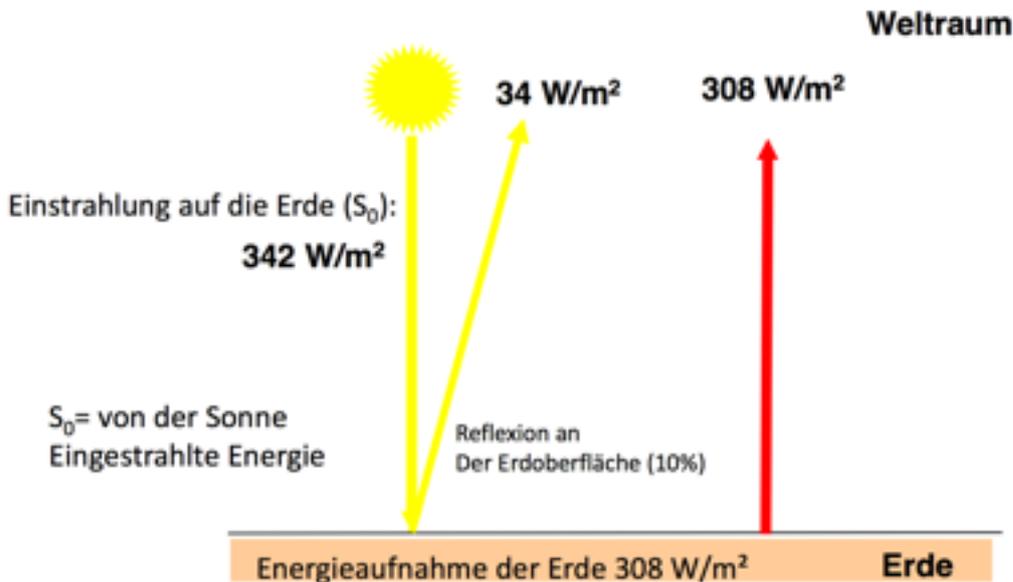


Prinzip des Treibhauseffektes

W. Zittel - 2016

1. Wie heiß wäre die Erde ohne Atmosphäre?



Diese Energie wird im thermischen Gleichgewicht als Wärmestrahlung auch wieder abgestrahlt: Je höher die Temperatur der Erde, umso mehr Energie wird zurückgestrahlt. Damit wird die Erde so heiß, bis die aufgenommene Energie vollständig in den Weltraum zurückgestrahlt wird. Der Mechanismus ist identisch zu einer heißen Herdplatte. Die hierbei erreichte Temperatur kann man berechnen (nächste Folie)

Im Jahresmittel werden 10% der eingestrahlten Sonnenenergie reflektiert (v.a. die winterliche und polare Schneebedeckung reflektiert das Sonnenlicht).

Es werden also nur 90% der eingestrahlten Sonnenenergie von der Erdoberfläche aufgenommen und in Wärme verwandelt.

Die von der aufgewärmten Erdoberfläche zurückgestrahlte Energiemenge kann gemäß dem 1879 gefundenen Stefan-Boltzmann-Gesetz (vgl. <http://www.chemie.de/lexikon/Stefan-Boltzmann-Gesetz.html>) berechnet werden:

$$E = 0,9 \cdot S_0 = 308 \text{ W/m}^2 = c \cdot T^4.$$

Dabei ist c eine Konstante (die sog. Stefan-Boltzmann-Konstante), sie hat den Wert $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$.

Daraus errechnet sich die Temperatur der Erdoberfläche zu $T^4 = (308/5,67) \cdot 10^8 \text{ K}^4$, bzw. zu $T = 271 \text{ K}$;

Das ist ein Jahresmittelwert über die gesamte Erdoberfläche. Daher wurde die von der Sonne eingestrahlte Energie, S_0 , ebenfalls gemittelt und auf die Kugelschale der Erde verteilt. Sie

beträgt also 1/4 der Solarkonstante, welche die direkte

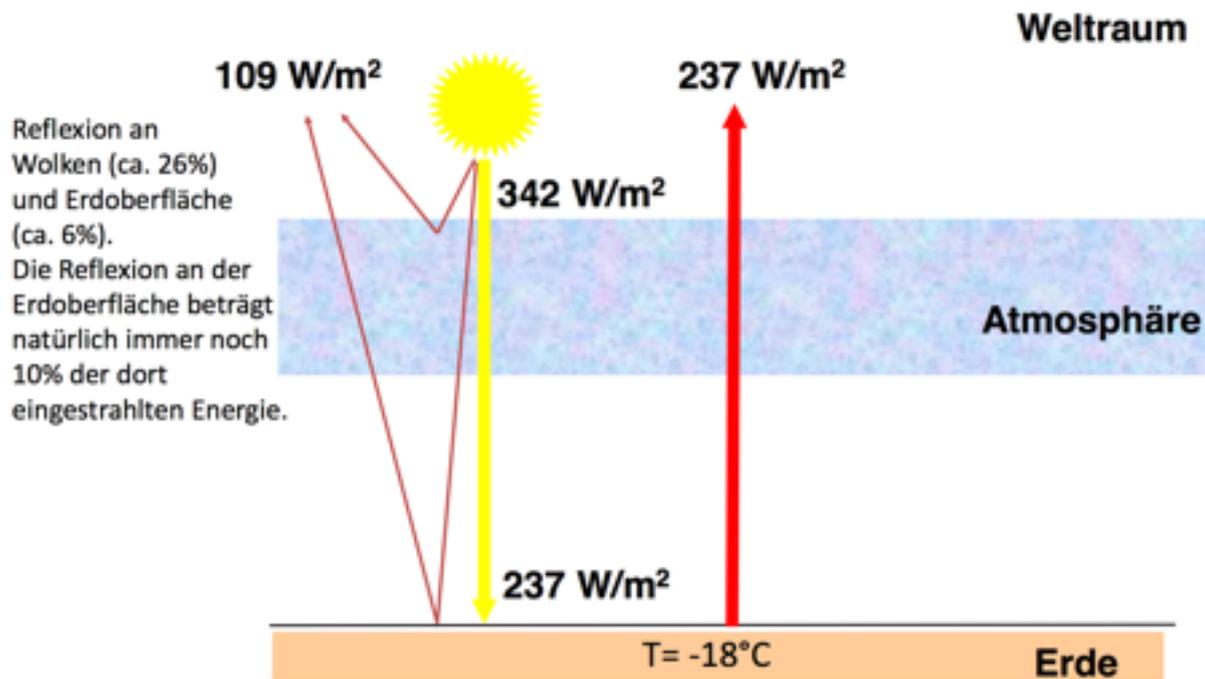
solare Einstrahlung auf die Erde in W/m^2 angibt ($4 \cdot 342 = 1368 \text{ W/m}^2$). Ohne

Atmosphäre und Speicherfähigkeit der Wärme würde die Erde am Tag auf $\sim 323 \text{ K}$ aufheizen, und bei Nacht auf $\sim 3 \text{ K}$ abkühlen.

≙ Tag: $\sim 49,85$ Grad Celsius

≙ Nacht: \sim minus 270 Grad Celsius

2. Wie heiß wäre die Erde mit reflektierender Atmosphäre, aber ohne Treibhauseffekt?



Eingestrahelte Energie = $0,7 \cdot S_0 = 237 \text{ W/m}^2$ und damit $T^4 = (237/5,67) \cdot 10^8 \text{ K}^4$

$\Rightarrow T = 255 \text{ K}$; Die mittlere Erdoberflächentemperatur lag bis vor ca. 50 Jahren bei 15°C bzw. $288,15 \text{ K}$. Der Temperaturunterschied beträgt $\Delta T = 33^\circ\text{C}$; Dieser Temperaturunterschied ist auf die weiteren Strahlungseigenschaften der Atmosphäre zurückzuführen. Dies wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet. Dazu kommt der anthropogene Treibhauseffekt, der gegenüber dem Temperatur-Mittelwert der letzten 100 Jahre einen Anstieg von ca. $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ verursacht.

3. Strahlungseigenschaften der Atmosphäre?

3.1. Die Absorption von UV-Strahlung

Die Atmosphäre hat chemische und physikalische Eigenschaften, welche sowohl die von der Sonne auf die Erde eingestrahelte Energie, als auch die von der Erde ausgehende Wärmestrahlung beeinflussen.

Beispielsweise wird das energieintensive und für Pflanzen und Lebewesen schädliche UV-Licht zum großen Teil in der Atmosphäre absorbiert.

Für diese Absorption sind spezielle Eigenschaften der Atome in der Atmosphäre relevant. Energie kann immer nur dann absorbiert werden, also von den Molekülen aufgenommen werden, wenn das Molekül genau in diesem Energiebereich die Möglichkeit für die Energieaufnahme hat, man benötigt einen Resonanzeffekt.

Die Energie von Lichtquanten im ultravioletten Bereich ist so groß, dass sie die Bindungsenergie eines Sauerstoffmoleküls aufbrechen kann. Dadurch entstehen freie Sauerstoffatome, sie sich in einer Folgereaktion zu Ozon (also einem Molekül mit drei Sauerstoffatomen) verbinden können. Ozon selbst kann UV-Strahlung noch intensiver absorbieren. In der Stratosphäre werden auf diese Weise jedes Jahr ca. 125 Mrd. Tonnen Ozon gebildet. Diese reichen aus, um den schädlichen Anteil der Solarstrahlung unschädlich zu machen und am Eindringen auf die Erdoberfläche zu verhindern.

3. Strahlungseigenschaften der Atmosphäre?

3.2. Die Absorption von Infrarotstrahlung (1)

Die erhitzte Erde strahlt ihre Energie als Wärmestrahlung wieder in das Weltall zurück. Wärmestrahlung ist dabei physikalisch dasselbe wie UV-Strahlung oder Strahlung von sichtbarem Licht. Der Unterschied besteht darin, dass die Wellenlänge so groß, bzw. die Schwingungsfrequenz so niedrig ist, dass die Energie der einzelnen Strahlungsphotonen sehr gering ist.

Bestünde die Atmosphäre nur aus Stickstoff und Sauerstoff, dann würde die Wärmestrahlung ungehindert die Atmosphäre durchqueren und die Atmosphäre könnte keinen Treibhauseffekt erzeugen. Doch einige Moleküle in der Atmosphäre sind so gebaut, dass die einzelnen Atome gegeneinander mit einer Frequenz schwingen können, die im Schwingungsbereich der Wärmestrahlung liegt. Man kann sich das an einem schwingenden Seil vorstellen. Wenn man ein Ende festhält und auf und ab bewegt, entsteht ein Schwingungsmuster mit einem Schwingungsbauch. Wenn man die Geschwindigkeit genügend erhöht – man also entsprechend viel Energie zuführt –, kann man zwei Schwingungsbauche gleichzeitig erzeugen. Man hat die erste Oberschwingung angeregt, etc..

Trifft die von der Erde ausgestrahlte Wärmestrahlung auf diese Moleküle, so wird sie dadurch absorbiert, dass die Energie an die Moleküle abgegeben wird. Diese schwingen dann in einer Oberschwingung mit höherer Frequenz. Mit einer gewissen Zeitverzögerung geben die Moleküle diese Energie dann wieder als Wärmestrahlung (mit derselben Frequenz) ab und kehren in ihren ursprünglichen Zustand zurück.

3. Strahlungseigenschaften der Atmosphäre?

3.2. Die Absorption von Infrarotstrahlung (2)

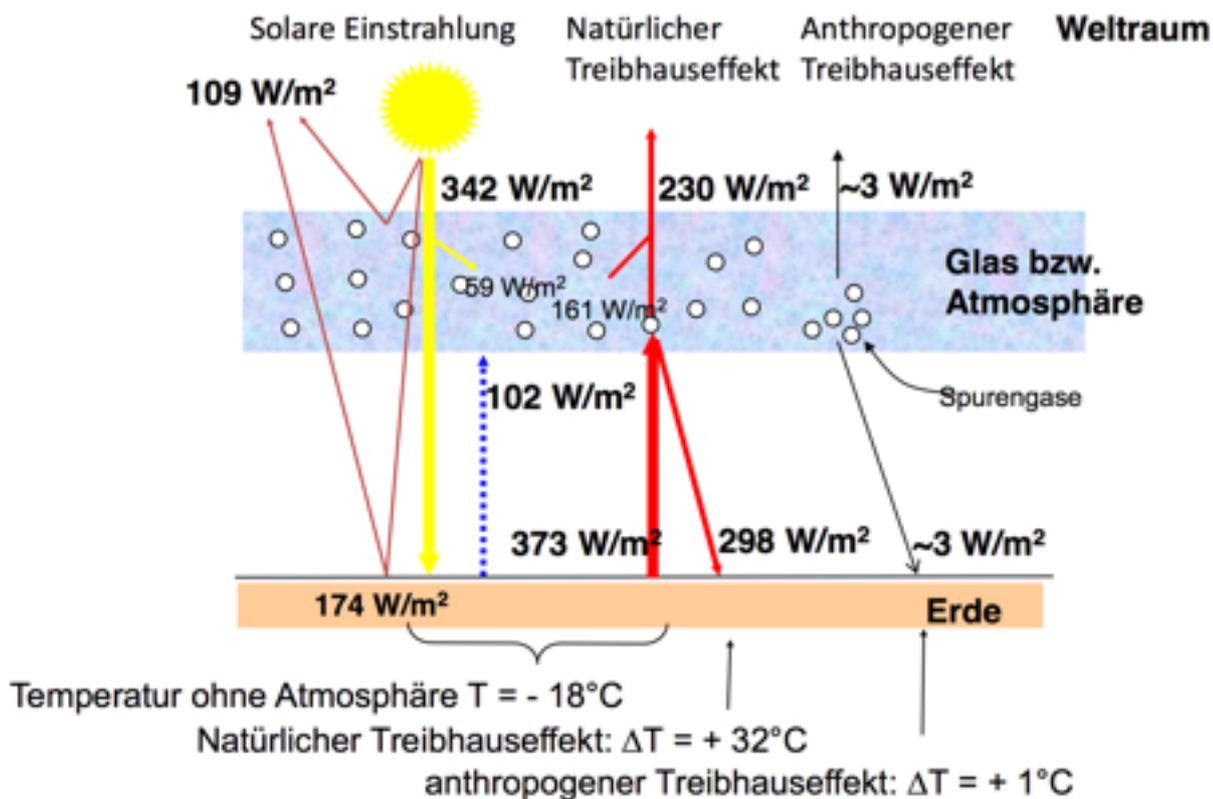
Der wesentliche Aspekt hierbei ist, dass die Wärmestrahlung von der Erde abgestrahlt wird, von unten in die Atmosphäre eindringt und adsorbiert wird. Wenn sie von den jetzt angeregten Molekülen wieder abgegeben wird, dann geschieht das statistisch gleichmäßig verteilt in alle Richtungen. Das heißt, im Mittel wird nur die Hälfte der absorbierten Wärmestrahlung wieder in Richtung Weltall abgestrahlt, die andere Hälfte wird in alle Richtungen nach unten auf die Erde zurückgestrahlt.

Damit ergibt sich eine Verzögerung, die Wärme wird etwas länger auf der Erde zurückgehalten und trägt dazu bei, die Erde etwas stärker aufzuheizen. Das wird in der nächsten Grafik dargestellt:

Von den 342 W/m² werden 109 W/m² an Wolken und der Erdoberfläche reflektiert. 59 W/m² werden in der Atmosphäre absorbiert. Daher erreichen nur noch 174 W/m² die Erde und heizen diese auf. Durch die erhöhte Oberflächentemperatur werden 102 W/m² durch Wärmeleitung und Windkühlung direkt in die Atmosphäre abgegeben. 72 W/m² würden von der Erdoberfläche als Wärmestrahlung direkt in die Atmosphäre zurückgestrahlt. Diese werden jedoch um 301 W/m² zu insgesamt 373 W/m² verstärkt, da diese durch die Rückkopplung (Treibhauseffekt) wieder aus der Atmosphäre zurückgestrahlt werden. Dass der insgesamt zurückgestrahlte Anteil (301 W/m²) wesentlich höher ist als der ursprünglich in die Atmosphäre abgestrahlte Wärmeanteil (72 W/m²) liegt an der Rückkopplung der Mehrfachabsorption und Emission. In der Grafik wurde der anthropogene Anteil mit ~3 W/m² getrennt ausgewiesen.

4. Prinzip des Treibhauseffektes

4.



Prinzip des Treibhauseffektes

4.1 Der natürliche Treibhauseffekt

Die trockene Atmosphäre bestand bis vor ca. 100 Jahren zu 78% aus Stickstoff, fast 21% aus Sauerstoff, 0,93% Argon (das vor allem durch den Uranzerfall im Erdmantel erzeugt wird), 0,03% Kohlendioxid und weiteren Spurengasen mit wesentlich geringerem Anteil.

Dazu kommen noch ca. 2,6% Wasserdampf, die in der Regel nicht berücksichtigt werden, da diese im Jahresverlauf massiv schwanken können, von weniger als 1% bis fast 100%. Allerdings ist Wasserdampf mengenmäßig nur in der Troposphäre relevant. In der Stratosphäre wird er schnell durch die UV-Strahlung in seine Bestandteile zerlegt. Aber dort ist er wesentlich klimawirksamer als in der Troposphäre. Tatsächlich ist dessen Zerlegungsprodukt OH (Hydroxyl) ein wichtiger Bestandteil der Tropo- und Stratosphäre, der beim chemischen Abbau fast aller Spurengase eine wichtige Rolle hat. Deshalb wird OH auch flapsig als das „Waschmittel“ der Atmosphäre bezeichnet. Wasserdampf bildet wegen seiner Menge das wichtigste Treibhausgas. Mit seinem Volumenanteil von im Mittel 2,6% ist es für ca. 62% des Temperaturanstieges bzw. für 20,6°C verantwortlich. Das nächsthäufige Infrarotstrahlung absorbierende Gas in der Atmosphäre ist Kohlendioxid. Bis 1900 hatte es einen Anteil von 0,03%. Dieser ist inzwischen auf 0,04% angestiegen. Sein Anteil am natürlichen Treibhauseffekt, d.h. bis vor ca. 100 Jahren, beträgt ca. 6°C. Dann tragen noch in geringem Maße nicht stratosphärisches Ozon, Lachgas und Methan zu den insgesamt 32°C bei.

Das wesentliche ist, dass Wasserdampf wegen seiner Häufigkeit zwar den größten Beitrag leistet, aber gerade die komplexeren Spurengasmoleküle, wegen ihrer wesentlich größeren Fähigkeit, die Atome in Schwingungen zu versetzen, wesentlich mehr Infrarotstrahlungsenergie absorbieren können. Relativ zu einem Molekül CO₂ kann ein Wasserdampfmolekül nur ein 25stel der Strahlungsenergie absorbieren, ein Methanmolekül aber 25 mal soviel, ein Lachgasmolekül etwa 150 mal so viel und ein bodennahes Ozonmolekül etwa 3000 mal soviel. Das waren die

Verhältnisse bis etwa in die 1980er Jahre. Die Unterschiede liegen einmal in der Fähigkeit, Energie aufzunehmen, zum anderen aber auch in der unterschiedlichen Verweilzeit in der Atmosphäre. Je länger ein Molekül dort präsent ist und nicht abgebaut wird, desto öfter kann es tagsüber Infrarotstrahlung absorbieren. Daher bestimmt sich die Treibhauswirksamkeit eines Gases aus der Anzahl der möglichen Schwingungsformen und der Verweilzeit in der Atmosphäre.

4. Prinzip des Treibhauseffektes

4.2 Der anthropogene Treibhauseffekt(1)

Die menschlichen Aktivitäten beeinflussen die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. Die Zunahme der CO₂-Konzentration seit 1900 von 290 ppm (0,029%) auf inzwischen über 400 ppm (0,04%), der Methankonzentration (von 700 ppb um das Jahr 1900 auf 1850 ppb oder 0,00019%), der Lachgaskonzentration und einiger Fluorkohlenwasserstoffe – diese tragen je Molekül teilweise mehr als 10000 mal soviel zum Treibhauseffekt bei wie Kohlendioxid – hat in den letzten Jahren die Temperatur gegenüber dem Mittelwert von ca. 1900-1980 um ein gutes Grad angehoben. Das mag wenig erscheinen im Verhältnis zu den 32° des natürlichen Treibhauseffektes, aber wesentlich ist einerseits die Dynamik des Prozesses, eben die Tatsache, dass nur ganz wenige Moleküle hier ausschlaggebend sind und dass vor allem menschliche Aktivitäten für die Anreicherung dieser Moleküle ursächlich sind.

[Zur Erinnerung: Die Atmosphäre der Venus enthält 95-97% Kohlendioxid, die mittlere Oberflächentemperatur beträgt 460°C. Wäre die Venus ohne Atmosphäre, so betrüge die Oberflächentemperatur etwa 320K, also 50°C].

Ein wichtiger Aspekt hierbei ist auch, dass die natürlichen Emissionen sich über die lange Entwicklung mit langsamen Veränderungsraten in einem fast-Gleichgewicht befinden. Das heißt, diese haben sich über die Zeit soweit in der Atmosphäre angereichert, dass die jährlichen Emissionen mit den Senken, also der jährlich abgebauten Menge im Gleichgewicht sind. Bei troposphärischem Wasserdampf sind das wenige Tage. Bei Kohlendioxid wenige Jahre und bei Methan etwa 8 Jahre.

4. Prinzip des Treibhauseffektes

4.2 Der anthropogene Treibhauseffekt (2)

Im Unterschied zu den jährlichen natürlichen Emissionen (Short Cycle Biomass Burning Emissions vgl. http://edgar.jrc.ec.europa.eu/part_CO2.php) sind die anthropogenen Emissionen der letzten Jahrzehnte nicht im Gleichgewicht mit dem Abbau. Das heißt, diese reichern sich jedes Jahr stärker in der Atmosphäre an.

Bei troposphärischem Wasserdampf ist das nicht so relevant, da dieser schnell wieder ausgewaschen wird (z.B. bei Regen). Bei Kohlendioxid aber beträgt die typische Verweilzeit der zusätzlichen Mengen im Mittel ca. 100 Jahre. Bei Methan liegen diese im Bereich von 10 Jahren. Abgesehen von Kohlendioxid werden fast alle anderen Spurengase vor allem über chemische Reaktionen mit OH-Radikalen abgebaut und zerlegt. Daher bestimmt die Konzentration der OH-Moleküle auch die Geschwindigkeit des Abbaus dieser Moleküle und damit deren Lebensdauer. Daher konkurrieren aber auch all diese Moleküle um die vorhandenen OH-Radikale. Somit beeinflusst eine Zunahme von Stickoxiden in der Atmosphäre auch indirekt z.B. die Lebensdauer eines Methanmoleküls, da dann mehr OH-Moleküle für den Abbau von NO_x oder N₂O verbraucht werden und damit weniger OH-Moleküle für den Abbau von Methan (CH₄) verfügbar sind. Und umgekehrt.

Dies hat dazu geführt, dass sich in den letzten Jahrzehnten die Lebensdauer von Methan in der Atmosphäre bereits um ca. 20 Prozent verlängert hat. Damit kann ein Methanmolekül aber auch

20% mehr Infrarotstrahlung absorbieren als noch vor 20 oder 30 Jahren. Das schlägt sich z.B. darin nieder, dass die Klimawirksamkeit von Methan, das sog. global warming potential oder GWP, im Vergleich zu einem Kohlendioxidmolekül von dem Faktor 25 Mitte der 90er Jahre auf den Faktor 30 im letzten Bericht des IPCC (International Panel on Climate Change) erhöht hat.
