnenschirm im sogenannten Lagrangepunkt L1 der Erde ⁷, der meiner Einschätzung nach etwa 100 Jahre bis zur endgültigen Fertigstellung benötigen wird, auch wenn er vorher schon zumindest teilweise wirken würde. Er könnte jedoch insbesondere auch den unterschiedlichen Anstieg zwischen Land- und Meerestemperaturen ausgleichen und dadurch wieder einen allmählichen Ausgleich der jahreszeitlichen Niederschläge bewirken.

Wenn wir nichts tun, werden schätzungsweise schon beginnend in den Jahren etwa 2060 bis 2080 schwerste, wirklich globale Kriege unvermeidlich sein, die unglaublich viele Menschenleben fordern würden. Wahrscheinlich sogar so lange bis auch nahezu der letzte Mensch vernichtet wäre. Daher ist jeder Tag, den wir jetzt noch untätig verbummeln, schon ein gewaltiges Risiko. Gemindert oder sogar weitgehend verhindert werden kann dieser Blutzoll nur dann, wenn der Menschheit eine reale Hoffnung geboten ist, dass sich die Lage bald wieder bessern wird!!! Dann werden die meisten eher bereit sein, auf blinde Gewalt vorläufig zu verzichten.

⁷ Siehe hierzu meinen Artikel "Eine mögliche Gegenmaßnahme zu der durch CO₂-Ausstoß und weiteren Ursachen bedingten Erwärmung der Erde".

11. Anhang



Diesen Ausspruch von Albert Einstein habe ich mir eingerahmt und in meinem Bibliothekszimmer aufgehängt. Er bewahrheitet sich immer mehr. Ich kann nicht mal behaupten, dass er nicht auch auf mich wenigstens gelegentlich zutrifft. Lasst uns hoffen, dass er nicht zur alles zerstörenden Wahrheit wird. Das kann allerdings nur dann funktionieren, wenn wirklich jeder anerkennt, dass auch er sich noch in seinen sichersten Erkenntnissen irren kann, und daher auch abweichende Meinungen toleriert und vor allem ernsthaft überprüft.