

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

HERMANN HARDE

1 Einleitung

Der Titel dieses Vortrags steht zugleich für eine der wichtigsten Fragen unserer Zeit, auf die wir möglichst rasch eine verlässliche Antwort finden sollten, um weiteren möglicherweise umweltpolitischen Unfug, der uns jetzt schon sehr teuer zu stehen kommt, zu vermeiden!

Wie sich da so mancher die Lösung der CO₂-Problematik vorstellt, wird vielleicht aus dem musikalischen Beitrag von Frank Ramond „Ich zähl bis drei ...“ ersichtlich [1]. In der entscheidenden Strophe heißt es:

Er dachte: "Hey, das läuft ja prima,
jetzt kümmere ich mich noch ums Klima.

Ihr reduziert jetzt CO₂ -
Und zwar sofort! Ich zähl bis drei!

Die halbe Welt gehorchte blind
doch eines Tages stand da'n Kind.

Er zählte: "Eins, zwei", es rief: "Drei!"
Der ganze Zauber war vorbei ...

Eins, zwei ... und alle riefen: Hau bloß ab.
Eins, zwei ... das hat danach nie mehr geklappt,
weil dieser Trick nur funktioniert,
wenn keiner weiß, was bei 3 passiert!

Es wäre in der Tat toll, wenn man nur bis 3 zählen müsste und der ganze faule Zauber um das CO₂ wäre vorbei. Es heißt hier abschließend: „weil dieser Trick nur funktioniert, wenn keiner weiß, was bei 3 - im übertragenen Sinn bei Verdopplung von CO₂ - wirklich passiert! Es wird also höchste Zeit, eine möglichst verlässliche Antwort und reale Einschätzung auf diese Frage zu finden, die sich nicht an irgendwelchen Spekulationen oder möglichen Vorteilsnahmen orientiert, sondern sich ausschließlich aus fundierten wissenschaftlichen Kriterien ableitet.

Der Weltklimarat (*IPCC – Intergovernmental Panel of Climate Change*) vertritt in seinen Veröffentlichungen (Assessment-Reports) von mehreren 1000 Seiten Umfang hierzu bereits eine klare Position, dass durch den vom Menschen verursachten CO₂-Ausstoß eine Erwärmung von 3-6°C bis zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten ist, wenn in den nächsten Jahren keine drastische Reduzierung der CO₂-Emissionen erfolgt. All dies ist verbunden mit Prognosen zu einer bevorstehenden Klimakatastrophe, wie sie die Welt noch nicht gekannt hat. Horrormeldungen über eine Bevölkerungsexplosion und eine bevorstehende Hungersnot in den 80er Jahren, das Waldsterben oder das Ozonloch sind harmlos gegen die prognostizierten Klimafolgen. Dies hat zu einer der weltweit größten Regulierungen und internationalen Verträgen geführt mit weitreichenden Auswirkungen auf die Energiepolitik, Industrie und das gesamte wirtschaftliche Leben, insbesondere verbunden mit strengen Forderungen zur Reduzierung von Treibhausgasen und Sanktionen der Industriestaaten. Daher ist dies zu einer Frage des besonderen öffentlichen Interesses geworden.

So entstehen aus dem Kyoto-Abkommen für die EU nach Rechnungen der EU-Klimaschutzkommissarin Connie Hedegaard in den nächsten 40 Jahren schätzungsweise Belastungen von 11 Bill. € [2], um die im Klima-Schutz-Paket 2008 festgelegten Ziele für die CO₂-Einsparungen erreichen zu können. Dies sind bis 2050 jeweils 270

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Mrd. €/Jahr, für Deutschland entsprechend ca. 80 Mrd. €/Jahr, also für jeden deutschen Bürger 1.000 €/Jahr.

Allerdings werden die von offiziellen Institutionen wie dem Weltklimarat publizierten Daten und die daraus abgeleiteten dramatischen Prognosen mehr und mehr von Wissenschaftlern und Klimaexperten in Zweifel gezogen oder kritisch hinterfragt. Ebenso stößt die massive Einflussnahme auf Politik und öffentliche Institutionen, teils verbunden mit möglichen eigenen Interessen, auf zunehmende Kritik. In der Öffentlichkeit und in den Medien hat dies mittlerweile zu einem regelrechten Glaubenskrieg zwischen Alarmisten und Skeptikern in unserer Gesellschaft geführt mit massiven gegenseitigen Schuldzuweisungen.

Ich bin kein Klimawissenschaftler, aber habe mich mit der Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung in der Atmosphäre ausführlicher beschäftigt, insbesondere mit der Absorption von Strahlung durch die Treibhausgase. Daraus entstanden auch bei mir Zweifel an einigen Prognosen, denen ich daher etwas genauer nachgegangen bin. Bevor ich hierauf genauer eingehe, zunächst ein paar allgemeine Anmerkungen zum CO₂ und zum Treibhauseffekt.

2 Bedeutung von CO₂ für unser Ökosystem

Aus der Schule wissen wir, CO₂ ist ein unsichtbares, geruchloses und geschmackloses Gas. Wir kennen es von kohlensäurehaltigen Getränken, Feuerlöschanlagen, als Kältemittel in Klimaanlage und Wärmepumpen, in Backhefe als Treibmittel, als Lasergas oder als Endprodukt bei Verbrennungsvorgängen.

Aus der Presse und teils offiziellen Berichten entnehmen wir, CO₂ ist ein gefährliches, schädliches und gar toxisches Gas. Es ist verantwortlich für den grauen Smog über Städten, die weißen Wolken aus Kühltürmen, den schwarzen Rauch aus Schornsteinen (Abb. 1) und vor allem für die globale Erwärmung als Klimakiller Nr. 1.



Abb. 1: Duisburg in den 60er Jahren: Qualmende Schornsteine als Beleg, dass CO_2 die Umwelt schädigt.

Kaum jemand weiß aber um die für unser Leben so bedeutsame Einbindung dieses Gases in den Kreislauf zwischen autotrophen und heterotrophen Organismen (siehe Abb. 2).

So nehmen Pflanzen, Algen und einige Bakterien Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre auf und wandeln dieses durch Photosynthese bei Aufnahme von Wasser in Kohlehydrate wie Glucose um. Dieser Prozess setzt gleichzeitig Sauerstoff aus der Zersetzung von Wasser frei.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

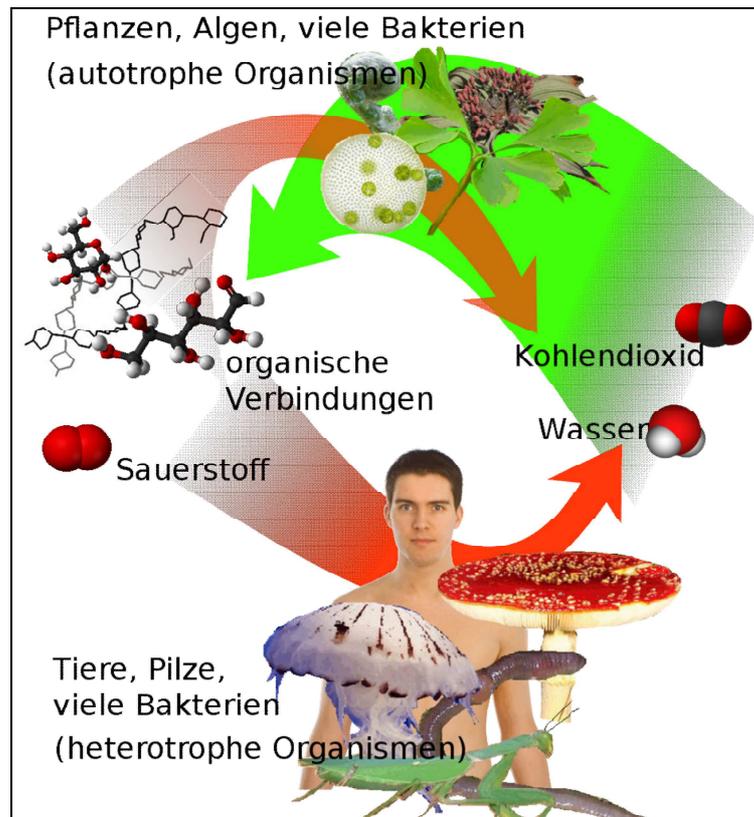


Abb. 2: Auto- und heterotropher Zyklus: CO₂ als Energieträger und Rohstoff aller Biomasse unseres Ökosystems.
Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Autotrophie>

Die entstehenden Kohlehydrate dienen als Energieträger und Baustoff für alle höherwertigen biochemischen Substanzen wie Polysaccharide, Nucleinsäuren und Proteine. Kohlenstoffdioxid stellt damit den Rohstoff für die Bildung aller Biomasse in der Primärproduktion unseres Ökosystems dar.

Umgekehrt erfolgt der Abbau von Biomasse durch Atmung von Tieren, Pilzen und vielen Bakterien wieder durch Bildung von Kohlenstoffdioxid bei gleichzeitigem Verbrauch des vorher freigesetzten Sauerstoffs, also gerade gegenläufig zum Prozess der Photosynthese.

Auch wir sind in diesen heterotrophen Prozess eingebunden. Mit jedem Atemzug geben wir dabei CO₂ an die Umgebung ab: In der

eingeatmeten Luft sind 0,4 ‰, im Atem mehr als 4 ‰. Dies entspricht einer Anreicherung mit jedem Atemzug um das 100-fache. Pro Tag erzeugen wir so etwa 1 kg an CO₂, bei 7 Mrd. Menschen sind dies 7 Mrd. kg /Tag oder 2,5 Mrd. t /Jahr.

Aus Abb. 3 ist zu ersehen, welche unterschiedlichen physiologischen Auswirkungen CO₂, abhängig von der Konzentration, auf unseren Organismus hat. Unterhalb von 3 ‰ gibt es noch keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen, aber mit einer Konzentration, die der ausgeatmeten Luft entspricht, kann bereits eine leichtere Narkose eingeleitet werden. Über 8 ‰ an CO₂ führt dies zunächst zur Ohnmacht und bei längerer Einwirkzeit (größer 1 h) zum Tod.

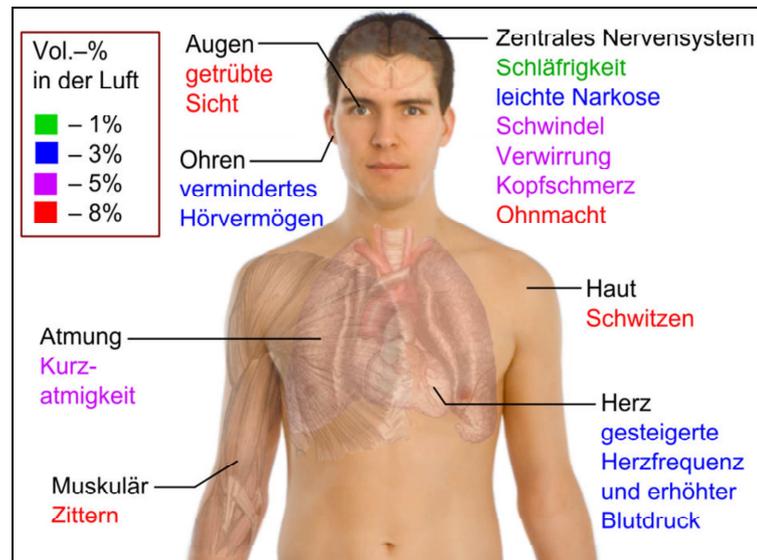


Abb. 3: Physiologische Wirkung von CO₂ auf den menschlichen Organismus. Quelle: <http://de.wikipedia.org>

Bei einer großen Zahl von Pflanzen dagegen fördert eine erhöhte Konzentration das Wachstum. So wurde in Versuchsreihen festgestellt, dass dies mit dem heute vorliegenden CO₂-Gehalt in der Luft, der gegenüber dem vorletzten Jahrhundert um 35 ‰ zugenommen hat, zu einer Ertragssteigerung von ungefähr 25 ‰ führt. Daher wird

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

in Treibhäusern z.T. CO₂ eingeleitet, um das synthetisierte CO₂ nachzuliefern und so das Wachstum zu steigern (siehe auch Ref. 3).

Der CO₂-Gehalt ist weder von der Konzentration noch dem Inhalt eine fixe Größe, sondern erneuert sich kontinuierlich durch die auto- und heterotrophen Prozesse. Jährlich werden so ca. 750 Mrd. t erzeugt und etwa auch so viel wieder durch Pflanzen und Ozeane aufgenommen. Das ist rund $\frac{1}{4}$ des in der Atmosphäre vorkommenden CO₂, das so ständig erneuert wird.

Der anthropogene Anteil hieran beträgt etwa 4,5 % (34 Mrd. t), wovon wiederum gut 7 % aus menschlicher Atmung stammen. An der weltweiten Emission ist die BRD derzeit gerade einmal mit 2,4 % (800 Mio. t) beteiligt [4].

In der Atmosphäre befinden sich heute ca. 3 Bill. t CO₂. Dies entspricht einer Konzentration von 380 ppm oder 0,38 ‰. Damit ist CO₂ ein Spurengas, nur jedes 3.000ste Molekül ist ein CO₂-Molekül. Selbstverständlich können Gase in dieser oder auch noch deutlich niedrigerer Konzentration ebenso wie Pharmazeutika, Drogen oder Gifte schon in kleinsten Spuren Auswirkungen auf die Umwelt und den Menschen ausüben. Aber CO₂ ist in den vorkommenden Konzentrationen eben kein toxisches Gas, und es bleibt die Frage: Führt ein weiterer Anstieg ebenso wie der einiger anderer Klimagase tatsächlich zu einer so drastischen Änderung unseres Klimas, wie vom IPCC prognostiziert?

Vor 500 Mill. Jahren war die CO₂-Konzentration noch 20x höher (~ 7 ‰) und vor 100 Mio. Jahren ca. 7-8x größer als heute (~ 2,8 ‰). Aus paläoklimatischen Untersuchungen an Eisbohrkernen [5] lässt sich ersehen (Abb. 4),

- dass es immer schon erhebliche Schwankungen in der CO₂-Konzentration gab (oberer Graph), auch ohne das Zutun des Menschen,
- dass diese Zyklen einher gehen mit den Wärme- und Kälteperio-

den auf der Erde (untere Kurve in Abb. 4), die nach allem paläoklimatischen Wissen von der Sonne und der Stellung der Erde zur Sonne (Milanković-Zyklen), vielleicht noch überlagert von Vulkanausbrüchen oder geothermischen Ereignissen verursacht worden sein müssen und

- dass es bisher keine Anzeichen dafür gibt, dass sich die CO_2 -Konzentration in den zurückliegenden tausenden Jahren von sich aus geändert und eine Temperaturänderung nach sich gezogen hätte. Vielmehr ist umgekehrt davon auszugehen, dass eine Erwärmung zur teilweisen Freisetzung der *Bill. t* an CO_2 und Methan führt, die als Permafrost in Sibirien und Alaska lagern, sowie das in den Weltmeeren gelöste CO_2 teilweise freigesetzt wird. Aktuelle Forschungsergebnisse weisen jedenfalls hierauf hin [6].

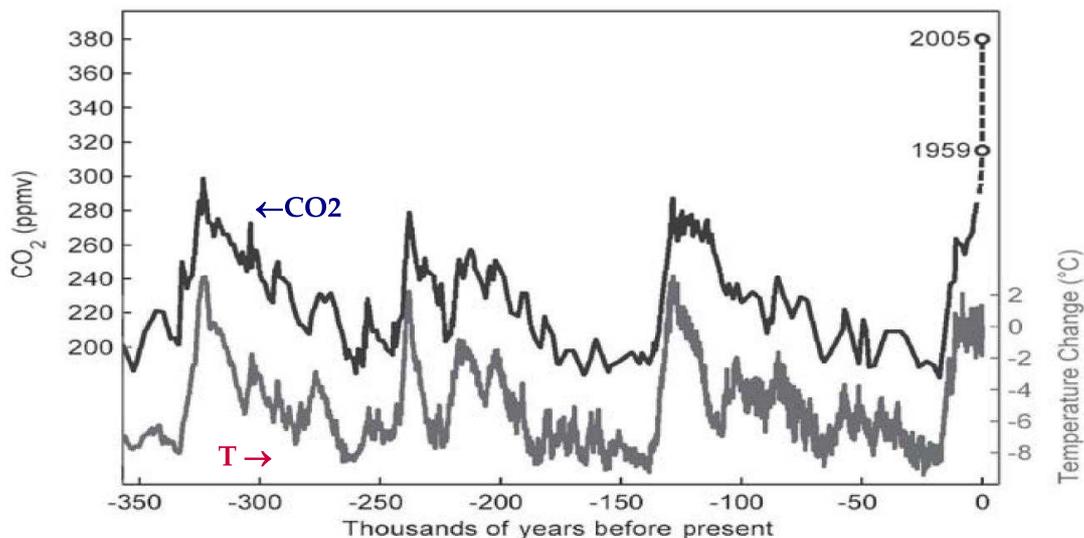


Abb. 4: CO_2 -Konzentration und Temperaturentwicklung über die letzten 350.000 Jahre [5].

Der weitere deutliche Anstieg von CO_2 in Abb. 4 über die letzten Jahrzehnte deutet zunächst auf die ausschließlich vom Menschen verursachten Emissionen hin. Dieser Anstieg geht aber offensichtlich zurück auf ein anderes Messverfahren und einen veränderten Daten-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

satz, der sich nicht mehr aus den Untersuchungen an Eisbohrkernen ableitet, sondern aus direkten Messungen der CO₂-Konzentration in der Luft gewonnen wurde, wie dies erst seit den 50er Jahren genutzt werden kann [7]. Nach neueren Untersuchungen an Blättern von Ginkgo-Bäumen [8] ist durchaus davon auszugehen, dass auch in den letzten *Mio. Jahren* sehr wohl Spitzenkonzentrationen auftraten, die vergleichbar zu denen von heute waren.

Die Diskrepanz zu den Messungen an Eisbohrkernen lässt sich offensichtlich darauf zurückführen, dass als Folge von Diffusionseffekten im Eis größere Schwankungen des CO₂-Gehaltes eher nivelliert und so niedrigere Maximalkonzentrationen vorgetäuscht werden.

Das IPCC macht allerdings für den in den letzten 130 Jahren gemessenen Temperatur-Anstieg von 0.74°C [9] zu 95 % die anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich [10].

3 Atmosphärischer Treibhauseffekt

Der Einfluss von CO₂ sowie einiger weiterer Gase auf das Klima mit einer daraus abgeleiteten Erwärmung der Erdoberfläche geht auf den vieldiskutierten Atmosphärischen Treibhauseffekt zurück. Bei Klimaskeptikern und insbesondere den „Klimaleugnern“ wird dieser Effekt immer wieder angezweifelt oder bestritten. Aus physikalischer Sicht gibt es jedoch keine wirklich stichhaltigen Gründe gegen die Existenz dieses Effektes, lediglich dass er aus verschiedenen Gründen nicht direkt in der Atmosphäre gemessen werden kann (Überlagerung durch Konvektion, Wetteränderungen, Konzentrationsvariationen), sondern aus Einzelergebnissen mit teilweise unterschiedlicher Vorgehensweise abgeleitet werden muss. Ebenso gibt es erhebliche Diskrepanzen über dessen Größe und Einfluss auf eine globale Erwärmung.

Da sowohl die *IPCC*-Rechnungen wie auch die eigenen Betrachtungen sich auf den Treibhauseffekt beziehen, seien hier nochmals die wesentlichen Grundlagen hierzu in Erinnerung gerufen.

Der normale Treibhauseffekt, wie er bei Gewächshäusern zum schnelleren Reifen von Pflanzen genutzt wird, lässt sich darauf zurückführen, dass kurzwellige Sonnenstrahlung die Glasfenster eines Treibhauses weitgehend verlustfrei passieren kann und vom Boden absorbiert wird, der sich hierdurch erwärmt. Vom Boden geht dabei langwellige Infrarotstrahlung aus, die aber die Fenster nicht passieren kann und so im Treibhaus gefangen ist. Dies sorgt für eine weitere Aufheizung, da die Wärme nicht durch Konvektion weggetragen werden kann, und beschleunigt so den Wachstumsprozess.

Dieser Treibhauseffekt wurde erstmals von dem französischen Mathematiker und Physiker Jean Baptist Joseph Fourier um 1824 beschrieben und dabei bereits auf die Atmosphäre übertragen [11]. Knapp 40 Jahre später griff der Engländer John Tyndall Fourier's Überlegungen auf, um hierdurch die Warm- und Kaltzeiten auf der Erde auf Schwankungen in der CO_2 Konzentration, verbunden mit einer weiteren Verstärkung durch Wasserdampf, zurückzuführen [12]. Diese Gedanken wurden von dem schwedischen Nobelpreisträger Swante Arrhenius 1896 weiter verfolgt, der bei einer Verdoppelung der CO_2 -Konzentration eine Erwärmung um $5\text{-}6^\circ\text{C}$ abschätzte [13]. Dabei ging er allerdings von deutlich zu großen Absorptionswerten für das CO_2 aus, dessen Wechselwirkung mit *IR*-Strahlung zu diesem Zeitpunkt noch weitgehend unbekannt war.

Unter dem Atmosphärischen Treibhauseffekt verstehen wir heute, dass das Sonnenlicht die Atmosphäre - wie vorher das Glas - weitgehend verlustfrei passiert und vom Boden absorbiert wird (siehe Abb. 5).

Der Boden heizt sich auf und wirkt seinerseits als thermischer Strahler im infraroten Bereich (dicke rote Pfeile). Diese Strahlung wird dabei von den Treibhausgasen deutlich stärker als die Sonnen-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Strahlung absorbiert. Die angeregten Moleküle strahlen ihrerseits einen Teil der absorbierten Energie in Richtung All und ebenso einen Teil zurück zur Erde (dünne rote Pfeile). Die zum Boden gerichtete Strahlung wird allgemein als Gegenstrahlung bezeichnet und führt dazu, dass sich ebenso wie durch Rückstreuung an Wolken oder durch Reflektion der IR-Strahlung an den Scheiben des Gewächshauses an der Erdoberfläche eine höhere Temperatur einstellt, als dies ohne die rückstreuenden Gase in der Atmosphäre der Fall wäre.

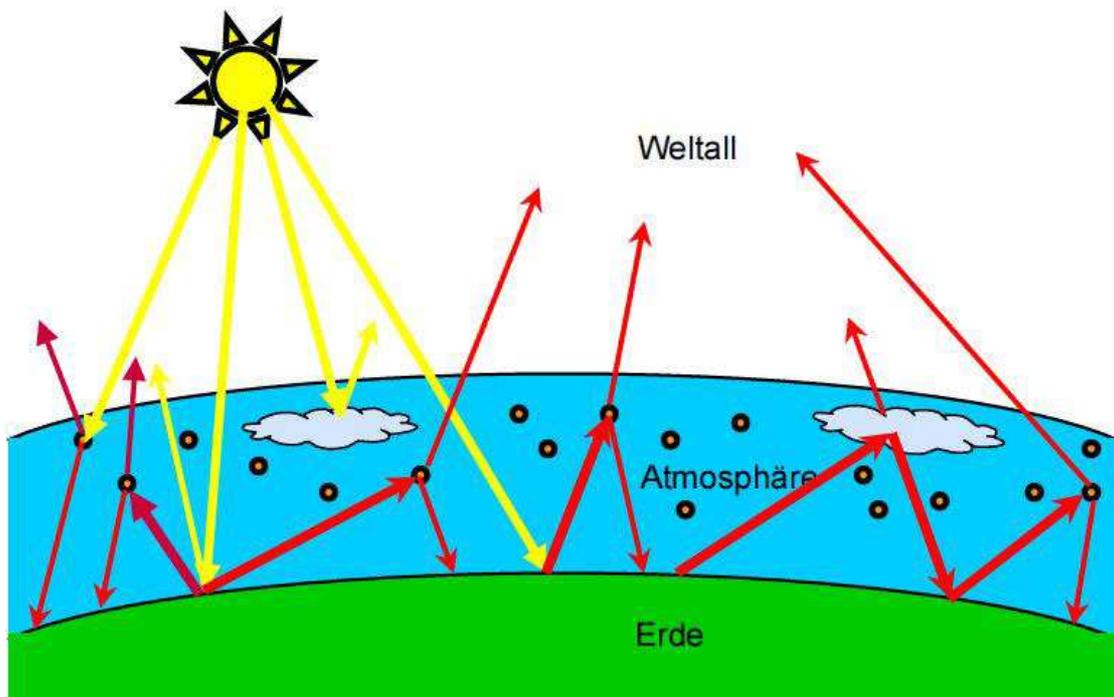


Abb. 5: Darstellung der Strahlungsprozesse zum Atmosphärischen Treibhauseffekt.

Dieser Prozess steht im Gleichgewicht zwischen einfallender und ins All wieder entweichender Strahlung und findet so seit Jahrtausenden statt. Er wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet und bestimmt zusammen mit der Direktaufheizung der Erde, dass die mittlere Erdtemperatur bei gut 15°C liegt und nicht auf -18°C abgekühlt ist.

Unter dem anthropogenen Treibhauseffekt versteht man, dass die Konzentration der Treibhausgase, besonders die des CO_2 , durch menschliche Eingriffe in den letzten Jahrzehnten erhöht worden ist und hieraus die wesentliche Temperaturerhöhung (95%) resultieren soll.

Dabei kommt es im infraroten Spektralbereich nur zu einer Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen mit einem Gas (Rotations-Vibrationsanregungen), wenn die Moleküle des Gases eine asymmetrische Ladungsverteilung besitzen (Dipolmoment) oder diese durch die Strahlung induziert wird und die Strahlung quasi resonant mit den Molekülen wechselwirkt (Anregung auf einem molekularen Übergang).

Es gibt keine Wechselwirkung mit den Edelgasen und eine vernachlässigbare Absorption durch Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle.

Die wichtigsten Treibhausgase mit den jeweiligen Konzentrationen in der Atmosphäre sind in Tabelle 1 aufgeführt. Nur diese Gase werden in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

Tabelle 1: Berücksichtigte Gase zur Berechnung des Atmosphärischen Treibhauseffekts.

Treibhausgas	Konzentration (ppm)
Wasserdampf: Tropen	22.900
Mittl. Breiten	7.253
Polarregionen	2.359
Kohlenstoffdioxid	380
Methan	1,8
Ozon zwischen 15 – 47 km	6,0

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Um die Größe des Atmosphärischen Treibhauseffektes und damit auch einen möglichen Beitrag des anthropogenen Anteils bestimmen zu können, sind aufwändigere spektroskopische Rechnungen erforderlich, auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden kann, aber doch einige Punkte angedeutet werden sollen (weitere Details siehe Ref. 14).

4 Spektroskopische Rechnungen

Die Rechnungen zum Treibhauseffekt umfassen sowohl die kurzwellige Absorption des Sonnenspektrums als auch die Infrarotabsorption der terrestrischen Strahlung und Re-Emission durch die Treibhausgase. Insgesamt werden über 1 Mio. Linien dieser Gase herangezogen, die den kurz- wie langwelligen Spektralbereich überdecken.

Von jedem Übergang werden die spezifischen Daten wie Übergangsfrequenz, Linienintensität, Linienverbreiterung durch Eigen- und Umgebungsdruck sowie die Temperaturabhängigkeit dieser Größen benötigt, die von einer Datenbank abgerufen werden (*HITRAN08* – Datenbank [15]). Mit diesen Daten ist dann für jede dieser Linien das individuelle Linienprofil zu berechnen, um hieraus das Gesamtspektrum zu konstruieren.

Dabei ändern sich die Bedingungen in der Atmosphäre ganz erheblich mit der geographischen Breite und der Höhe über dem Erdboden. Deswegen sind solche Rechnungen für unterschiedliche klimatische Zonen, die Tropen, gemäßigten Breiten und Polargebiete durchzuführen (Abb. 6), über die sich vor allem die mittlere Temperatur und damit besonders der Wasserdampf in der Atmosphäre verändern.

Ebenfalls ändert sich der Einfallswinkel der Sonne und damit der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre. Hierzu wird die Erdoberfläche wie ein abgestumpftes Ikosaeder, also wie ein überdimensionaler Fußball in Hexagonal- und Pentagonalflächen zerlegt (Abb. 7), um

so die Berechnungen auf eine endliche Zahl von Einfallswinkeln begrenzen zu können.

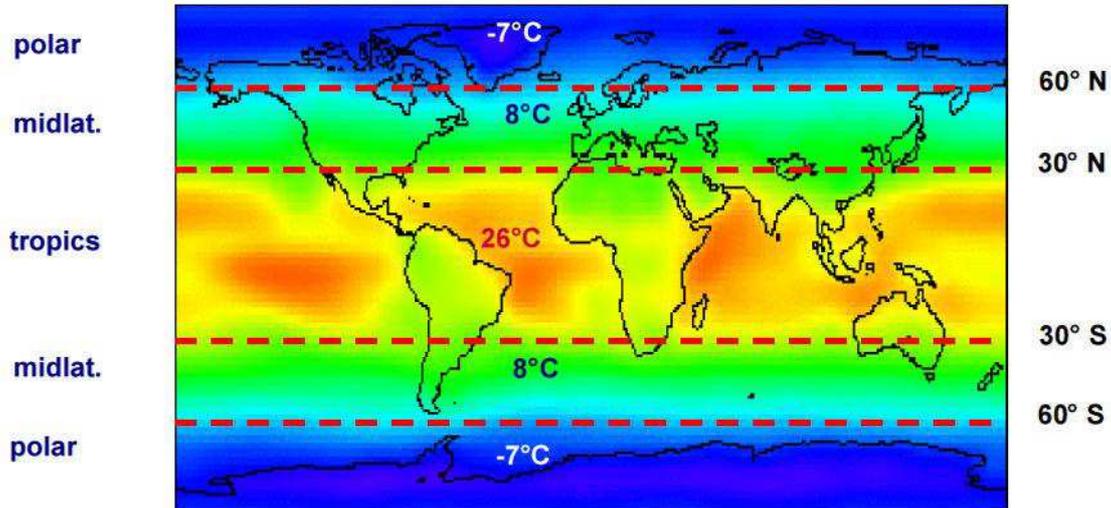


Abb. 6: Aufteilung in Klimazonen.

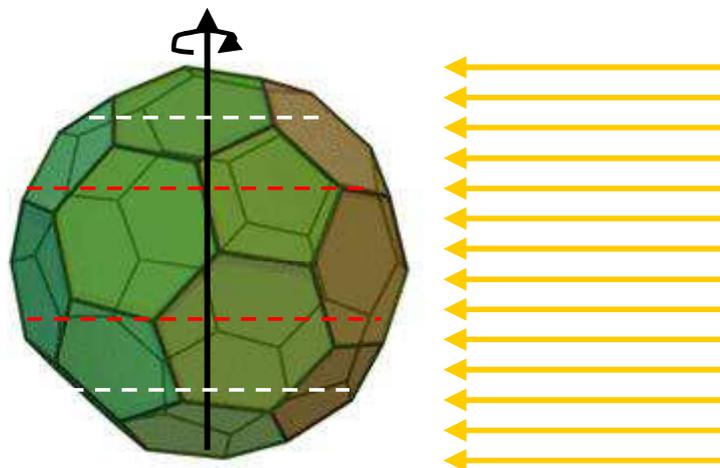


Abb. 7: Erde wird als abgestumpftes Ikosaeder (Bucky-Ball) betrachtet.

Und vor allem ändert sich die Dichte und Temperatur der Gase auch mit der Höhe über dem Erdboden, für Wasserdampf und Ozon auch ganz erheblich die Konzentration im Vergleich zu Stickstoff- und

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Sauerstoff-Molekülen. Deshalb wird die Atmosphäre hierzu in bis zu 228 Schichten unterteilt, mit den dort jeweils herrschenden Bedingungen für die über 1 Mio. Linien die Teilabsorption in einer Schicht berechnet und schließlich über alle Schichten summiert (Abb. 8).

Um eine ausreichende spektrale Auflösung zu erreichen, die vor allem für die Erfassung der Flankenabsorption und den spektralen Überlapp der Gase von Bedeutung ist, wird das Gesamtspektrum in Teilbereiche aufgeteilt und erfordert mehr als 10.000 Einzelspektren, die jeder wiederum eine Berechnung über die zugrunde gelegten Höhenlagen beinhaltet.

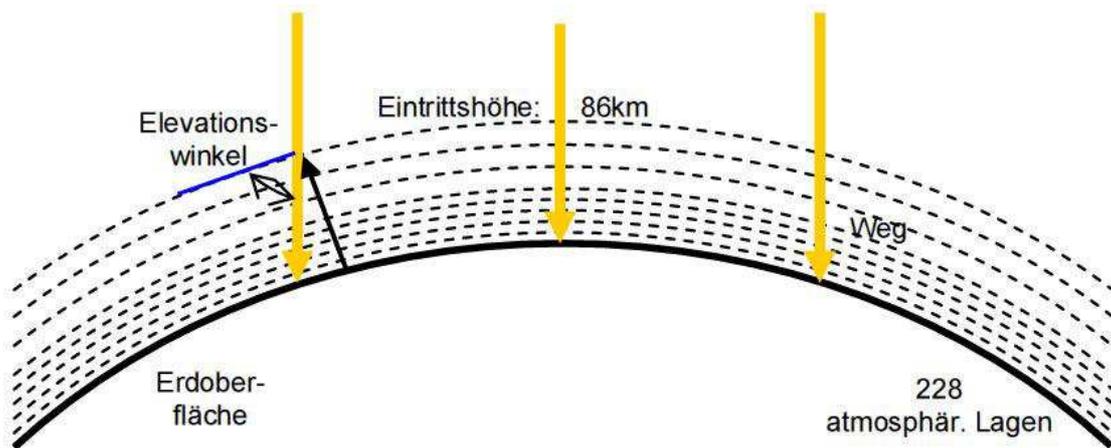


Abb. 8: Aufteilung der Atmosphäre in bis zu 228 Kugelschalen (Lagen).

Ein Beispiel für die Absorption des Sonnenlichts durch die Atmosphäre ist in Abb. 9 dargestellt. Die gestrichelte Kurve repräsentiert die nach Planck berechnete spektrale Intensität der Sonne als Funktion der Wellenlänge mit einem Maximum im grünen Spektralbereich bei einer Oberflächentemperatur der Sonne von 5.500 °C.

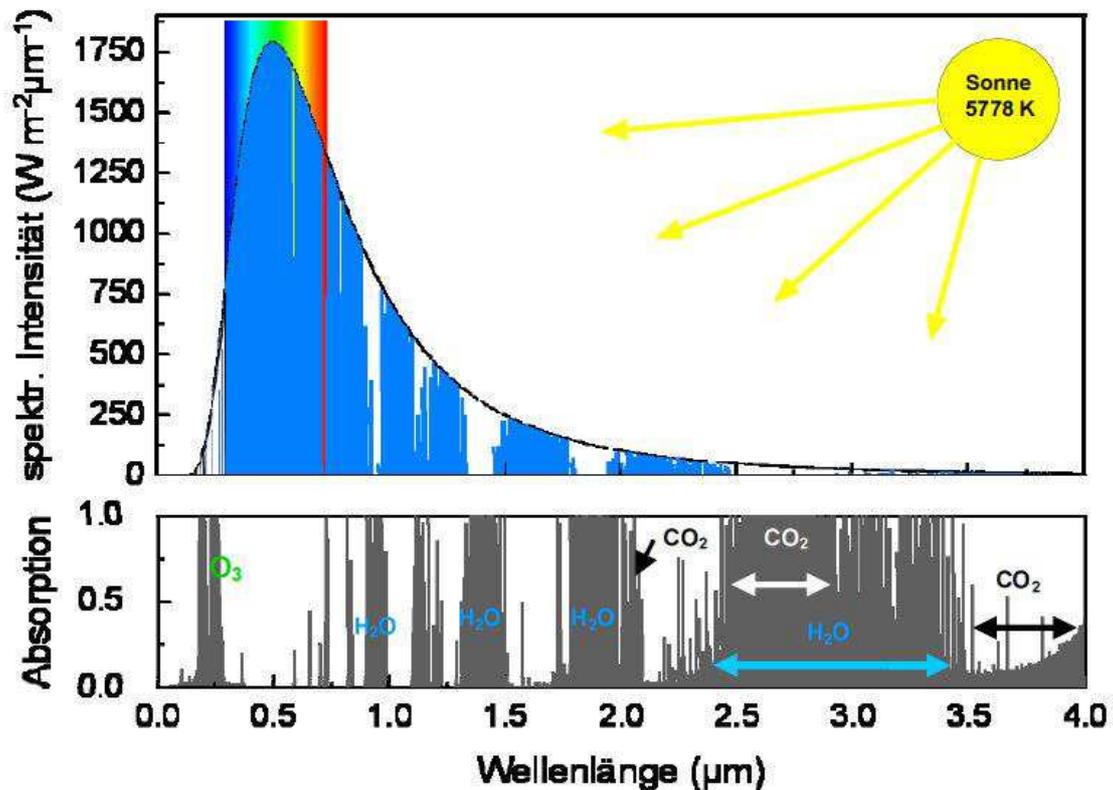


Abb. 9: Absorption des Sonnenlichts in der Atmosphäre durch H_2O , CO_2 , CH_4 und O_3 .

Darunter ist die Absorption durch die Atmosphäre in den Tropen dargestellt, verursacht durch CO_2 , CH_4 , O_3 und vor allem durch H_2O -Dampf. Die Absorption erfolgt auf scharfen Linien, die sich in einigen Spektralbereichen zu breiten, intensiven Bändern erweitern und die auf diesen Wellenlängen einfallende Strahlung zu 100% absorbieren. Im transmittierten Spektrum erscheint dies als Einbruch, da die Eingangintensität auf diesen Wellenlängen gedämpft oder komplett weggefressen wurde.

Die Gesamtabsorption als Integral über alle Wellenlängen und unter Berücksichtigung des spektralen Überlapps beträgt 18,7 %, wobei der Wasserdampf in tropischen Breiten allein bereits 13,1 % beisteuert. Das CO_2 für sich würde hierbei 2,2 % liefern, aufgrund der teilweise deutlichen Überlappung mit gesättigten Wasserlinien redu-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

ziert sich dessen Anteil aber auf 0,5%. Das sind nur 2,7 % der Gesamtabsorption. Den restlichen Anteil steuern CH₄ mit 0,2 % und O₃ mit 5 % bei. Eine Dämpfung des Sonnenlichts durch Mie-Streuung an Wassertröpfchen oder Wolken sowie durch Rayleigh-Streuung an den Luftmolekülen ist hierin nicht berücksichtigt.

Ebenso ist das Absorptionsverhalten der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung durch die Atmosphäre zu untersuchen. Abb. 10 zeigt als Einhüllende das vom Erdboden emittierte Spektrum für eine mittlere Bodentemperatur um 15°C mit einem Maximum um 10µm.

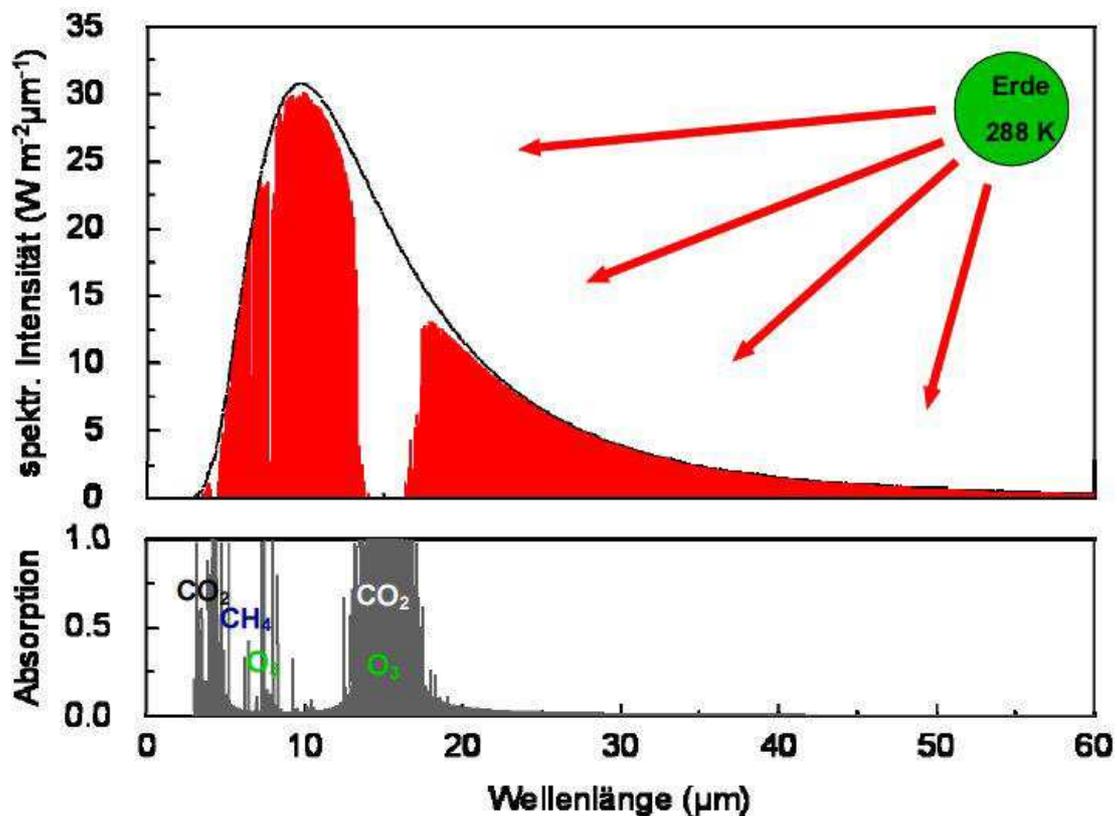


Abb. 10: Terrestrische Strahlung für eine Bodentemperatur von 15°C mit Absorption durch CO₂, CH₄ und O₃.

Dieses Spektrum, hier zunächst ohne Wasserdampf, wird besonders intensiv von CO₂ um 4 µm und als breite Bande um 15 µm absorbiert und führt zu den deutlich sichtbaren Einbrüchen im Transmissions-

spektrum. Die Absorption beträgt 24,1 %. Hinzu kommen noch 2 % durch Methan und 5,2 % durch O_3 .

Mit Wasser, das allein bereits einen Anteil von 77,7 % beisteuert, wird die Atmosphäre bis auf den Zentralbereich um $10\mu\text{m}$ vollständig undurchsichtig, und die Gesamtabsorption unter Berücksichtigung von spektralen Überlagerungen steigt auf 85,3 % an (Abb. 11).

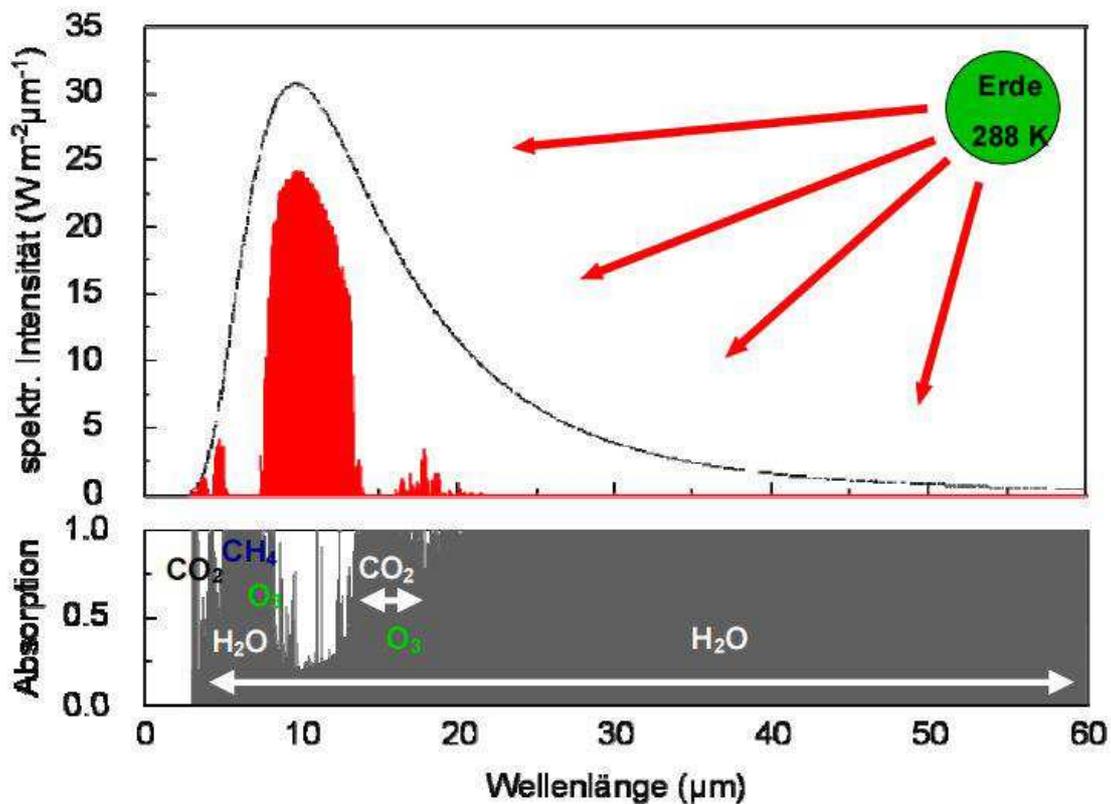


Abb. 11: Absorption der terrestrischen Strahlung durch H_2O , CO_2 , CH_4 und O_3 .

Ohne CO_2 wären dies 80,7 %, woraus folgt, dass der Anteil von CO_2 von ursprünglich 24,1 % auf 4,6 % zurückgedrängt wird.

Mit wachsender CO_2 -Konzentration zeigt sich dabei eine deutliche Sättigung, wie dies aus Abb. 12 ersichtlich wird und in ähnlicher Weise auch für den kurzwelligen Bereich auftritt. So erhöht sich bei

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Verdopplung des CO₂-Gehalts die Absorption nur noch um 1.2 %. Dies entspricht einer Zunahme von 1.4 % der Gesamtabsorption.

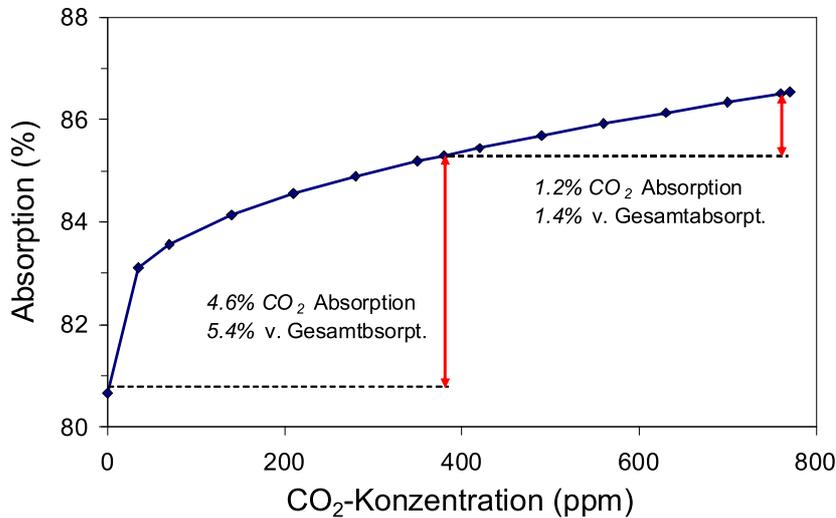


Abb. 12: Globale Absorption der terrestrischen Strahlung als Funktion der CO₂-Konzentration.

Es ist also festzustellen, dass der starke spektrale Überlapp insbesondere mit Wasser den Einfluss von CO₂ erheblich dämpft und dass die Sättigung auf den starken CO₂-Banden zu dem deutlich unterproportionalen Anstieg führt.

Für eine gesamtklimatische Betrachtung reicht es nun allerdings noch nicht ganz aus, nur die Absorption in der Atmosphäre zu betrachten, denn ebenso wie die Erde strahlen auch die Gase entsprechend ihrer jeweiligen Temperatur die absorbierte oder über Stöße aufgenommene Energie wieder an die Umgebung ab. Dabei emittieren sie im *IR* auf den gleichen Frequenzen, auf denen sie auch absorbieren, denn genauer betrachtet ist die von den Molekülen ausgehende Wärmestrahlung nichts anderes als spontane Emission nach einer Anregung.

Strahlung, die sich in einer Schicht ausbreitet, wird einerseits durch Absorption gedämpft, gleichzeitig überlagert sich aber die in

alle Richtungen abgestrahlte spontane Emission (siehe Abb. 13). Die Netto-Änderung errechnet sich dann aus der spektralen Ausgangsintensität I_ν^{i-1} der $(i-1)$ -ten Schicht, deren Dämpfung in der i -ten Schicht (vorgegeben durch den Absorptionskoeffizienten $\bar{\alpha}^i(\nu)$ auf der Frequenz ν) sowie der hinzukommenden Emission (ebenfalls abhängig vom Absorptionskoeffizienten sowie der Kirchhoff-Planck-Funktion $B_\nu^i(T^i)$ bei der Temperatur T^i).

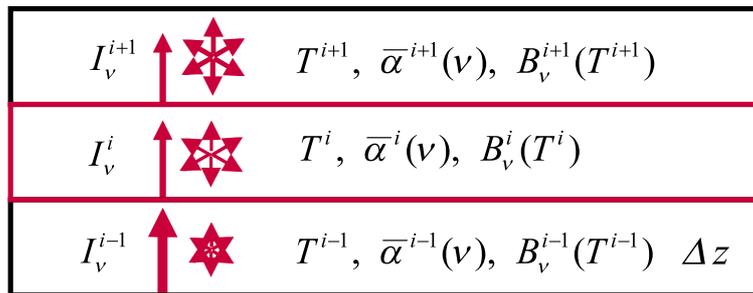


Abb. 13: Schrittweise Berechnung der spektralen Intensität nach dem Strahlungs-Transfer-Modell.

Da sich die Absorption und ebenso die Emission von Höhenlage zu Höhenlage mit der Temperatur und Dichte der Gase ändern, ist dies wieder Schicht für Schicht und für alle Ausbreitungsrichtungen zu bestimmen und schließlich über den Gesamtweg durch die Atmosphäre numerisch zu integrieren.

Diese Vorgehensweise zur Berechnung der Strahlausbreitung in der Atmosphäre ist bekannt als Strahlungs-Transfer-Modell und geht auf eine Grundgleichung zurück, die von dem Göttinger Astrophysiker Schwarzschild bereits 1906 aufgestellt wurde [16] (zur Ableitung der Strahlungs-Transfer-Gleichung aus den Einstein'schen Betrachtungen „Zur Quantentheorie der Strahlung“ sowie einer Verallgemeinerung für niedrige und hohe Stoßraten in der Atmosphäre siehe auch Ref. 17).

Ein Beispiel für die von der Erde und Atmosphäre ausgehende Strahlung, wie sie von einem Satelliten in 20 km Höhe bei wolkenfrei-

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

em Himmel über der Polarregion gemessen wird, ist aus Abb.14a zu
ersehen.

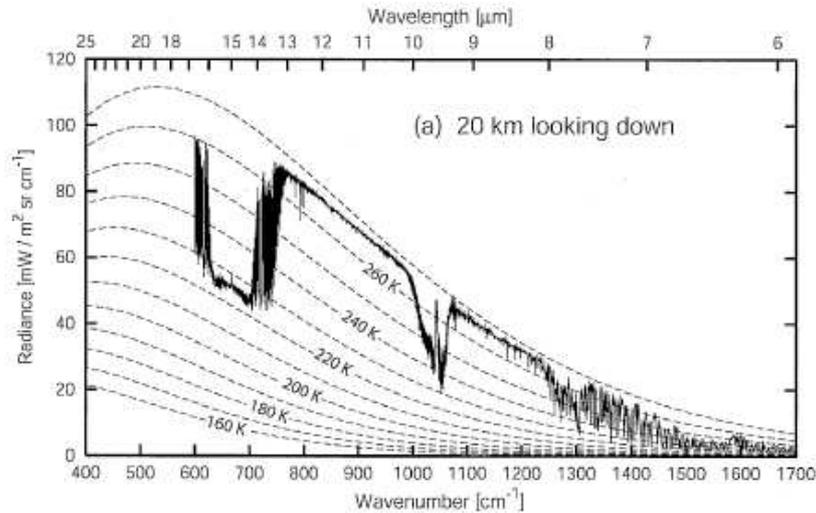


Abb. 14: a) Satelliten-Messung der von der Erde und Atmosphäre ausgehenden Strahlung aus 20 km Höhe über der Polarregion bei wolkenfreiem Himmel [18].

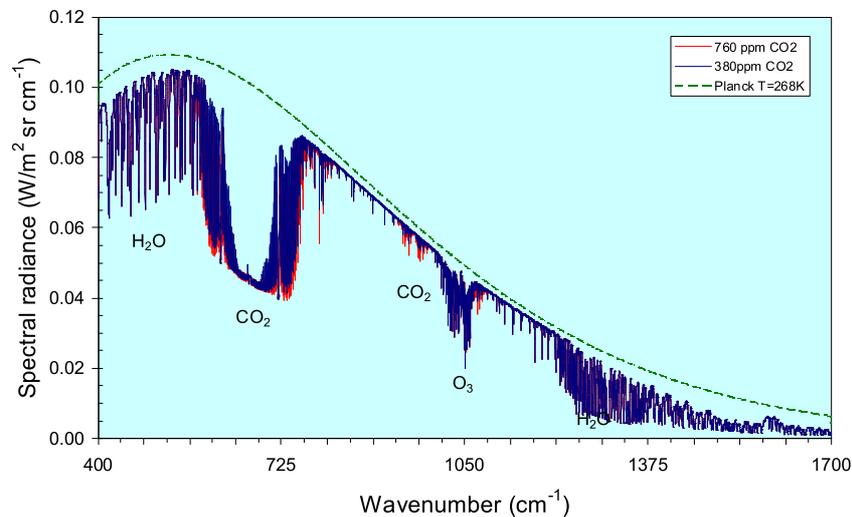


Abb. 14: b) Simuliertes Spektrum bei der Bodentemperatur von 266 K mit 380 ppm (blauer Graph) und 760 ppm (roter Graph) CO₂-Konzentration [19].

Von besonderem Interesse ist dabei der erste starke Einbruch um 650 cm^{-1} bzw. $15\mu\text{m}$, der seine Ursache in der Absorption durch die breite CO_2 -Bande in diesem Bereich hat. Trotz der vollständigen Absorption der vom Boden ausgehenden Strahlung auf diesen Wellenlängen über nur einige 10 m geht die Intensität nicht auf Null zurück, sondern bildet ein breiteres Plateau aus, das sich erklärt aus der Eigenemission der Atmosphäre durch die CO_2 -Moleküle mit einer Temperatur von etwa 225 K (Tropopause).

Der Vergleich mit einem berechneten Spektrum (siehe Abb. 14b) zeigt, dass solche Messungen mittlerweile gut verstanden werden und mit dem Strahlungs-Transfer-Modell recht zufriedenstellend nachgebildet werden können.

Welchen Einfluss eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration auf die Strahlungsbilanz hat, ist aus dem Vergleich des blauen (380 ppm) und roten Graphen (760 ppm) in Abb. 14 b zu ersehen. Die Tiefe des Trichters verändert sich überhaupt nicht und die Breite nur relativ geringfügig. Dies resultiert aus der deutlichen Sättigung in der Absorption und ebenso in der Emission.

Lediglich in den Flanken und den sehr schwachen Absorptionsbanden um 900 cm^{-1} zeigen sich leichte Veränderungen, die dazu führen, dass bei erhöhter Konzentration als Nettobetrag eine leicht reduzierte Abstrahlung von Erdoberfläche und Atmosphäre zu verzeichnen ist.

Dieser Sachverhalt ist in Abb. 15 nochmals schematisch dargestellt. Bei einfacher CO_2 -Konzentration stellt sich eine Bodentemperatur T_0 ein mit einer daraus resultierenden terrestrischen Abstrahlung, die im Gleichgewicht zu der von der Sonne zugeführten Strahlungsleistung steht.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

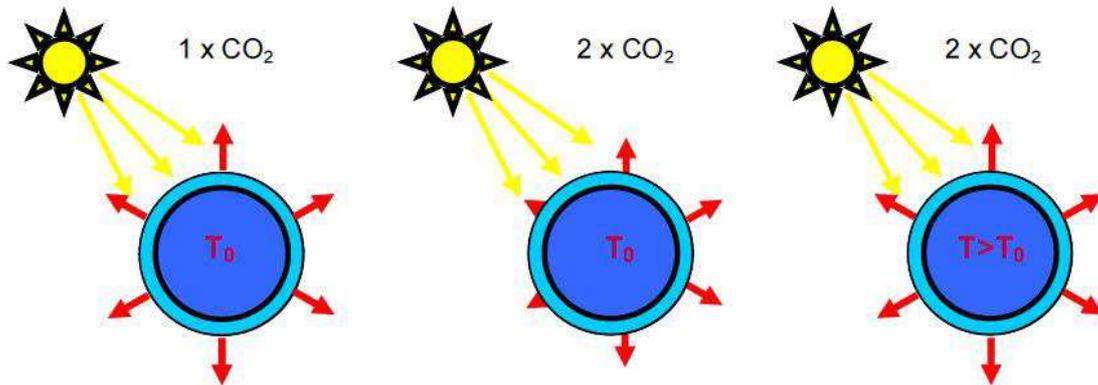


Abb. 15: Schematische Darstellung zur Erderwärmung, verursacht durch den CO₂-Strahlungsantrieb.

Bei doppeltem CO₂-Gehalt in der Atmosphäre kommt es dann zunächst zu einer reduzierten Abstrahlung und führt bei weiterhin konstanter Heizleistung durch die Sonne zu einer prinzipiell zusätzlichen Aufheizung der Erde, bis diese eine Temperatur angenommen hat, durch die die Strahlungsverluste gerade wieder kompensiert werden.

Eine solche Änderung, verursacht durch eine externe Störung, in diesem Fall durch das CO₂, wird als Strahlungsantrieb (radiative forcing) bezeichnet, der das Klimagleichgewicht verändert. Er wird angegeben in W/m^2 und üblicherweise berechnet in der Tropopause (~12,5 km Höhe) als Netto-Betrag aus der einfallenden sowie auslaufenden Strahlungsbilanz, kurzwellig wie langwellig.

5 IPCC-Rechenweg

Aus diesem Strahlungsantrieb wird entsprechend dem IPCC-Rechenweg auf die Erderwärmung geschlossen. In Modell-Rechnungen wird dabei bevorzugt eine Verdopplung der CO₂-Konzentration angenommen, um eine einheitliche Basis für Vergleiche dieser Modelle untereinander zu haben. Gleichzeitig macht man sich so frei von Prognosen, wann eine solche Verdopplung eintreten

könnte. Eine unter diesen Gegebenheiten berechnete Erderwärmung wird dann als *CO₂-Klimasensitivität* bezeichnet.

Bei einer Verdopplung von CO₂ geht das IPCC von einem Strahlungsantrieb von $\Delta F = 3.71 \text{ W/m}^2$ aus [20], wobei sich dieser Wert allerdings, abhängig von den zugrunde gelegten Annahmen über den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre sowie der Bewölkung, von Modell zu Modell erheblich unterscheiden kann.

Im Weiteren wird dann von einem sehr einfachen Ansatz ausgegangen, dass nämlich eine Änderung der Erdtemperatur ΔT_E direkt proportional zum Strahlungsantrieb verläuft mit

$$\Delta T_E = \lambda_s \cdot \Delta F .$$

Der Proportionalitätsfaktor λ_s wird als Klimasensitivitätsparameter bezeichnet und z.T. vereinfacht aus der Abstrahlung der Atmosphäre als breitbandiger Planck-Strahler abgeleitet. Abgesehen von dem Umstand, dass die Atmosphäre eben kein solcher breitbandiger Strahler ist, werden hierbei teils sehr unterschiedliche Temperaturen zugrunde gelegt, indem einmal von der Bodentemperatur, in anderen Fällen von einer mittleren Atmosphärentemperatur ausgegangen wird. Ebenso gibt es aber auch umfangreiche Klima-Modellrechnungen, bei denen λ_s direkt ermittelt wird [21]. Die Ergebnisse variieren dabei i.W. zwischen $\lambda_s = 0.25 - 1 \text{ K/(Wm}^{-2}\text{)}$. Für den vereinfachten Fall mit einer effektiven Temperatur der Atmosphäre von 254 K (-19°C, entspricht ~5 km Höhe) ergibt sich für λ_s ein Wert von $\lambda_s = 0,27 \text{ K/(Wm}^{-2}\text{)}$ [21] und zusammen mit dem Strahlungsantrieb von $3,71 \text{ W/m}^2$ hieraus eine Temperaturerhöhung von $\Delta T_E = 1,0 \text{ K}$.

Neben dieser Erwärmung, die gewissermaßen als Basiswert für einen Anstieg bei CO₂-Verdopplung zu interpretieren ist, kann es durch die Temperaturänderung der Erde und der Atmosphäre zu einer Reihe weiterer Sekundäreffekte kommen, die zu einer zusätzlichen Erhöhung oder auch Reduzierung des Basiswertes führen. In den Klimawissenschaften wird in diesem Zusammenhang von sogenannten Rückkopplungseffekten gesprochen.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Eine besondere Rolle kommt hierbei wiederum dem Wasserdampf zu. So ist davon auszugehen, dass mit wachsender Temperatur auch der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zunimmt, dies zu einer erhöhten Absorption und damit wieder zu einer weiteren Erwärmung führt. Aus theoretischen Betrachtungen bei teils sehr unterschiedlichen Annahmen werden für die Wasserdampfrückkopplung Verstärkungsfaktoren zwischen 1,5 und 3 angeführt [22,10].

Noch größere Unkenntnis herrscht über den Einfluss von Wolken. So besteht zwar weitgehend Einigkeit darüber, dass hochstehende Cirrus-Wolken wärmend, tiefliegende Stratus-Wolken dagegen kühlend wirken, aber es gibt unterschiedliche Theorien und teils Beobachtungen darüber, ob mit erhöhter Temperatur sich niedrige Wolken eher auflösen und damit zu einer positiven Rückkopplung - also einer Verstärkung des Treibhauseffekts - führen [23] oder mit dem erhöhten Wasserdampf eher eine vermehrte Wolkenbildung auftreten wird, die eine negative Rückkopplung und damit kühlende Wirkung zur Folge hat [24].

Eine weitere positive Rückkopplung von ca. 10-15 % wird auf die Eis-Schnee-Albedo zurückgeführt, die besagt, dass mit steigender Temperatur die Schnee- und Eisbedeckung rückläufig ist und damit die von der Erdoberfläche reflektierte Sonneneinstrahlung abnimmt bzw. die vom Boden aufgenommene Strahlung zunimmt.

Schließlich werden noch Korrekturen durch Aerosol-Rückstreuung bzw. -Heizung sowie Änderungen in der Gegenstrahlung bei verändertem Temperaturgradienten über die Troposphäre (lapse-rate-feedback) einbezogen, beide in ihrer Größe und ihrem Vorzeichen stark abhängig von den jeweiligen Annahmen.

Ausgehend von dem obigen Ansatz und unter Berücksichtigung der verschiedenen Rückkopplungsprozesse, aber auch durch Einbeziehen einiger Modelle, in denen entsprechende Rückwirkungen

unmittelbar enthalten sind, gibt das *IPCC* die CO_2 -Klimasensitivität an zu

$$C_s = 3,2 \text{ }^\circ\text{C in den Grenzen von } 2,1 - 4,4 \text{ }^\circ\text{C [25].}$$

Sowohl die Unzulänglichkeiten und unterschiedlichen Angaben für den Basiswert, insbesondere aber die große Spannbreite für die Wasserdampfdruckkopplung, die Unkenntnis über den Einfluss von Wolken und die breite Streuung in den Ergebnissen der Modellrechnungen schlagen sich unmittelbar nieder in dem Misstrauen, das einer auf dieser Basis ermittelten Klimasensitivität entgegenzubringen ist.

Dies war Grund und Motivation genug, um eigene spektroskopische Rechnungen zur Absorption und Emission der wichtigsten Treibhausgase durchzuführen (siehe oben) und ein Klimamodell zu entwickeln, das speziell auf die Berechnung der CO_2 -Klimasensitivität ausgelegt ist und sich deutlich von dem zuvor skizzierten Rechenweg unterscheidet.

6 Eigene Modellrechnungen

Das zur eigenen Ermittlung der Klimasensitivität herangezogene Modell ist in Abb. 16 skizziert und lässt sich charakterisieren als Energie-Bilanz-Modell [14]. Die Atmosphäre und der Boden werden als zwei Lagen betrachtet, die gleichzeitig als Absorber und Wärmestrahler agieren.

Ebenfalls wird ein Wärmetransfer zwischen diesen Lagen durch Konvektion und Evapotranspiration sowie zu angrenzenden Klimazonen durch Wind und Meeresströmungen berücksichtigt.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

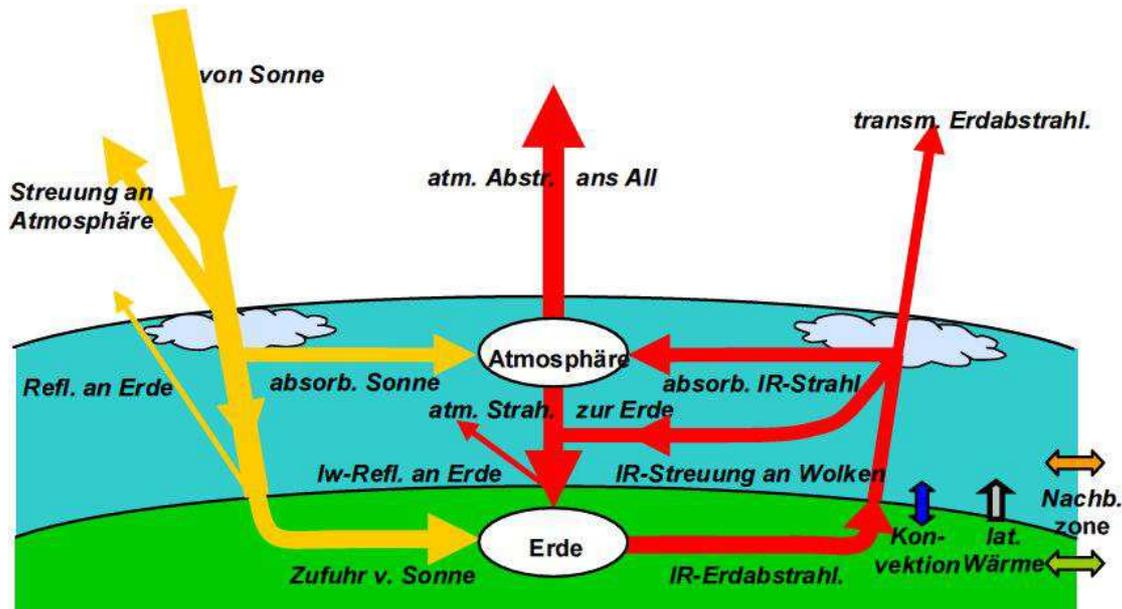


Abb. 16: Energie-Bilanz-Modell zur Berechnung der Klimasensitivität.

Im Gleichgewicht geben dabei die Atmosphäre wie die Erde soviel Energie wieder ab, wie sie von der Sonne und der Nachbarlage oder Klimazone aufgenommen haben. Dies ist nichts anderes als Energieerhaltung.

Dieses Gleichgewicht verschiebt sich allerdings zunächst leicht, wenn die Konzentration der Treibhausgase etwas anwächst und hierdurch eine erhöhte Absorption des Sonnenlichts und vor allem der langwelligigen Erdabstrahlung erfolgt. Daraus resultiert einerseits eine leicht reduzierte Direkterwärmung der Erde durch die Sonne, andererseits erwärmt sich die Atmosphäre zusätzlich und gibt ihrerseits den Temperaturüberschuss als Wärmestrahlung z.T. an die Erde und z.T. ans All wieder ab.

Die Änderungen in der Absorption und Emission werden dabei erfasst durch Bilanzgleichungen, die neben der Absorption und Emission von einer Reihe weiterer Parameter wie dem Reflexionsgrad an Wolken und der Erdoberfläche oder der Konvektion bestimmt werden. Letztlich darf sich an der Bilanz zu dem, was hinein- und heraus

fließt, nichts ändern, aber es kommt zu einem veränderten Gleichgewicht zwischen diesen Lagen.

Die laterale Auflösung der Rechnungen wird auf die drei Hauptklimazonen, Tropen, Gemäßigte Breiten und Polargebiete begrenzt (siehe Abb. 6), die sich wesentlich in den mittleren Bodentemperaturen, dem vertikalen Temperaturprofil (lapse rate) sowie in den Wasserdampfkonzentrationen und vertikalen Verteilungen hierfür unterscheiden. Der Wasserdampfgehalt ist dabei abgeleitet aus aktuellen GPS-Messungen für diese Zonen [26].

Die Simulation für eine Zone wird dann über die Atmosphären- und Oberflächen-Albedo sowie die *IR*-Rückstreuung an Wolken an die jeweilige Temperatur in einer Zone sowie die beobachteten auf- und abwärtsgerichteten Strahlungsflüsse angepasst. Auf diese Weise erfolgt gewissermaßen eine Eichung des Modells an den real vorliegenden Verhältnissen. Ausgehend von solch einem Gleichgewicht, das sich also weitgehend an den aktuellen Klimadaten orientiert und für eine CO_2 -Konzentration von 380 ppm berechnet ist, wird dann bei Änderung des CO_2 -Gehalts eine daraus resultierende neue Gleichgewichtsverteilung mit der sich daraus ergebenden Bodentemperatur ermittelt.

Da sich mit veränderten Temperaturen für den Boden und die Atmosphäre sowohl die Konvektion wie auch der Wasserdampfgehalt und der Temperaturgradient in der Atmosphäre ändern, führt dies zu einem nichtlinear gekoppelten Bilanzgleichungssystem, das iterativ gelöst wird, bis sich Selbstkonsistenz für das Gesamtsystem einstellt. Die Wasserdampf-Rückkopplung muss hierbei nicht spekulativ zugrunde gelegt werden, sondern ergibt sich aus den Messungen für den Wassergehalt in den drei Klimazonen, indem die Absorption und Emission für jede Klimazone aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen und Konzentrationen der Gase jeweils individuell berechnet werden und aus deren Verlauf über die drei

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Zonen die Absorptionsänderung mit der Temperatur unmittelbar abgelesen werden kann.

Ebenso lässt sich aus den Rechnungen nach dem Strahlungs-Transfer-Modell der sich mit dem Temperaturgradienten in der Atmosphäre (lapse-rate) verändernde aufwärts- und abwärtsgerichtete Strahlungsanteil für die drei Zonen ermitteln und hieraus wiederum die entsprechende Rückkopplung mit der Temperatur bestimmen.

Da die mit dem hier beschriebenen Klimamodell durchgeführten Rechnungen keine zeitlichen Entwicklungen oder Aussagen über lokale Einflüsse liefern sollen und sich andererseits zeigt, dass die für die einzelnen Klimazonen ermittelten Klimasensitivitäten nur vergleichsweise moderat voneinander abweichen (dies ist u.a. auf ein ähnlich deutliches Sättigungsverhalten in der Absorption von Wasserdampf wie beim CO₂ zurückzuführen), ist davon auszugehen, dass eine höhere laterale Auflösung über die drei Klimazonen hinaus keine wesentlichen Änderungen oder Verbesserungen ergeben wird. Hierdurch wird der Rechenaufwand gegenüber Modellen mit Maschenweiten von *200 km* oder noch darunter und der Simulation weiterer Zusammenhänge, die für die hier anstehenden Betrachtungen nicht relevant sind, um Größenordnungen geringer. Hinzu kommt, dass solche Modelle systematisch zu chaotischem Verhalten neigen und kleinste Variationen in den Anfangsbedingungen zu deutlich veränderten oder unreproduzierbaren Ergebnissen führen.

Für die Berechnung der Absorption von solarer und terrestrischer Strahlung über ein Höhenprofil von *86 km* wird die Atmosphäre in *46* Schichten unterteilt, für die Ermittlung der aufwärts bzw. abwärts emittierten *IR*-Strahlung, die sich durch das Temperatur- und Dichteprofil der Gase deutlich asymmetrisch verhält, wird sogar eine Aufteilung in *228* Schichten vorgenommen. Um den Einfluss von Wasserdampf auf das Absorptionsverhalten von CO₂ durch den spektralen Überlapp sowie das Sättigungsverhalten und die verbleibende Flankenabsorption hinreichend präzise erfassen zu können,

werden die Spektralrechnungen mit einer Auflösung von 1 GHz durchgeführt.

Als gewichtetes Mittel über die drei Klimazonen ergibt sich für den globalen Temperaturanstieg als Funktion der CO₂-Konzentration der in Abb. 17 wiedergegebene annähernd logarithmische Verlauf, aus dem sich unmittelbar die Klimasensitivität als Temperaturanstieg bei Verdopplung der CO₂-Konzentration bestimmen lässt zu

$$C_s = 0,6 \pm 0,2^\circ\text{C} .$$

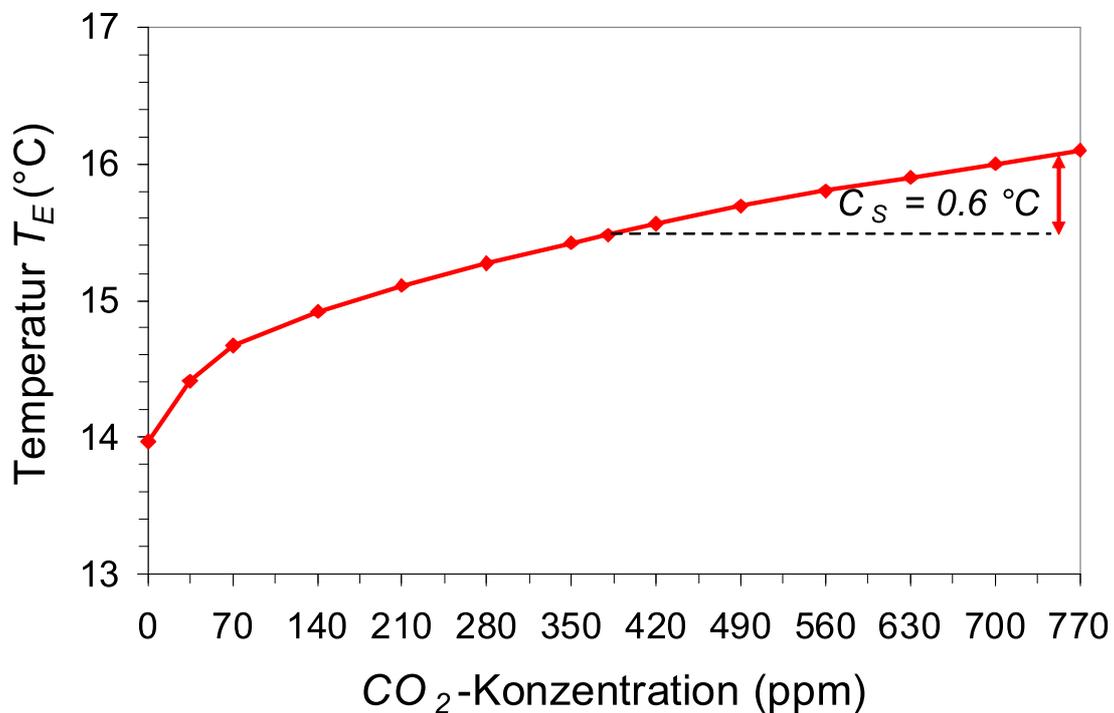


Abb. 17: Anstieg der mittleren Erdtemperatur als Funktion der CO₂-Konzentration.

In diesem Ergebnis sind, wie bereits zuvor ausgeführt, die Wasserdampf- und "lapse-rate"-Rückkopplung berücksichtigt, die zusammen eine Erhöhung von 0,2 °C beisteuern. Nicht einbezogen sind dagegen die anderen genannten Rückwirkungen, deren Größe und teils auch Vorzeichen nicht genauer bekannt sind.

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

Um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Klimasensitivität (nicht die unmittelbare Erdtemperaturänderung) festzustellen, wurden die Parameterwerte systematisch in kleineren Grenzen variiert. Dabei zeigt sich, dass zwei Parameter einen wesentlichen Einfluss auf das obige Ergebnis haben, die Konvektion, die schon relativ hoch angesetzt wurde, und vor allem die Rückstreuung der IR-Strahlung an Wolken. Beide zusammen bestimmen i.W. die angeführte Unsicherheit von 30 % für die Klimasensitivität. So zeigt sich, dass bei einem Anstieg der vergleichsweise niedrig angesetzten Bewölkung von 55% auf 60 % die Klimasensitivität von 0,6°C weiter zurückgeht auf 0,53 °C, und sie würde Null für eine Bewölkung von 100 %, da dann jede Absorption und Rückstrahlung durch Klimagase vollständig überdeckt wird durch die Rückstreuung an Wolken.

7 Zusammenfassung

Die hier angegebene Klimasensitivität liegt gut einen Faktor 5 unter dem vom IPCC angeführten Wert. Diese große Diskrepanz wird zum einen darauf zurückgeführt, dass der hier ermittelte Beitrag für CO₂ an der Gesamtabsorption deutlich kleiner ausfällt als in den vom IPCC angeführten Arbeiten, und zum anderen eine wesentlich niedrigere Wasserdampfrückkopplung gefunden wurde, als sie vom IPCC verwendet wird. Beide Aspekte haben unmittelbar mit dem in der Atmosphäre zugrunde gelegten Wassergehalt sowie dem deutlich gesättigten Absorptionsverhalten von CO₂ und ebenso vom Wasserdampf zu tun. Die vom IPCC berücksichtigten Publikationen stützen sich vornehmlich auf ältere und vereinfachte spektroskopische Rechnungen, die nicht ausreichend die Überlagerung der Spektren mit der daraus resultierenden gegenseitigen Beeinflussung einbeziehen, und darüber hinaus wird in diesen Arbeiten offensichtlich von einer Zusammensetzung der Atmosphäre ausgegangen, die der über dem amerikanischen Kontinent (US Standard 1976 Atmosphere) aber nicht

der mittleren global anzutreffenden Atmosphäre (Average Global Atmosphere) mit einem fast 100 % höheren Wasseranteil entspricht.

Eine zusätzliche Berücksichtigung der Eis-Schnee-Albedo-Rückkopplung würde dagegen nur eine vergleichsweise kleine Korrektur von ca. $0,05^{\circ}\text{C}$ bewirken.

Mit der hier angegebenen Klimasensitivität kann ein erhöhter CO_2 -Anteil, der sowohl natürlichen wie anthropogenen Ursprungs sein wird, zu keiner maßgeblichen Erwärmung der Erde beigetragen haben. Der Anstieg von 280 auf 380 *ppm* in den letzten 150 Jahren würde gerade einmal $0,21^{\circ}\text{C}$ beisteuern, und dies erst, nachdem sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Damit sind von der durch das IPCC angegebenen Temperaturerhöhung von $0,74^{\circ}\text{C}$ über die letzten 130 Jahre dem CO_2 nicht 95 % sondern lediglich 28 % anzulasten.

Eine darüber hinausgehende Erwärmung, sofern es sich nicht um Messfehler oder urbane Einflüsse handelt, muss seinen Ursprung in anderen Ursachen haben wie beispielsweise einer erhöhten Sonnenaktivität, der Beeinflussung der Wolkenbildung durch kosmische Strahlung [27], der Stellung der Erde zur Sonne, der ozeanischen Oszillationen [28], dem Einfluss von Aerosolen in der Atmosphäre oder einer erhöhten Aktivität im Erdinneren.

Es gibt keinen Grund für Hysterie und Panik, und Spekulationen, die einer wissenschaftlichen Überprüfung nicht standhalten aber mit missionarischem Eifer weitergetragen werden, sollten wir schleunigst vermeiden. Es ist bekannt, dass Panikmeldungen sich besonders gut verkaufen. Sie dürfen aber niemals die Glaubwürdigkeit und Ehrenhaftigkeit weder im Journalismus noch in der Politik und schon gar nicht in den Wissenschaften infrage stellen.

Eine globale Erwärmung und mögliche Folgen sollen nicht verniedlicht werden, aber wir sollten rasch zu einer sachlicheren Bewertung und Diskussion zurückkehren, die sich auf Fakten und nicht Vermutungen abstützt. Vor allem dürfen nicht leichtfertig mögliche

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

andere Ursachen ausgeschlossen werden, und es sollte nicht vergessen werden, dass es immer schon erhebliche natürliche Temperaturschwankungen auf der Erde gab, unabhängig von anthropogenen Einflüssen.

Referenzen

1. Frank Ramond: *Ich zähl bis drei*, Oktober 2009
<http://www.youtube.com/watch?v=vUdEG0C1RNE>
2. Mitteilungen der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen:
Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050, Brüssel, 8.3.2011, KOM(2011) 112
http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/klima_roadmap_2050_1454.htm
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:DE:PDF>
3. M. Erbs, R. Manderscheid, H.-J. Weigel: *A combined rain shelter and free-air CO₂ enrichment system to study climate change impacts on plants in the field*, *Methods in Ecology and Evolution* 3(1), p. 81-88 (2012)
4. <http://www.cerina.org/co2-2011>
5. J. R. Petit et.al.: *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*, *Nature* 399, 429 (1999)
6. M. S. Torn, J. Harte: *Missing feedbacks, asymmetric uncertainties, and the underestimation of future warming*, *Geophysical Research Letters*, 33, L10 703(2006)
7. C. D. Keeling: *The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere*, *Tellus* 12, 200–203 (1960)
8. G. J. Retallack: *A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles*, *Nature* 411, 287-290 (2001)
9. Goddard Institute for Space Studies:
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs>

Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?

10. IPCC, *Climate Change 2001: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report*, ed. by R. J. Watson and the Core Writing Team (Geneva, 2001).
11. J. B. J. Fourier: *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, *Annales de Chimie et de Physique*, Paris 1824
12. J. Tyndall: *On Radiation through the Earth's Atmosphere*. *Philosophical Magazine* ser. 4, 25, S. 200–206 (1863)
13. S. Arrhenius: *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, London, *Philos. Mag. & Jour. of Sc.* 5, 237–276 (1896)
14. H. Harde: *Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei? Spektroskopische Untersuchungen und Modellrechnungen zum Einfluss von H₂O, CO₂, CH₄ und O₃ auf unser Klima*, BoD, Norderstedt 2011, ISBN: 9 783842 371576
15. L.S. Rothman et al.: *The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 110, 533–572 (2009)
16. K. Schwarzschild, *Göttinger Nachrichten*, p. 41 (1906)
17. H. Harde: *Radiation and Heat Transfer in the Atmosphere: A Comprehensive Approach on a Molecular Basis*, eingereicht bei *International Journal of Atmospheric Sciences*, April 2013
18. D. Tobin, Space Science and Engineering Center, Univ. Wisconsin-Madison
19. Eigene Rechnungen
20. G. Myhre, E. J. Highwood, K. P. Shine, F. Stordal: *New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases*, *Geophys. Res. Letters* 25, pp. 2715-2718 (1998)
21. V. Ramanathan, L. Callis, R. Cess, J. Hansen, I. Isaksen, W. Kuhn, A. Lacis, F. Luther, J. Mahlman, R. Reck, M. Schlesinger: *Climate-*

- Chemical Interactions and Effects of Changing Atmospheric Trace Gases*, Rev. Geophys. 25, 1441-1482 (1987)
22. V. Ramanathan, and J. A. Coakley Jr.: *Climate modeling through radiative-convective models*, Rev. Geophys., 16, 465-489 (1978)
 23. A. C. Clement, R. Burgman, J. R. Norris: *Observational and Model Evidence for Positive Low-Level Cloud Feedback*, Science 325 no. 5939, pp. 460-464 (2009)
 24. R. S. Lindzen, M.-D. Chou, A. Y. Hou: *Does the Earth Have an Adaptive Infrared Iris?*, Bull. Am. Meteorol. Soc. 82, 417-432 (2011)
 25. D. A. Randall, R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R. J. Stouffer, A. Sumi, K. E. Taylor: *Climate Models and Their Evaluation*, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
 26. S. Vey: *Bestimmung und Analyse des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes aus globalen GPS-Beobachtungen einer Dekade mit besonderem Blick auf die Antarktis*, Technische Universität Dresden, Diss., 2007
 27. N. Calder, H. Svensmark: *The Chilling Stars*, Icon Books, 2007, ISBN-10: 1-84046-815-7
 28. F. Vahrenholt, S. Lüning: *Die kalte Sonne*, Hoffmann u. Campe, 2012, ISBN 978-3-455-50250-3