

Klimazusammenhänge

Dipl.-Physiker Jochen Ebel

22. September 2019

Analogie

Sie schauen diesen Vortrag, um etwas mehr über den Treibhauseffekt zu erfahren. Um Vorstellungen zu Einzelheiten des Treibhauseffekts etwas anschaulich zu machen, erst mal ein Vergleich zum Straßenverkehr:

Treibhausbegriff	(Vergleich) Analogie
ein Photon	ein Auto
Wärmestrom	Autostrom
Temperatur	Autodichte (Stress der Fahrer)
Temperaturdifferenz	Fahrzeit
Wellenlänge (Regenbogenfarbe im Strahl)	Wahl der Fahrtroute
Erdoberfläche	Ort "A"
Weltraum	Ort "B"

Wenn keine Hindernisse auf der Fahrtroute sind, ist die Fahrzeit von "A" nach "B" die geringste und auf Nebenstrecken sind nur wenige Fahrzeuge.

Behinderung

Die Stärke des Fahrzeugstroms wird z. B. von der Urlaubszeit (Analogie: Wärmestrom von der Sonne) bestimmt.

Wenn auf der Urlaubsrouten der Verkehr behindert wird (z. B. Baustelle) bildet sich am Anfang der Baustelle ein Stau (Analogie: steigende Temperatur.)

Durch die Behinderung verlängert sich die Fahrzeit (Analogie: steigende Temperaturdifferenz).

Je nach Größe des Staus versuchen immer mehr Fahrzeuge über Nebenstrecken (Analogie: bei anderen Wellenlängen) schneller zum Ziel zu kommen.

Das waren einige Vorbemerkungen.

Über den Autor

1967 Abschluß des Physikstudiums an der TU Dresden.

Bis 1990 Arbeit als Entwicklungsingenieur in einem Betrieb für Nachrichtenmeßtechnik.

Ab 1990 zunehmende Tätigkeit als Bauphysiker (die Frau des Autors ist Bau-Ing.)

Ab ca. 2000 zunehmende Beschäftigung mit Klimafragen.
Klimaerkenntnisse haben Auswirkungen auf staatliche Maßnahmen,
z. B. Bauvorschriften, die aus Klimafragen resultieren.

<http://www.ing-buero-ebel.de/Treib/Schriften.htm>

Die vorliegende Präsentation darf kostenlos genutzt werden, wenn sie nicht verändert wird.

Vorschläge für Änderungen sind zu richten an: JEbel@t-online.de

Allerdings hat der Autor nichts gegen eine kleine Spende - die aber auch reichlich ausfallen darf.

Um die Klimazusammenhänge zu verstehen, muß man auch die wesentlichen Physikzusammenhänge verstehen, die auf den ersten Blick scheinbar nichts mit dem Treibhauseffekt zu tun haben. Insofern sind einige mittlere Folien zunächst scheinbar überflüssig (aber auch interessant) - aber Voraussetzung um den Rest zu verstehen.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Grundsätzliches
- 2 Warum?
- 3 Beobachtung und Schlußfolgerung
- 4 Skeptiker»argumente«???
- 5 Treibhausgaslose Atmosphäre
- 6 Geschichte
- 7 Begriffe
- 8 [Ergänzung - Mikrophysik der Wärme]
- 9 weitere Begriffe
- 10 Moleküle
- 11 Strahlungstransportgleichung
- 12 Vertrauen zur Größe des Treibhauseffekts
- 13 Größe des Treibhauseffekts
- 14 Weitere Auswirkungen des Treibhauseffekts
- 15 Venus
- 16 Literatur

Grundsätzliches

Der Treibhauseffekt ist ein optischer Effekt (Wirkung auf sichtbares und infrarotes Licht), der wegen seiner Stärke zusätzlich weitere starke Effekte verursacht (z. B. Luftströmungen - Wind).

Andere optische Effekte sind z. B. das Brennglas (Lupe). Im Brennfleck werden Temperaturen nahe der Sonnenoberfläche erreicht. Allerdings ist die Umgebung des Brennflecks kühler wegen der Bündelung der Solarstrahlen.

Weitere Anlagen mit optischen Effekten sind z. B. Solaranlagen. Es gibt Solaranlagen mit Bündelung (z. B. mit Spiegeln). Solaranlagen ohne Bündelung sind Photovoltaikanlagen oder es werden Tinox-Oberflächenschichten als Heizquelle benutzt. Die Tinox-Oberfläche ist im Wellenlängenbereich der Solarstrahlung fast schwarz (starke Absorption) und im Infrarotbereich fast weiß (geringe Emission). Das führt zu Temperaturen von über $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - da sind die $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch den Treibhauseffekt direkt wenig.

Wie stark die optischen Verhältnisse die Temperaturen beeinflussen, erkennt man z. B. an dem Temperaturunterschied eines Autodaches bei einem hellem und einem dunklen Auto in der Sonne.

Warum?

Wie das Klima durch Veränderungen der Konzentration der Treibhausgase beeinflusst wird, hat große Bedeutung. Ist die Beeinflussung des Klimas durch die Änderungen gewaltig, so sind für Vorsorge und/bzw. Folgenbeseitigung erhebliche Mittel erforderlich. Die Wertung von »gewaltig« wird hier nicht behandelt. Ist die Beeinflussung vernachlässigbar, so sind Mittel sinnlos ausgegeben.

Die Beeinflussung des Klimas beeinflusst auch den Wert fossiler Brennstoffe im Handeln der Verbraucher - reagiert das Klimasystem kaum, werden die Vorräte fossiler Brennstoffe wertvoller, weil der Verbrauch steigt und die Vorräte abnehmen - wird das Klimasystem stark beeinflusst, so sind Strategien erforderlich, die ein Ansteigen der Treibhausgaskonzentration verringern bzw. ganz vermeiden. Dadurch verlieren die Vorräte fossiler Brennstoffe immer mehr an Wert, weil die Nachfrage danach sinkt. Auf der anderen Seite etabliert sich eine Industrie, deren Gewinne von der Finanzierung von Vorsorgemaßnahmen abhängen. In beiden Fällen handelt es sich um erhebliche Beträge.

Wegen der wirtschaftlichen Interessen der verschiedenen Interessengruppen wird der Kampf um die Heftigkeit der Beeinflussung des Klimasystems so erbittert geführt. (Ähnliches Verhalten ist z. B. von der Tabakindustrie bekannt.) Was sagt die Wissenschaft zur Beeinflussbarkeit des Klimas?

Umfang der Darstellung

Einige werden die nachfolgenden Darstellungen für zu umfangreich halten, weil Sie vieles davon schon wissen.

Anderen wird die Darstellung nicht ausführlich genug sein.

Wieder anderen wird die Darstellung zu hoch erscheinen, speziell wird das bei den wenigen eingestreuten Formeln zutreffen. Wen das betrifft, dem empfehle ich, die Formeln zu überlesen, aber als richtig zu unterstellen.

Als Kompromiß der widerstreitenden Vorstellungen ist das Nachfolgende entstanden, denn Keinem ist gedient mit der Kurzfassung: »Ihr müßt mir schon glauben, daß der Treibhauseffekt existiert«. Eine nachvollziehbare Begründung erfordert eben etwas mehr.

Obwohl versucht wurde den Faden von Bekannten zu weniger Bekannten zu spinnen, werden an manchen Stellen Sachverhalte verwendet, die erst später ausführlich erläutert werden.

Mittelwerte als neue Qualität

- Die Bewegung eines **Moleküls** (zusammengesetzt aus noch kleineren Einheiten) wird durch Geschwindigkeit und deren Richtung beschrieben.
 - Für ein einzelnes Molekül existieren weder Temperatur noch Druck.
 - Die Bewegung wird durch einfache Gesetze der Mechanik beschrieben - z. B. bleibt ohne Kräfte bei einem Körper Richtung und Geschwindigkeit konstant.
- Selbst in einem kleinen **Volumen** (Luftpaket) sind sehr viele Moleküle, die laufend zusammenstoßen und dabei Richtung und Geschwindigkeit ändern.
 - Durch den Mittelwert der Geschwindigkeit wird eine Temperatur bestimmt.
 - Durch den Mittelwert der Stöße auf den Rand wird ein Druck bestimmt.
 - Dafür gelten Mittelwert-Gesetze - z. B. das Gasgesetz: Volumen mal Druck ist proportional der Temperatur.
- **Wettererscheinungen** werden durch viele Luftpakete bestimmt - z. B. Tiefdruckgebiete.
- ... - nächste Folie

Wetter und Klima

Die Beobachtung ist das Wetter - als chaotische Abweichungen vom Mittelwert. Der Durchschnittswert (Klima) kann nicht direkt beobachtet werden. Bei einigen hat sich das Verständnis des Chaosanteils nicht in der Sache, sondern nur in den Folgen verändert:

„In diesem Jahr war ein sehr großer Hagel und Wind, thät großen Schaden, ihro wegen fing man allhier etliche Weiber, welche den Hagel und Wind gemacht haben sollen, die man auch mit Urthel und Recht verbrennt.“

Mittelalter:

Beobachtung Hagelunwetter 1445

Schlußfolgerung Hexen [12] sind Schuld

Folgen verbrennen

Neuzeit:

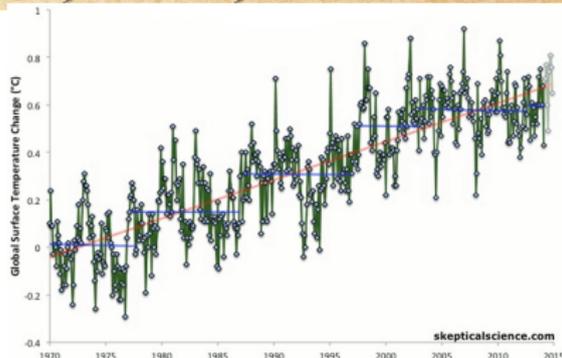
Beobachtung Temperaturen [20] (grün)

falsche Schlußfolgerung

Treppeninterpretation: Es wird laufend kälter (kurze blaue Kurvenstücke = horizontale Teppenstufen)

richtige Schlußfolgerung Es wird laufend wärmer (rote Gerade)

Folgen ???

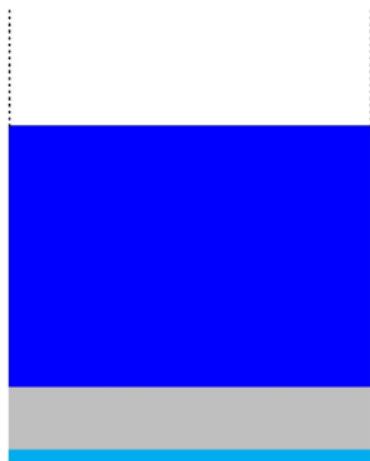


Mittelungszeit

Die Treppeninterpretation (voriges Bild - alle blauen Linien sind kürzer als 10 Jahre) zeigt, daß die Mittelungszeit nicht beliebig kurz sein darf, um das Klima aus dem Wetter zu bestimmen. Das bedeutet nicht, daß sich das Klima innerhalb des Mittelungszeitraumes nicht verändern darf.

15 Jahre bis 20 Jahre reichen oft aus, um die Eindeutigkeit des Trends zu erkennen. Die Meteorologen haben sich auf 30 Jahre geeinigt.

In der Atmosphäre sind die meisten Gase gemischt und nach oben nimmt die Dichte des Gasgemisches ab. Um die Anteile darzustellen, werden nachfolgend unter der Annahme konstanter Moleküldichte diese Anteile ungemischt dargestellt. Unter diesen Annahmen ergeben die bekannten Konzentrationen folgende Schichthöhen:



Gesamthöhe der Atmosphäre 8.6 km

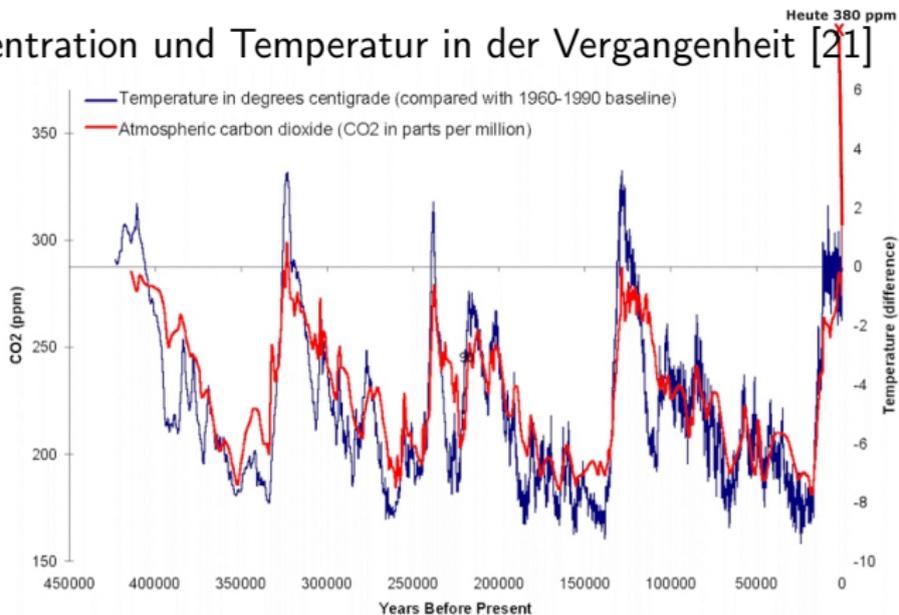
davon folgende Anteile

Wasserdampf 33 m
(als Wasser 25 mm)

CO₂ 2.5 m
Ozon 3 mm

Bei der dünnen Ozonschicht akzeptieren fast alle die Wirksamkeit. Einige bezweifeln aber, daß die 1000 mal dickere CO₂-Schicht auch wirksam ist, aber die nur 10 mal dickere Wasserdampfschicht soll wieder stark wirksam sein? Eigentlich sollten diese Widersprüche selbst Skeptikern auffallen.

CO₂-Konzentration und Temperatur in der Vergangenheit [21]



Der Zeitverlauf mit dem steilen Temperatur- und CO₂-Anstieg und langsamen Abfall zeigt die Wirksamkeit des CO₂. Die äußeren Einwirkungen für Temperatur-Anstiege sind weitgehend zeitsymmetrisch. Der unsymmetrische Verlauf entsteht dadurch, daß der anfängliche Temperaturanstieg zum schnellen Ausgasen von CO₂ führt (Gasblasen steigen im Wasser auf) und die gestiegene CO₂-Konzentration verstärkt den Temperaturanstieg (Treibhauseffekt). Wenn der Maximalwert überschritten ist löst sich das CO₂ aber nur langsam im Wasser (keine Gasblasen). Dadurch folgt der CO₂-Anstieg dem Temperaturanstieg. Heute ist der Auslöser der CO₂-Anstieg und der Temperaturanstieg folgt dem CO₂-Anstieg.

Es gibt auch noch einen humorigen »Beweis [3]«



Stichpunkte zum CO₂

- Notwendig für das Pflanzenwachstum
- Geruchlos
- Unsichtbar
- Strahlungsaktiv (Absorption und Emission)
- Klimaaktiv
- aber kein »Klimakiller«

Paracelsus: »Nur die Dosis macht das Gift«

Auswirkungen

- Bei höherer Treibhausgaskonzentration steigt die Tropopausenhöhe und damit die Dicke der Troposphäre (siehe später). In der Troposphäre sind turbulente Luftströmungen. Die Stärke von Turbulenzen wird durch das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeits-Kräften bestimmt. Dieses Verhältnis wird als Reynoldszahl bezeichnet (gilt sogar bei Sonnengröße [13]). Durch die größere Dicke nimmt der Einfluß der Bodenreibung (als Auswirkung der Zähigkeit) ab und wegen der geringeren Reibung nimmt auch die Strömungsgeschwindigkeit zu (Trägheitsauswirkung). Das bedeutet die Turbulenz nimmt zu - was sich besonders bei den extremen Turbulenzen (Hurricane) äußert.

Der Zunahme der Reynoldszahl wirkt entgegen, daß die Temperaturdifferenz zwischen Äquator und Polen abnimmt, was den Anstieg der Stömungsgeschwindigkeit verringert.

- Unter anderem hängt die Produktivität auch von der Temperatur ab [4]. Alle südlichen Staaten (Griechenland, Italien, Spanien usw.) haben eine geringere Industrieproduktivität als die nördlicheren Staaten. Allerdings hängt das auch vom Zustand und weiteren Einflüssen ab. Die ersten Staaten waren im Süden (Agrarstaaten - Ägypten, Griechenland). Damit verschiebt die Klimaerwärmung auch die Zonen maximaler Produktivität.

- Treppeneffekt (schon erwähnt).
- Eiszunahme: ja - aber **nur** in großen Höhen, wo es trotz Klimaerwärmung unter 0°C bleibt. Die Eiszunahme in großen Höhen ist die Folge der gestiegenen Luftfeuchtigkeit.
- Die Ursachen des Meeresspiegelanstiegs ist sehr vielfältig, deshalb kann ein Herauspicken oft falsch sein: Zufluß von Schmelzwasser, Hebung und Senkung der Erdoberfläche (Verschiebung der Küstenlinie - beim Tsunami-auslöser mehrere Meter Hebung), Verformen der Wasseroberflächen durch Dichteunterschiede infolge von Temperaturunterschieden, Salzkonzentration usw.
- Bei einer Temperaturerhöhung um ca. 3 K steigt wegen des Temperaturgradienten von ca. 6.5 K/km die Temperaturebene um ca. 500 m - z. B. sind die Temperaturen der Tiefebene dann im Mittelgebirge. Wer aber annimmt, daß die Flora der Tiefebene dann im Mittelgebirge ist, täuscht sich: der Anstieg der Temperaturebene geht wegen des relativ schnellen Temperaturanstiegs auch schnell vor sich - aber ob die Flora und die damit zusammenhängende Fauna auch so schnell wandern kann, dürfte für viele Arten nicht zutreffen. Das heißt viele Arten sterben aus, ehe sie die neue Temperaturebene erreichen.

- Die heutige durchschnittliche Temperatur mit Treibhauseffekt ist ca. $+15^{\circ}\text{C}$ (gemittelt aus den Meßwerten). Die oft genannte Größe für die Stärke des Treibhauseffekts von 33 K sei falsch, weil diese Rechnung auf der Annahme beruht, daß die Erdoberfläche ohne Treibhauseffekt eine einheitliche Temperatur von ca. -18°C hätte - was natürlich nicht zutreffen kann. Eine mathematische Untersuchung (Höldersche Ungleichung) zeigt, daß die -18°C die obere Grenze möglicher Durchschnittstemperaturen bei realen Temperaturen ohne Treibhauseffekt ist. Damit ist der Treibhauseffekt größer als 33 K. Die Berechnung der oberen Temperaturgrenze erfolgt unter der Annahme, daß die Oberfläche fast schwarz und die Albedo ca. 30 % (Weißegrad bzw. Reflexion der Erde) ist, wie beides heute zutrifft - aber die heutige Temperatur ist durch den Treibhauseffekt sogar höher als die -18°C ($+15^{\circ}\text{C}$).
- Die Umgebung der Temperaturmeßstationen hat sich im Laufe der Zeit verändert. Z. B. sind viele Städte, die oft wärmer als Umgebung sind, dichter an die Temperaturmeßstationen herangerückt. Obwohl die damit verbundenen Temperaturänderungen rechnerisch eliminiert werden wird von Skeptikern dies angezweifelt. Die Temperaturänderung ohne Korrektur wird als Wärmeinseleffekt bezeichnet. Der Anstieg der Tropopausenhöhe ist aber mit einem Wärmeinseleffekt nicht zu erklären.

- Nur die Absorption spielt eine Rolle, die Emission nicht. Fragen: Wie wird auch ohne Konvektion die Atmosphäre die absorbierte Wärme wieder los? Warum soll das Kirchhoffsche Gesetz (bewährt seit 1860) nicht für die Atmosphäre gelten?
- Der Treibhauseffekt könne nicht stärker werden, weil die Absorption gesättigt ist - Komisch: das Argument ist nur zutreffend, wenn die Emission »vergessen« wird.
- Bestenfalls könne der Treibhauseffekt etwas stärker werden, da die Seitenflügel noch nicht gesättigt sind. Die stärkeren Seitenflügel sind zwar auch an der Verstärkung des Treibhauseffektes beteiligt - aber unwesentlich.
- Eine Prognose der Änderung des Treibhauseffektes ist nicht möglich, da schon eine Wetterprognose nur über ca. 10 Tage möglich ist. Eine Klimaprognose ist keine verlängerte Wetterprognose. Berechnungsmethoden für die neue Qualität »Klima« sind anders aufgebaut als für die Qualität »Wetter« - siehe Folie **10** »Mittelwerte als neue Qualität«. Es wird die Entwicklung der Mittelwerte des Wetters berechnet, solche Änderungen der Berechnungsmethoden für neue Qualitäten sind auch auf anderen Gebieten üblich.
- Es gibt keine Gegenstrahlung??? - Obwohl diese gemessen wird [1]!

Ein Witz

Den Treibhauseffekt wollen Treibhauskeptiker mit dem Wood-Versuchen widerlegen - und widerlegen sich dabei selbst. Das Versuchsobjekt des Wood-Versuchs ist ein Minigewächshaus - also ein Gehäuse, wo die obere Wand durchsichtig ist. Bei Solarstrahlungseinfall in das Minigewächshaus entstehen Temperaturen entsprechend der Gewächshauserfahrungen. Nun der Widerspruch: angeblich soll ein Gewächshaus nichts mit dem Treibhauseffekt zu tun haben, andererseits soll der Versuch den Treibhauseffekt widerlegen - also widersprechen sich beide Aussagen.

Treibhausgaslose Atmosphäre

Wie wären die Temperaturen der Erdoberfläche ohne Treibhauseffekt? Da die Abstrahlung von der Erdoberfläche ohne Wechselwirkung (keine Absorption und Emission in der treibhausgaslosen Atmosphäre) ins All geht, spielt eine solche Atmosphäre für die Strahlungsverhältnisse keine Rolle. Der Mond kann deshalb als Beispiel für die Temperaturen genommen werden, da er die gleiche Sonnenentfernung wie die Erde hat. Auch beim Mond bilanzieren natürlich auch Absorption und Emission - aber die Folge ist eine Durchschnittstemperatur der Oberfläche von ca. -55°C bei einer Maximaltemperatur von ca. $+130^{\circ}\text{C}$ und einer Minimaltemperatur von ca. -230°C .

Welche Folge hat nun eine Atmosphäre ohne Treibhausgase? Solange eine Fläche wärmer als die Atmosphäre ist, wird Luft an der Oberfläche erwärmt und steigt wie ein Heißluftballon auf. Das bedeutet, dass Wärme in die Atmosphäre eingetragen wird, die die Atmosphäre nicht verlassen kann: Nach oben nicht, weil die Atmosphäre nicht strahlen kann; nach unten nicht, wie nachfolgend begründet wird.

Stationärer Zustand bei treibhausgasloser Atmosphäre

Interessant wird das Ganze im erreichten Endzustand, wenn fast die gesamte Atmosphäre die Temperatur der wärmsten Stelle angenommen hat. Dann ist über der größtenteils kühleren Erdoberfläche eine sehr warme Atmosphäre. Bei einem Temperaturverlauf, bei dem es oben wärmer als unten ist, gibt es keine Konvektion - d.h. die Luft ruht. Das kann man sogar jetzt auf der Erde beobachten bei der sogenannten Inversionswetterlage.

Ruhende Luft ist aber ein ganz schlechter Wärmeleiter (Mehrschichtfensterglas), so daß eine dünne Schicht ruhender Luft den Übergang von der kühlen Oberfläche zur warmen Atmosphäre bildet. Da die ruhende Luft ein schlechter Wärmeleiter ist, isoliert diese dünne Schicht praktisch die warme Atmosphäre von der kühleren Oberfläche.

Wegen dieser Isolation findet durch die Atmosphäre auch fast kein Wärmeausgleich zwischen warmen und kalten Stellen statt - ähnlich wie beim Mond.

Deswegen sind an der Oberfläche sehr heiße und sehr kalte Stellen und eine sehr niedrige Durchschnittstemperatur.

Geschichte

1824 wunderte sich Fourier [8], der die Wärme sehr gründlich untersuchte, warum die Erdoberfläche trotz der »geringen« Sonneneinstrahlung im Durchschnitt so warm ist und vermutete dafür den Treibhauseffekt - auch wenn er diesen Begriff nicht verwendete. Im Laufe der Jahre kam immer mehr Wissen zusammen, das Arrhenius 1896 [2] zusammenfaßte. Als Resultat seiner Forschungen forderte Arrhenius schon 1896 die Energiewende:

... wie Vorgänge mit gegenteiliger Wirkung, die durch die industrielle Entwicklung unserer Zeit verursacht wird, und welche als vorübergehend konzipiert werden muss.

und so erfolgte schon damals heftige Kritik, insbesondere durch Ångström. Die Kritiken Ångströms wurden durch Arrhenius widerlegt und als Folge(?) der Auseinandersetzung erfand Ångström 1905 sogar ein Meßgerät für die Gegenstrahlung und zeigte die großen Schwankungen der nächtlichen Nettoausstrahlung von der Erdoberfläche - obwohl Ångström den Wortteil »Netto« noch nicht verwendete.

Erst einmal Begriffe - Gegenstrahlung

Ein zentraler Begriff zum Verständnis des Treibhauseffektes ist der Begriff der

Gegenstrahlung

Weiter mit Folie **32** zur Erklärung der »Gegenstrahlung« oder die nachfolgenden Folien zur Erläuterung der Wärme durch Mikrophysik.

Mikrophysik der Wärme I - [22]

Zitat von [22] - leicht verändert:

Was ist Wärme? Für eine genaue Antwort ist ein wenig in die Welt der Atome abzutauchen. Die Wärme eines Körpers resultiert aus der ungeordneten (**chaotischen, zufälligen**) Bewegung seiner kleinsten Teilchen, die mit Ortsveränderungen usw. einhergehen.

Ein einzelnes Teilchen hat weder Temperatur noch Wärme. Temperatur und Wärme existieren nur als Vielteilcheneffekte.

So fliegen in einem Gas Moleküle oder je nach Gas auch Atome über „große“ Strecken von etwa $0.1 \mu\text{m}$, bevor sie andere Gasteilchen treffen und in eine andere Richtung gestreut werden. In Flüssigkeiten stoßen sich die wesentlich dichter gepackten Teilchen bereits nach $0.001 \mu\text{m}$ mit benachbarten Teilchen und bewegen sich danach weiter - aber in eine andere Richtung. Diese mikroskopisch translatorischen Bewegungen nennt man auch Brownsche Molekularbewegung. In Festkörpern bewegen sich die Teilchen nach dem Stoß zurück (**durch Federwirkung**) in ihre mittlere Gitterposition und darüber hinaus.

Mikrophysik der Wärme II

Letzteres ist dann also nichts anderes als ein Schwingen eines Atoms um seinen festen Gitterplatz im Festkörperverbund ([Debye'sche Theorie der Wärme](#)). In all diesen Fällen übertragen die Teilchen durch ihre Stöße Bewegungsenergie und somit Wärme an benachbarte Teilchen. Diese Art der Wärmeausbreitung durch molekulare Stöße nennt man Wärmeleitung. Hält man einen Körper an die Haut, oder treffen Luftmoleküle auf unsere Haut, dann wird deren Bewegung durch Stoßkontakt auf die Haut übertragen und bringen die Hautmoleküle zum Schwingen. Wenn die aufgezwungene Bewegung größer ist als die der Hautmoleküle empfinden wir das als Wärme, wenn sie kleiner ist, als Kälte.

Per Definitionem ist bei null Bewegung die Temperatur Null Kelvin. Daher kann es keinen negativen Temperaturen in Kelvin geben und die Kelvin-Skala ist daher die einzige, die physikalisch Sinn macht. Bei der Celsius-Skala ist dieser Nullpunkt lediglich um 273.15 Grad nach oben auf den Taupunkt von Eis verschoben.

Mikrophysik der Wärme III

Wenn wir sagen „Ein Raum ist warm“, dann bewegen sich die Luftmoleküle schneller, als wenn es kalt ist. Obwohl, Kälte kann es in diesem Sinne nicht geben, sondern nur mehr oder weniger Wärme - beim absoluten Nullpunkt gibt es Null Wärme. Was aber ist, wenn es keine Luft gibt, sondern nur Vakuum wie im Weltraum. Wo keine Luft, da macht es auch keinen Sinn, über eine warme oder kalte Umgebung zu reden. Es gibt keine Vakuumtemperatur, da es im Vakuum nichts gibt, was sich bewegt.

Strahlungswärme

Es gibt aber noch die Strahlungswärme, also die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung, sagen wir Sonnenlicht. Wenn man am Strand liegt und die Sonne auf den Pelz brennt, dann treffen Lichtteilchen (Photonen) auf die Hautmoleküle, wobei sie ihren Impuls (**und ihre Energie**) übertragen und die Hautmoleküle zum Schwingen anregen. Dieses Schwingen empfindet man als wohlige Sonnenwärme.

Mikrophysik der Wärme IV

Obwohl es also im Weltraum keine Wärmeübertragung per Wärmeleitung gibt (**und geben kann**), gibt es Strahlungswärme, also elektromagnetische Teilchen, die Energie und Impuls auf Oberflächen übertragen können.

Die Zufälligkeit (**Kennzeichen der Wärme**) bei Photonen besteht in der Zufälligkeit der Frequenz (**Farbe - Impuls**) und Richtung. Die Geschwindigkeit ist durch die Lichtgeschwindigkeit vorgegeben.

Unser Weltraum ist voll von kosmischer Hintergrundstrahlung. Deren Energie ist allerdings so gering, dass sie nur einer Temperatur von 2.7 K entspricht, also etwa -270°C . Jeder Körper in den Tiefen des Universums kühlt (**durch Strahlung**) auf diese Temperatur ab! Das Universum ist also ein perfektes Gefrierfach.

Ende Zitat

Der II. Hauptsatz der Thermodynamik I - Zufälligkeit

Ein wesentlicher Hauptsatz der Thermodynamik ist der II. Hauptsatz. Viele glauben, das er genau so uneingeschränkt gültig ist wie der I. Hauptsatz (Energieerhaltungssatz). Das glaubte anfangs sogar der Wärmephysiker Max Planck und kritisierte Ludwig Boltzmann - allerdings erkannte Max Planck durch seine eigenen Untersuchungen, das der II. Hauptsatz nur Wahrscheinlichkeitsaussagen macht. Aber - wegen der vielen Moleküle sind selbst in einem kleinen Volumen die Abweichungen vom wahrscheinlichsten Wert so gering, daß diese in der Regel keine Rolle spielen und man meistens den II. Hauptsatz auch als uneingeschränkt gültig betrachten kann.

Der II. Hauptsatz der Thermodynamik II

Temperatur und Strahlungsintensität

In der unteren Atmosphäre stoßen die Moleküle zusammen und bei jedem Zusammenstoß können die unangeregten Treibhausmoleküle angeregt werden bzw. angeregte Treibhausmoleküle abgeregt werden. Dabei ist die Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle (bestimmt durch die lokale Temperatur an dem betreffenden Atmosphärenort) entscheidend für die Häufigkeiten der An- bzw. Abregungen - und damit auch die Dichte der angeregten Zustände mit deren Zufälligkeit.

Da ein angeregtes Molekül unabhängig von anderen abstrahlt (in irgendeine eine zufällige Richtung in einer Vollkugel) ist dadurch die Strahlungsintensität durch die zufällige Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle und damit durch die lokale Temperatur bestimmt. In größeren Höhen (weitgehend über 60 km Höhe) wird die Dichte der angeregten Zustände durch die Absorption von Photonen mehr oder weniger modifiziert und so wird der Zustand des lokalen thermodynamischen Gleichgewichts (LTE) verlassen.

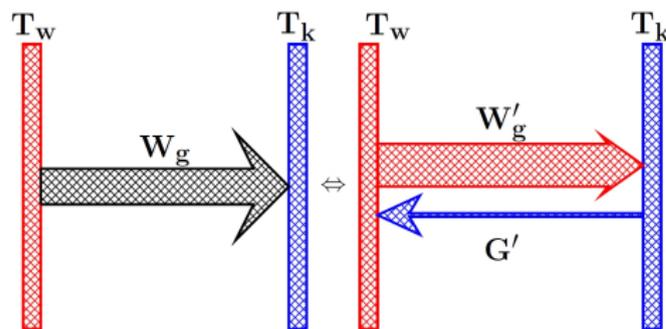
Und weiter geht es mit der Erklärung der Begriffe.

Geschichte

Der Sachverhalt der Gegenstrahlung ist keine Erfindung des IPCC (wie einige Skeptiker behaupten), sondern wurde schon **1879** von Stefan [19, Seite 411] bei seinen Strahlungsuntersuchungen erkannt und kurz darauf z. B. von Clausius [5, Seite 315] (»Vater« des II. Hauptsatzes der Thermodynamik) verwendet. Beide hatten nur die Strahlungsverhältnisse im Blick ohne sich mit dem Treibhauseffekt zu beschäftigen.

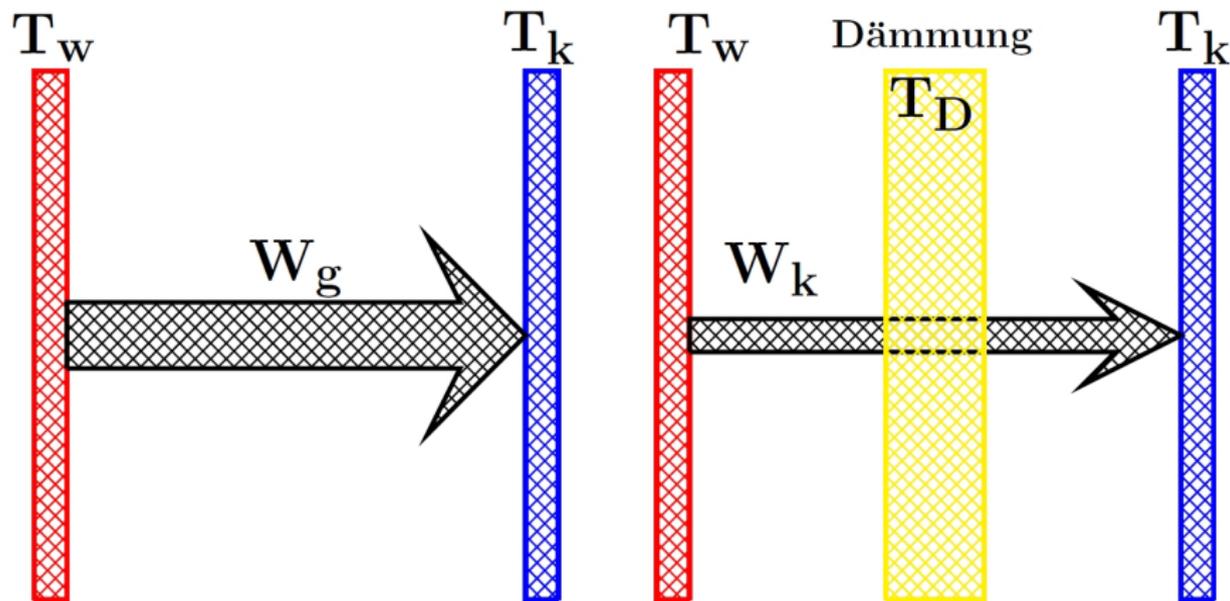
Für den Sachverhalt der Gegenstrahlung werden (speziell beim Treibhauseffekt) viele Bezeichnungen benutzt: z. B. Abwärtsstrahlung, Strahlung von kalt nach wärmer, backradiation, downwelling radiation, langwellige Einstrahlung.

In den folgenden Folien sind gleiche Strahlungsintensitäten mit gleichen Pfeildicken dargestellt (\Leftrightarrow bedeutet äquivalent).



Zwischen einer warmen Fläche mit der Temperatur T_w und einer kühleren Fläche T_k fließt ohne Behinderungen ein bestimmter Netto-Strahlungs-Wärmestrom W_g . Dieser Nettostrom setzt sich aus 2 entgegengesetzten Wärmeströmen (W'_g und Gegenrichtung G') zusammen. Dabei ist es gleichgültig, ob noch andere Wärmeströme existieren oder Vakuum herrscht.

Gemäß der horizontalen Anordnung fällt ein konvektiver Wärmestrom sowieso fast weg.



Wird zwischen die beiden Flächen (links) eine absorbierende Schicht (Dämmung, absorbierende Gasschicht usw.) eingefügt (rechts), so reduziert sich der Nettowärmestrom erheblich - auf W_k - wobei sich in der Dämmschicht eine Temperatur T_D einstellt.

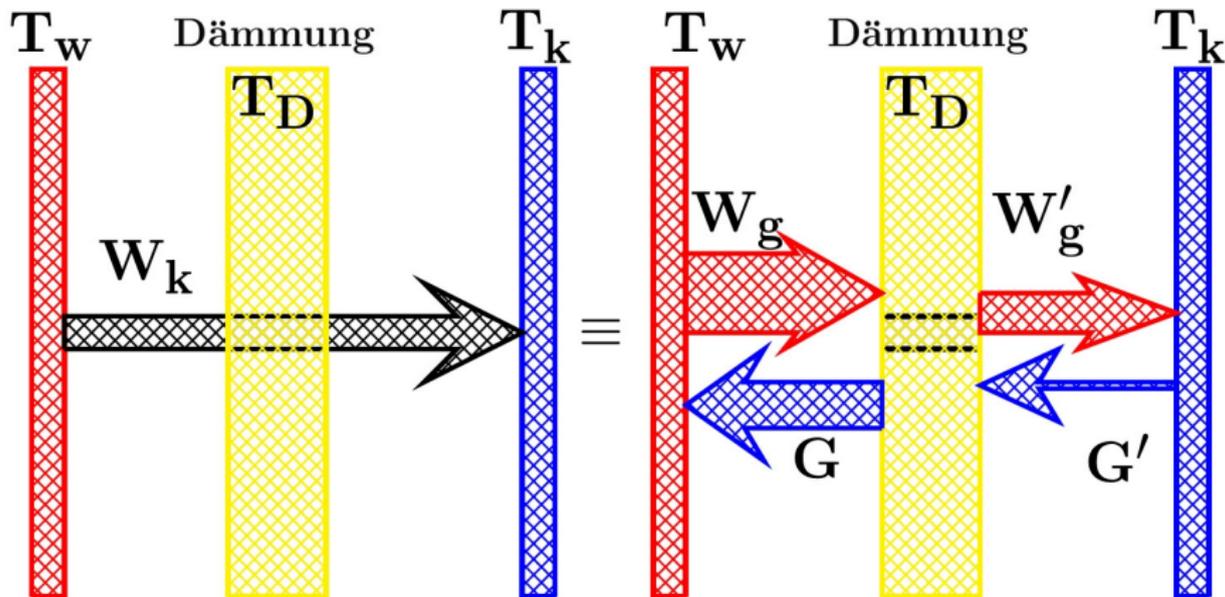
Diese Temperatur T_D liegt zwischen T_w und T_k .

Kann die warme Fläche wissen, daß sie bei einer Dämmschicht weniger strahlen darf?

Natürlich nicht!

Ausweg (mit physikalischem Hintergrund):

Die Gegenstrahlung



Wärmestrommäßig sind linkes und rechtes Bild identisch

wenn gilt

$$W_k = W_g - G = W'_g - G'$$

$$\text{Nettostrahlung} = W_g - \text{Gegenstrahlung}$$

Ergänzung - II. Hauptsatz der Thermodynamik

Im Zusammenhang mit dem Klima steht folgende Formulierung des II. Hauptsatzes der Thermodynamik:

Wärme fließt immer von warm nach kühler

Als Clausius 1840 den II. Hauptsatz der Thermodynamik aufstellte, war die Aufteilung des Wärmestromes in Hin- und Gegen-Strahlung noch nicht Allgemeingut der Wissenschaft. Als einer der Anwendungsfälle konnte Clausius diese Zerlegung 1840 nicht extra nennen, erst in seiner Arbeit von 1864 hat Clausius diesen Spezialfall genannt. Heute begehen einige den Fehler, den II. Hauptsatz der Thermodynamik separat auf die Gegenstrahlung anzuwenden. Wenn diese falsche Anwendung zutreffend wäre, wäre tatsächlich der II. Hauptsatz der Thermodynamik verletzt. Der II. Hauptsatz der Thermodynamik ist also nicht verletzt, sondern er wird »nur« von Laien falsch angewandt.

Anmerkung - II. Hauptsatz der Thermodynamik

Anmerkung: Zur Beschreibung bestehender Systeme ist der II. Hauptsatz der Thermodynamik entbehrlich - er bringt keine neuen Erkenntnisse. Wer glaubt in bestehenden Systemen Widersprüche zum II. Hauptsatz der Thermodynamik zu entdecken hat sowohl den II. Hauptsatz der Thermodynamik als auch das System nicht verstanden.

Noch eine Möglichkeit: Der Autor hat absichtlich so verklausuliert geschrieben, daß Laien zwangsweise aus dem unklaren Text das Falsche herauslesen.

Wichtig ist der II. Hauptsatz der Thermodynamik z.B. zum Abschätzen der Möglichkeiten, ein bestehendes System zu verbessern. Wenn ein bestehendes System schon die Grenze des II. Hauptsatz der Thermodynamik erreicht hat - dann ist keine Verbesserung möglich.

Weiter mit der Gegenstrahlung

Messen kann man nur die Nettostrahlung W_k .

W_g folgt aus bekannten physikalischen Gesetzen
Z.B. dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$W = \sigma T^4$$

W : Wärmestrahlung in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante = $5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

T : absolute Temperatur in K

Erst einmal Begriffe - Gegenstrahlung

Kennt man 2 Größen (Nettostrahlung, Meßgeräte-Temperatur), ist es einfach die 3. Größe (Gegenstrahlung) zu berechnen.

$$G = W_g - W_k$$

Gegenstrahlung = theoretischer Wert - Nettostrahlung

$$G = \sigma T^4$$

(Stefan-Boltzmann-Gesetz)

Auf dieser Basis arbeitet das Meßgerät für die Gegenstrahlung - das

Pyrgeometer

erfunden 1905 von Ångström

Heute erfolgt in einem fertigen Meßgerät für die Gegenstrahlung (Pyrgeometer) diese Berechnung intern und nur das Ergebnis wird angezeigt.

Erst einmal Begriffe - Gegenstrahlung

Wegen der Bedeutung wird die Gegenstrahlung (= langwellige Einstrahlung, die auch von der Wolkenbedeckung abhängt) laufend gemessen

Z.B. am Hamburger Wettermast

<http://wettermast-hamburg.zmaw.de/Zeitreihen8d.htm#STRAHLUNG>

Hier ein Beispiel:



Die Gesamtwärmestrahlung ist die Summe von Globalstrahlung und Gegenstrahlung. Deswegen ist es tagsüber bei Wolkenbedeckung kühler und nachts wärmer als ohne Wolken.

Erst einmal Begriffe - Photonen und Moleküle

Seit 1916 (Einstein) [6] kann man sich sogar Vorstellungen von Einzelheiten vieler Strahlungen (einschließlich Gegenstrahlung) machen - mit der Einzelheit

Photonen

Dabei senden die Moleküle im Mittel die Photonen gleichmäßig in alle Richtungen aus. Wie oft ein Photon ausgesandt wird, wird durch die Temperatur bestimmt.

Erst einmal Begriffe - Photonen und Moleküle

In der vorhergehenden Folie sind neue Begriffe eingeführt worden:

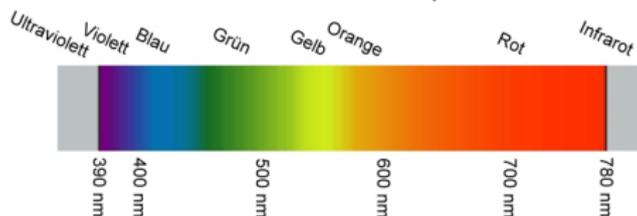
Photonen: Die Intensität einer Strahlung kann nicht beliebig klein gemacht werden, wie die Quantentheorie gezeigt hat. Die untere Grenze sind Energiepakete (Photonen), die ausgesandt werden von

Moleküle: Ein Gas erscheint uns als homogen, könnte man ein beliebig stark vergrößerndes Mikroskop benutzen, würde man sehen, daß das Gas nicht homogen ist, sondern aus einzelnen Teilchen besteht, den Molekülen. Dabei sind in der Luft verschiedene Moleküle: Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2) usw. Dabei haben die unterschiedlichen Moleküle auch unterschiedliche Eigenschaften. Eine besondere Rolle spielen die

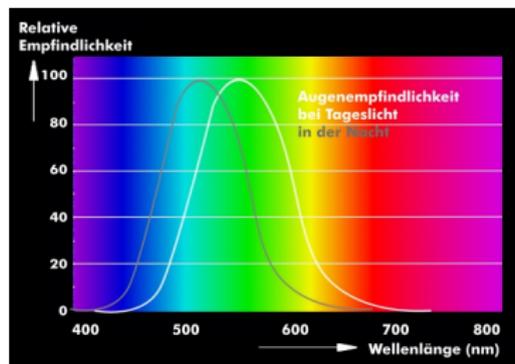
Treibhausgasmoleküle: Die Moleküle spezieller Gase wirken auf Strahlung ähnlich wie ein Nebeltröpfchen - sie sind strahlungsaktiv. Dazu gehören Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O).

Erst einmal Begriffe - Wellenlänge

Die Strahlung hat verschiedene Eigenschaften. Die Intensität und (im sichtbaren Bereich) die verschiedenen Farben (z. B. hinter einem Glasprisma).

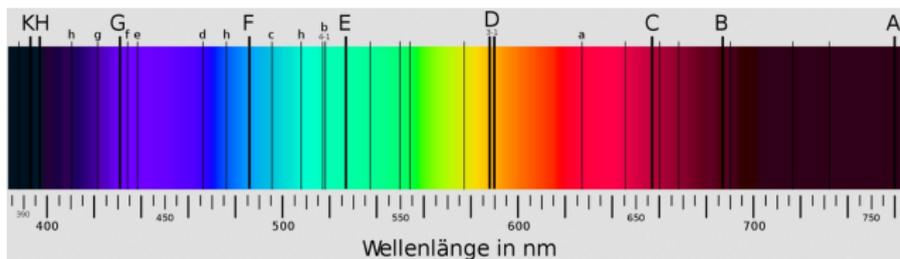


An den sichtbaren Bereich schließen sich Bereiche an, die für das Auge unsichtbar sind, denn die Augenempfindlichkeit ist farbabhängig:

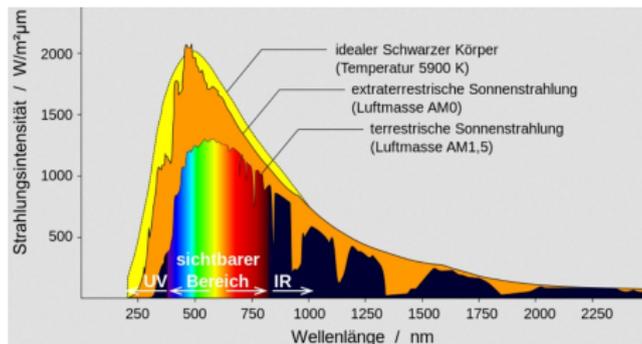


Erst einmal Begriffe - Wellenlänge

Da Farben sehr subjektiv sind und nur einen kleinen Strahlenbereich umfassen arbeitet man in Physik und Klimatologie mit der Wellenlänge (hier ein Regenbogenspektrum - nm: Nanometer = 1 milliardeltes Meter):



Die Intensitätsdarstellung des obigen Diagramms sieht so aus:



Erst einmal Begriffe - Spektrum

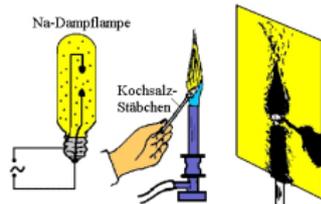
Im Regenbogenspektrum sind dunkle Linien enthalten, genannt Fraunhoferlinien. Diese Linien sind auf der vorigen Seite deutlich zu sehen - aber nur deshalb, weil das Spektrum gut aufgelöst ist. Der darunter dargestellte Intensitätsverlauf zeigt dort Einbrüche, wo die Fraunhoferlinien sind. Gleichzeitig ist zu sehen, daß die Intensität nicht auf Null fällt, sondern nur erheblich geringer wird. Grund ist, daß dort, wo absorbiert wird, auch emittiert wird - aber an der Sonnenoberfläche in der Regel weniger, weil die Temperatur des Emissionsbereiches dort niedriger ist. Das wirkt sich aber nur bei einer kurzen Absorptionslänge aus.

Der Versuch auf der folgenden Seite zeigt die Ursache für die Fraunhoferlinien im Regenbogenspektrum. Was im sichtbaren Bereich passiert, das passiert natürlich auch im infraroten Bereich und ist in der übernächsten Folie gezeigt.

Erst einmal Begriffe - Absorption und Emission

Was im Infraroten z. B. beim CO_2 unsichtbar passiert, ist im sichtbaren Bereich bei der gelben D-Linie sehr gut zu sehen:

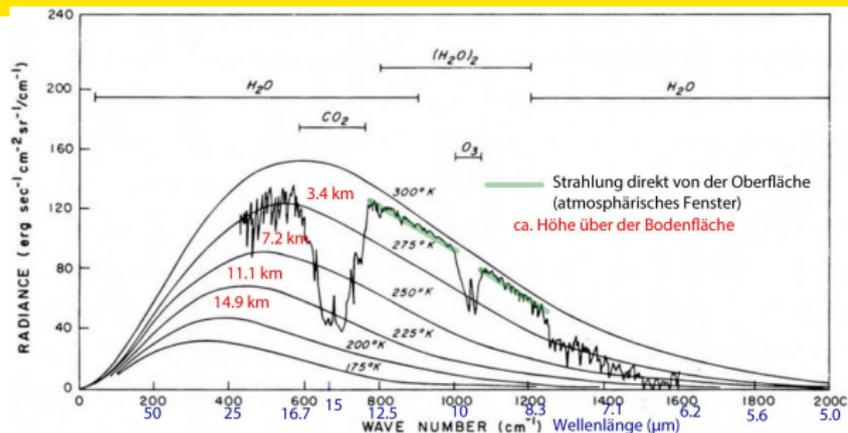
Beleuchtet wird ein Schirm hell mit einer Natrium-Dampflampe, wie sie auch in den gelben Straßenleuchten verwendet wird. Interessant ist der Schatten, der als Folge einer zusätzlichen gelben Flamme entsteht. Diese Gelbfärbung einer Flamme entsteht, wenn z. B. Kochsalz in diese Flamme gehalten wird, in dem Versuch links mit einem Stäbchen. (Bilder aus [7, V. 7.2.15] und [15])



Der Flammenteil unterhalb der Gelbfärbung wirft keinen Schatten, obwohl er kaum leuchtet. Obwohl der Gelbteil viel mehr leuchtet, wirft er Schatten. Wie kommt das?

Die Absorption bei diesem Experiment ist in Richtung Schirm stärker als die Emission, umgekehrt ist es in Richtung Kamera.

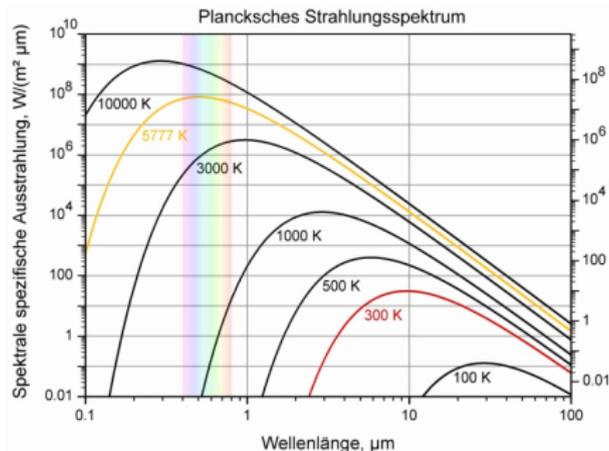
Erst einmal Begriffe - Infrarot-Spektrum



Die gezackte Spektrumskurve zeigt die Abstrahlung der Erde ins All als Folge der Temperaturverteilung und der Wirkung der verschiedenen Absorptionslängen (als Eigenschaft der Treibhausgase), die von einem Satelliten [10] gemessen wurde (Satellit über Guam). Die glatten Intensitätskurven wurden mit der Planckschen Strahlungsgleichung berechnet, deren Parameter Temperaturen sind. Umfangreichere Planckkurven sind auf der folgenden Folie.

Bemerkenswert am Tal bei 15 µm ist in der Mitte eine Spitze. Dort ist nämlich die Absorptionslänge so kurz, daß sie nur bis in die warme Ozonschicht reicht.

Erst einmal Begriffe - Planck-Verteilung



Intensitätskurven nach Planck (bzw. der Planckschen Gleichung).

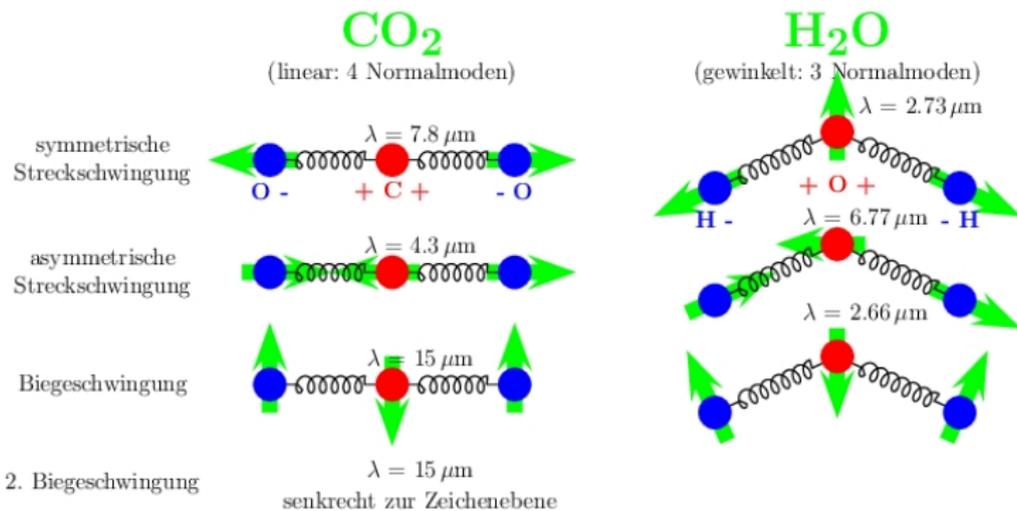
Parameter ist die absolute Temperatur. Wo das Maximum der Intensität dargestellt wird, hängt etwas von der Teilung der Wellenlängenachse ab.

Die rote Kurve liegt in der Nähe der Oberflächentemperatur der Erde. Die gelbe Kurve liegt in der Nähe der Oberflächentemperatur der Sonne. Wegen der großen Entfernung der Sonne von der Erde ist allerdings die solare Intensität in der Nähe der Erde vergleichbar mit der Abstrahlung der Erde.

Molekülschwingungen

Wie kommt es zu den scharfen Einbrüchen im Spektrum?

Moleküle sind schwingungsfähige Gebilde mit den Atomen als Massenpunkten, die durch Bindungskräfte als Federwirkung zusammengehalten werden:



Molekülschwingungen

Wie werden die Schwingungen an- und abgeregt?

Strahlungen sind sowohl als Photonen als auch als elektromagnetische Felder zu beschreiben. Damit diese Felder mit den schwingungsfähigen Gebilden (Molekülen) in Wechselwirkung treten können, müssen die Moleküle elektrische Außenwirkungen aufweisen. Die beteiligten Atome sind ohne Bindungen elektrisch neutral, weil sich durch die Symmetrie im Atom die elektrischen Wirkungen (die negative Ladung der Elektronenhülle und die positive Kernladung) kompensieren - es gibt keine Wechselwirkung. Durch die Bindung im Molekül ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen nicht mehr symmetrisch. Beim CO_2 halten sich die Elektronen vorzugsweise bei den Sauerstoffatomen (O) auf, weshalb die Sauerstoff“massenpunkte“ eine negative Ladung haben und dementsprechend das Kohlenstoffatom (C) eine positive Ladung - es kann zur Wechselwirkung kommen.

Molekülschwingungen - Absorption

Weitere Bedingungen für die Wechselwirkung:

Wenn die Frequenz des elektromagnetischen Feldes (der Strahlung also) und die Schwingungsfrequenz des Moleküls nicht übereinstimmen, ist im Mittel die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekül Null. Wenn aber beide Frequenzen übereinstimmen (Resonanz) ist die Wechselwirkung stark und ein nicht angeregtes Molekül fängt an zu schwingen. Die Schwingungsenergie wird dem Feld entnommen (Absorption). Dabei kann auch die Schwingungsenergie nicht beliebig klein sein - wie bei der Photonenbeschreibung ist eine Mindestenergiemenge erforderlich. Genau diese Energiemenge hat ein absorbierbares Photon. Das bedeutet, daß bei der Absorption aus dem Strahl ein Photon verschwindet und das Molekül schwingt, also im angeregten Zustand ist.

Molekülschwingungen - Emission

Energieabgabe:

Wenn das Molekül schwingt, ist das eine bewegte elektrische Ladung und eine bewegte Ladung strahlt ein elektromagnetisches Feld ab, analog dem Sender im Handy. Auch hier können wieder nicht beliebig kleine Energiemengen abgegeben werden, sondern es heißt schwingen oder überhaupt nicht schwingen. Mit anderen Worten: bei der Emission hört das Molekül auf zu schwingen, geht also in den unangeregten Zustand über, und dem Strahl wird ein Photon hinzugefügt. Mit weiteren Worten: ein Molekül bleibt nicht ewig im angeregten Zustand - das wird spontane Emission genannt.

Die ausgesandten Photonen haben dabei verschiedene Wellenlängen in einem gewissen Bereich. Dabei hängt die Breite des Bereiches davon ab, wie groß die Lebensdauer eines angeregten Zustandes ist. Durch Zusammenstöße bei höheren Moleküldichten wird die Lebensdauer verkürzt und dementsprechend der Wellenlängenbereich verbreitert.

Molekülschwingungen - Messung

Wie ist die Größe dieser Wirkungen zu messen?

Da immer gleichzeitig Emission und Absorption vorliegen, könnte man im ersten Moment annehmen, daß sich beide Wirkungen aufheben, also nichts zu bemerken ist. Das ist bei Isothermie tatsächlich so - daher muß man geeignete Meßbedingungen schaffen, wenn man messen will. Das verlangt, daß man z. B. als Strahlenquelle eine Quelle hoher Intensität benutzt - einen sehr heißen Körper oder sogar einen Laser. Dann spielt die Emission fast keine Rolle und es werden nur Photonen aus dem Strahl entfernt - damit wird der Strahl um so schwächer um so weiter er durch einen absorbierenden Körper läuft. Nach einer gewissen Strecke ist also die Anfangsintensität auf einen festgelegten Bruchteil abgesunken. Die Länge dieser Strecke wird als Absorptionslänge bezeichnet und ist umgekehrt proportional der Dichte bzw. die Anzahl der absorbierenden Moleküle. In der Absorptionslänge ist die Anzahl der absorbierenden Moleküle annähernd gleich. Es gibt auch noch modifizierte und empfindlichere Meßverfahren, z.B. die Photoakustik, wo ausgenutzt wird, daß die absorbierte Strahlungsenergie in Wärme verwandelt wird.

weitere Emissionsform

Außer den vorgenannten Vorgängen (spontane Emission und intensitätsabhängige Absorption) gibt es noch die induzierte Emission, die ebenfalls intensitätsabhängig ist: Durch ein Feld wird ein angeregtes Molekül veranlaßt nach kürzerer Zeit zu emittieren, als es bei der spontanen Emission der Fall ist.

Durch Kombination der 3 Übergänge (spontane Emission, induzierte Emission und Absorption) hat Einstein 1916 [6] gezeigt, daß die Planck'sche Strahlungsformel auch für Gase gilt. Dabei hat er auch gezeigt, daß die spontane Emission in alle Richtungen gleich wahrscheinlich ist - unabhängig von der Richtung eines einfallenden Strahls und unabhängig vom Temperaturgradienten in dem sich das Molekül befindet. So kommt es auch zur Gegenstrahlung.

Energiebilanz der Atmosphäre

Im Zusammenhang mit der Atmosphäre gehen wir von einem durchschnittlichen Gleichgewicht aus (Klima) dem zum Teil massive Störungen überlagert sind (Wetter). Diese massiven Störungen werden in zweiter Linie behandelt. Da durch die Strahlungswechselwirkung Strahlung geschwächt, verstärkt, in der Richtung geändert wird, in Wärme umgewandelt wird bzw. Wärme in Strahlung umgewandelt wird, muß für die mathematische Behandlung der Zusammenhang zwischen den optischen Eigenschaften (wesentlich ist die wellenlängenabhängige Absorptionslänge) und der Strahlung hergestellt werden.

Dieser Zusammenhang ist die Strahlungstransportgleichung. Zunächst gilt die Strahlungstransportgleichung für jede Wellenlänge separat und enthält die wellenlängen- und lebensdauer-abhängige Absorptionslänge und die lokale Temperatur, die natürlich für alle Wellenlängen gleich ist. Wenn sich in Strahlrichtung die Intensität ändert, führt diese Änderung im ersten Schritt zu einer gleichgroßen Änderung im Wärmegehalt an diesem Ort. Alle Änderungen (einschließlich konvektiv herangeführter Wärme) müssen insgesamt Null ergeben - sonst wäre es ja kein Gleichgewicht, das sich bei einer bestimmten Temperatur ergibt. Energie, die ein Strahl verliert, wird also anderen Richtungen bzw. Wellenlängen zugeschlagen bzw. umgekehrt.

Vereinfachung

nach oben F_{\uparrow}



nach unten F_{\downarrow}

In der Atmosphäre gehen die Strahlen in alle Richtungen (also beliebig, unten, oben, seitlich) mit verschiedenen Wellenlängen und Intensitäten.

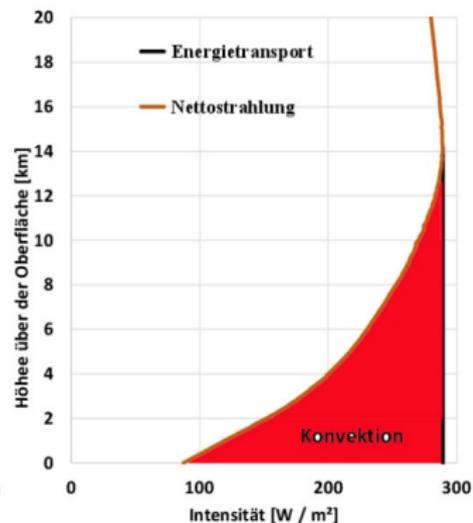
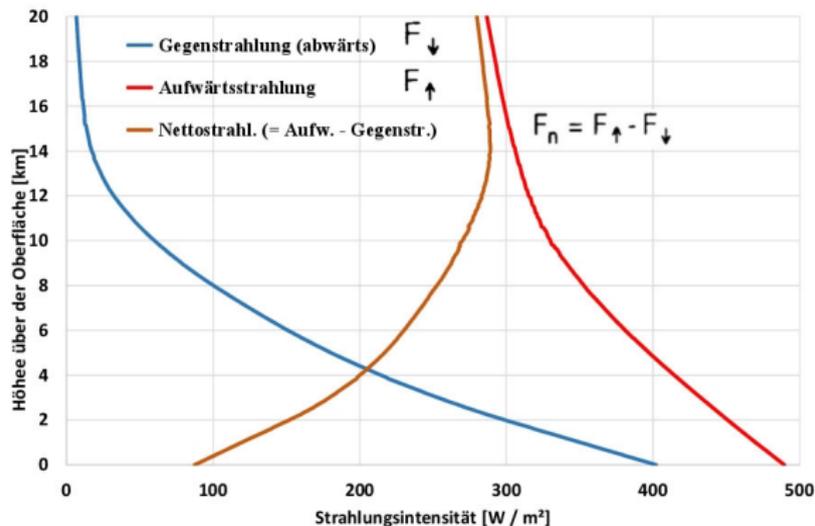
Zur Vereinfachung der weiteren Betrachtung werden alle Strahlen rechnerisch zu zwei Strahlen in vertikaler Richtung zusammengefaßt: Sowohl für den **oberen** (F_{\uparrow}) als auch für den **unteren** (F_{\downarrow}) Halbraum, wobei jeder Strahl die nach oben bzw. unten fließenden Leistung im jeweiligen Halbraum zusammenfaßt.

Dabei ist wieder zu berücksichtigen, daß nur die Differenz der beiden Strahlungsleistungen (Nettostrahlung) beobachtet werden kann - aber die Aufteilung in zwei Richtungen erleichtert das Verständnis.

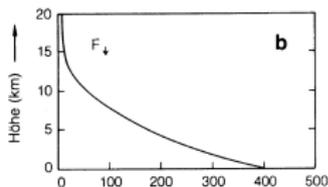
Damit ergibt diese Beschreibung die nachfolgende Folie:

Zweistrommodell

Mit den nachfolgenden Zweistrommodellen [17] können zwar die einzelnen Flüsse nicht berechnet werden (das erfordert die separate Berechnung jedes Strahls), aber da die Zusammenhänge für jeden Strahl gelten, eignet sich diese Darstellung gut zur Erklärung - auch der zusammengefassten Strahlung und der daraus folgenden Konvektion.



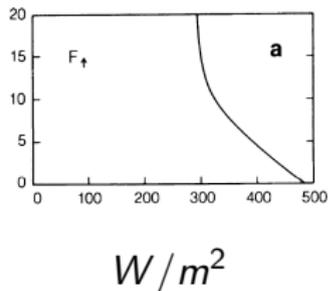
Gegenstrahlung



W/m^2

Aus dem Weltraum kommt fast keine Infrarotstrahlung. Dadurch überwiegt die Emission, demzufolge erhöht sich die Intensität nach unten und nähert sich der Intensität entsprechend der lokalen Temperatur - erreicht diese aber nie, weil nach unten auch die lokalen Temperaturen zunehmen. Wie schnell diese Annäherung erfolgt, hängt vom Mittelwert der Absorptionslängen ab. Ohne die Zunahme der Temperaturen würden sich sowohl Gegenstrahlung als auch Aufwärtsstrahlung der Intensität dieser konstanten Temperatur annähern und die Differenz beider (Nettostrahlung) würde Null - das geht aber nicht, da eine Nettostrahlung durch die absorbierte Solarstrahlung an der Erdoberfläche erzwungen wird.

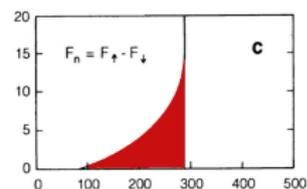
Aufwärtsstrahlung



Durch die absorbierte Solarstrahlung und Gegenstrahlung beginnt die Aufwärtsstrahlung mit hoher Intensität an der Erdoberfläche (was gleichbedeutend mit hoher Temperatur ist). Dadurch überwiegt die Absorption, demzufolge verringert sich die Intensität nach oben und nähert sich der Intensität entsprechend der lokalen Temperatur - erreicht diese aber nie, weil nach oben die lokalen Temperaturen abnehmen. Wie schnell diese Annäherung erfolgt hängt vom Mittelwert der Absorptionslängen ab. Ohne die Abnahme der Temperaturen würden sich sowohl Gegenstrahlung als auch Aufwärtsstrahlung der Intensität dieser konstanten Temperatur annähern und die Differenz beider (Nettostrahlung) würde Null - das geht aber nicht, da eine Nettostrahlung durch die absorbierte Solarstrahlung an der Erdoberfläche erzwungen wird.

Nettostrahlung

Der Wärmestrom nach oben ist durch die absorbierte Solarstrahlung gegeben. Wenn kein zusätzlicher Wärmeeintrag stattfindet (z. B. ist in der Ozonschicht das Gegenteil der Fall), dann muß der Wärmestrom nach oben konstant sein.



W/m^2

Oben reicht der Strahlungswärmetransport für die gesamte Nettostrahlung aus. Wenn der Nettostrahlungsstrom nicht groß genug sein kann, dann wird die Differenz durch Konvektion (oft als Diffusion) transportiert (rote Fläche). Damit ergibt sich die Frage: Welchen Einfluß hat die Absorptionslänge (und damit die Treibhausgaskonzentration) auf diese Verhältnisse? Diese Frage wurde schon 1906 (Karl Schwarzschild [18] - bekannter deutscher Physiker) bzw. 1908 (Ernest Gold [11] - Meteorologe, später Präsident der britischen meteorologischen Gesellschaft) geklärt.

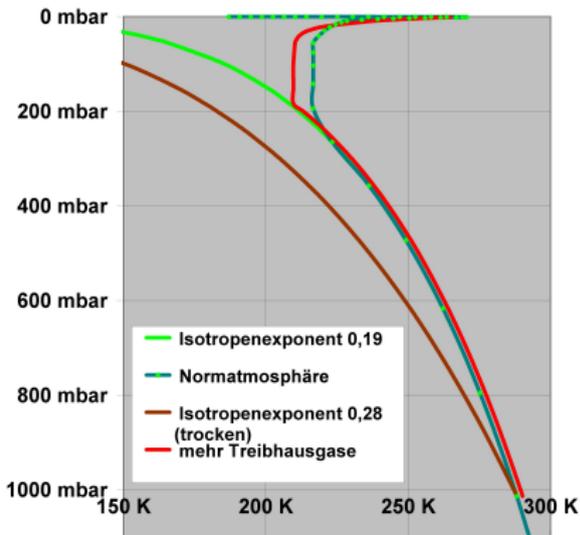
Die Frage ist, warum geht unten der Strahlungswärmetransport zurück?

Transportwiderstand

Nach Einstein (1916) [6] strahlt jeder Körper (also auch die Treibhausgase) entsprechend seiner Temperatur. Nach der Emission wird die emittierte Strahlung ggf. absorbiert. An einem anderen Ort wird auch emittiert. Wenn am zweiten Ort eine andere Temperatur als am ersten herrscht, so unterscheiden sich an beiden Orten die absorbierte und emittierte Strahlung - diese Unterschiede sind die Ursache des Nettotransports. Da die Intensitätsunterschiede um so größer sind, je kürzer die Absorptionslänge ist, wird bei gleichen Temperaturunterschieden der Nettostrahlungswärmestrom um so größer, je mehr Treibhausgasmoleküle zwischen beiden Orten sind.

Mit anderen Worten: Bei konstanten Nettowärmestrom sind über gleichen Treibhausgasmolekülmengen nahezu gleiche Temperaturdifferenzen - etwas von der lokalen Form der Spektrallinien beeinflusst.

Druckhöhe



Da bei gleichen vertikalen Druckunterschieden gleiche Molekülmengen sind, ist bei konstanten Nettowärmestrom das Verhältnis von Temperaturunterschieden zu Druckunterschieden konstant: $\frac{dT}{dp} = \text{konstant}$ - aber abhängig von der Treibhausgaskonzentration.

Um diese Verhältnisse zu verdeutlichen ist nebenstehend der Temperaturverlauf als Funktion der Druckhöhe (statt der geometrischen Höhe) dargestellt.

Temperaturgradient $\frac{dT}{dh}$

Nach unten nimmt der Druck zu, weil der Druck (p) die Folge des Gewichts der darüber befindlichen Luftmassen ist. Die Schnelligkeit der Druckänderung hängt deshalb von der Dichte (ϱ) der Luft ab. Da die Dichte der Luft druckabhängig ist, wird nach unten der Höhenunterschied (dh) immer kleiner (die Erdanziehung g ist näherungsweise konstant). Die Druckabhängigkeit der Dichte wird mit der idealen Gasgleichung beschrieben:

$$\frac{dp}{dh} = -\varrho g \qquad p = \varrho RT \quad \Rightarrow \quad \varrho = \frac{p}{RT}$$

Aus der Zusammenfassung beider Gleichungen folgt, gefolgt von der Kettenregel der Differentialrechnung:

$$\frac{dp}{dh} = -\frac{p g}{R T} \quad \Rightarrow \quad \frac{dp}{dT} * \frac{dT}{dh} = -\frac{p g}{R T}$$

Mit der Gleichung auf der vorigen Folie wird: $\frac{dT}{dh} = -\frac{p g}{R T} * \textit{konstant}$

Mit zunehmenden Druck wird also der Temperaturgradient größer, modifiziert durch die Temperatur.

Stratosphäre und Troposphäre

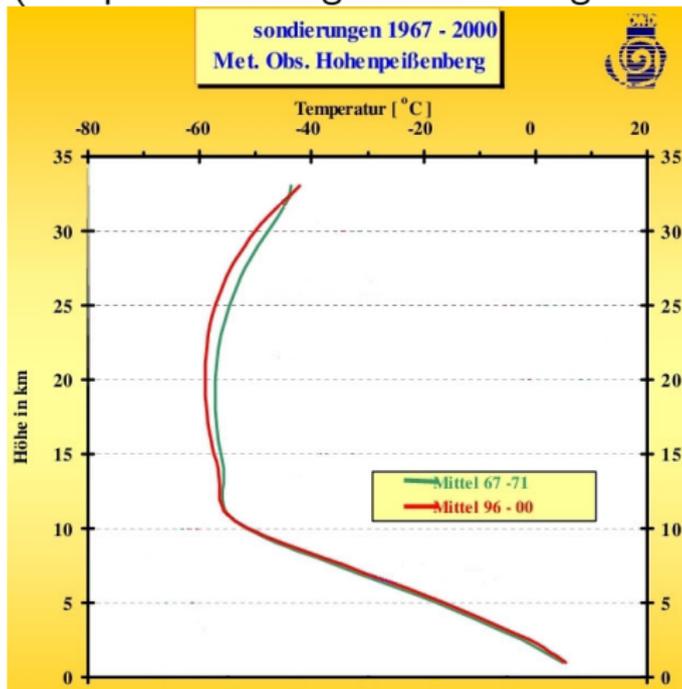
Der Temperaturgradient ist also immer 0 bei Druck 0, d.h. an der Spitze der Atmosphäre - ganz gleich, wie groß der Wärmestrom ist. Wegen des geringen Temperaturgradienten oben ist kaum Vertikalzirkulation und die Schicht ohne Vertikalzirkulation wird Stratosphäre genannt. Auf etwas anderem Wege hat Schwarzschild 1906 [18] diesen Sachverhalt abgeleitet.

Mit zunehmenden Druck wird der Temperaturgradient immer größer (beschrieben durch die Gleichung der vorigen Folie) und wenn er groß genug ist spielt dann die Luft Heißluftballon: Die Luft wird wärmer als die Umgebung und warme Luft steigt auf, dafür sinkt andere Luft ab. Oder mit anderen Worten: Beim Aufsteigen kühlt wegen der Druckabnahme zwar die Luft ab (adiabatische Abkühlung), ist aber die Abkühlung geringer als die Abkühlung der Umgebung wird bei einem zufälligen Aufsteigen eines Luftpaketes dieses immer weiter aufsteigen und nicht zur Ruhelage zurückkehren (Schwarzschild-Kriterium).

Wegen der Druckzunahme nach unten ist also unten eine Luftschicht mit Zirkulation, die Troposphäre genannt wird. Die Grenze zwischen der konvektionsarmen Stratosphäre und der konvektionsreichen Troposphäre wird Tropopause genannt.

Beobachtung

Die Beobachtungen bestätigen auch die vorgenannten physikalischen Zusammenhänge. Hier sind die Messungen der DWD-Meßstelle Hohenpeißenberg (Temperaturauszug aus dem Diagramm in [16, S. 5]):



Stratosphäre



Nebenstehend sind die Meßkurven der vorigen Folie idealisiert dargestellt. Die rote Kurve zeigt den Temperaturverlauf, der sich bei höherer Konzentration der Treibhausgase einstellt.

Da in der Stratosphäre die Konstante in der Gleichung für den Temperaturgradienten abhängig ist von der Konzentration der Treibhausgase, wird bei höheren Treibhausgas-Konzentrationen der kritische Temperaturgradient für das Einsetzen der Konvektion (Troposphäre - Knick der Kurven) bei niedrigeren Drücken bzw. größeren Höhen erreicht.

Messungen und Theorie stimmen also gut überein.

Troposphäre

Wegen der großen Treibhausgasmenge ist in der Troposphäre viel Konvektion. Wegen der Konvektion (u.a. Wasserdampf) ist der Temperaturgradient durch die Eigenschaften der Treibhausgase in der Luft kaum beeinflusst - selbst große Änderungen der Strahlungseigenschaften werden durch kleine Änderungen der Konvektion kompensiert.

Bei konstantem Energiefluß müßte mit zunehmenden Druck bei einem reinen Strahlungsfluß der Temperaturgradient immer größer werden, kann aber ggf. wegen einsetzender Konvektion nicht weiter größer werden, deshalb muß sich der Nettostrahlungsfluß reduzieren - was auch beobachtet wird. Dafür wird der konvektive Wärmestrom immer größer.

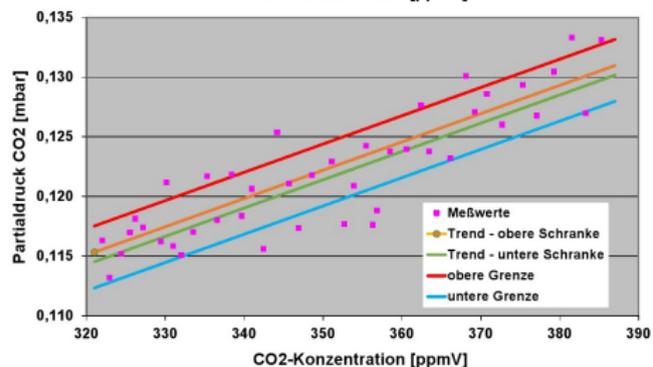
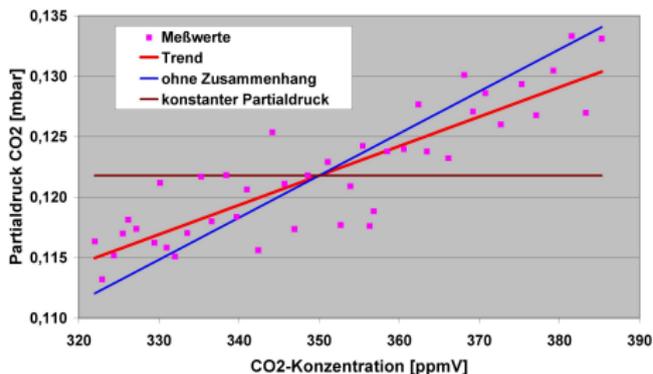
Anmerkung: Die vorliegende Berechnung folgt nicht dem IPCC-Rechengang mit den Rechengrößen (nicht realen Größen) Strahlungsantrieb und Rückkopplungen. Durch diese Rückkopplungen entsteht z. B. der konstante Temperaturgradient. Nur den halben IPCC-Rechengang (nur Strahlungsantrieb) zu verwenden (wie es Skeptiker oft tun), muß natürlich zu falschen Ergebnissen führen.

Ozonschicht und Tropopausenmessung

In größeren Höhen nimmt in der Stratosphäre die Temperatur wieder zu. Diese Temperaturzunahme wird von Einigen als "Beweis" dafür genommen, daß der Temperaturverlauf nicht weitgehend von der Abstrahlung der Oberfläche bestimmt wird. Aber schon bei der Konstanz des Energieflusses nach oben wurde darauf aufmerksam gemacht, daß diese Konstanz nur gegeben ist, wenn in der Atmosphäre keine Wärmequelle ist. Im Bereich der Ozonschicht wird UV-Strahlung von oben absorbiert. Damit wird diese Schicht geheizt, also kann keine Konstanz des Wärmeflusses vorliegen. Weil die Menge der Luft in dieser Höhe schon gering ist, ist diese UV-Heizung von geringer Bedeutung für den Temperaturverlauf in tieferen Schichten.

Die Daten der Tropopause werden schon seit 1900 durch Ballonaufstiege gemessen. In der nächsten Folie sind die Messungen der Jahresdurchschnitte über 42 Jahre an der DWD-Station Hohenpeißenberg mit ihrer Auswertung dargestellt:

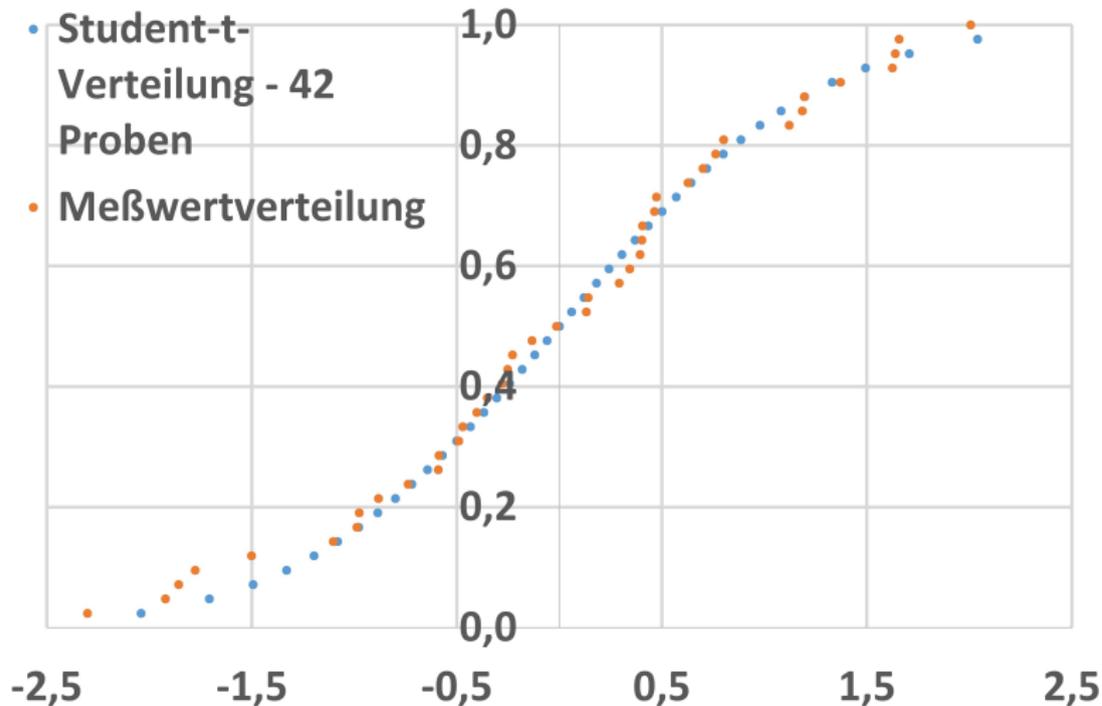
Tropopausen-Meßdaten



In der Stratosphäre ist die mögliche Änderung der CO₂-Menge auf folgenden Bereich beschränkt: Die Menge bleibt konstant (braune Kurve) oder folgt der Konzentrationsänderung = der Tropopausendruck bleibt konstant (blaue Kurve). Die Mittelwertkurve der Meßpunkte (rot) liegt tatsächlich innerhalb des möglichen Bereichs.

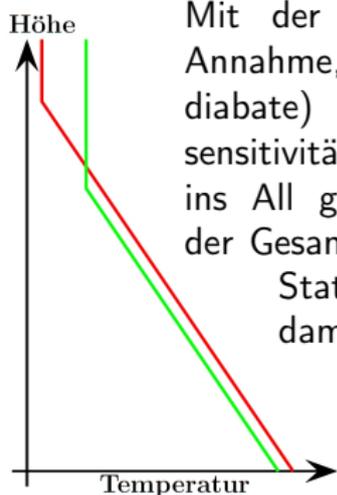
Die Auswertung der Abweichungen von der Mittelwertkurve zeigt eine diskrete Normalverteilung (siehe nächste Folie) und die Extrapolation der Mittelwertkurve ergibt die Klimasensitivität (übernächste Folie).

Tropopausen-Meßdaten



Summenpunkte für 42 Meßwerte bei einer diskreten Normalverteilung und die gemessenen Punkte. Mindestens ca. 30 Meßpunkte erforderlich.

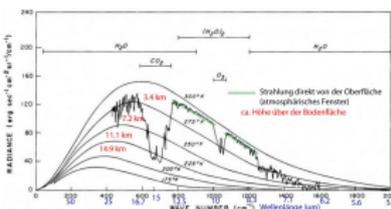
Klimasensitivität



Mit der Abnahme des Tropopausendrucks und der begründeten Annahme, dass der Temperaturgradient in der Troposphäre (Feuchtadiabate) konstant ist (siehe nebenstehendes Bild) folgt die Klimasensitivität, wenn noch berücksichtigt wird, daß die Abstrahlung ins All gleich der absorbierten Solarstrahlung sein muß (entspricht der Gesamtfläche unter der gezackten Meßkurve) - sonst könnte keine Stationarität vorliegen. Zur Feuchtadiabate trägt auch die Wasserdampfkondensation bei, die z. B. zu den Wolken führt.

Entsprechend der breiten Bodenabstrahlung ins All (grüner Bereich der gezackten Kurve) erfordert die Kompensation selbst einer geringen Erhöhung der Bodenabstrahlung wegen der Schmalheit der absorbierenden Wellenlängenbereiche eine starke Intensitätsabnahme - das bedeutet die Temperaturabnahme in der Höhe muß ca. 3 mal so groß sein, wie die Temperaturzunahme an der Oberfläche.

Damit ergibt sich eine Klimasensitivität von ca. 3 K an der Oberfläche (an der Tropopause ist sie natürlich höher). Zur Realität dieses Wertes siehe nachfolgende Folien.



Vertrauen zur Größe des Treibhauseffekts

Die in der vorigen Folie genannte Klimasensitivität von ca. 3 K gilt zuerst nur für Hohenpeißenberg. Aber da Hohenpeißenberg einen mittleren Breitengrad hat, dürfte es den Durchschnittswert für die gesamte Erde repräsentieren, denn im Äquatorbereich ist die Änderung geringer (dort ist die Stratosphäre schon heute dünn), aber dafür am Pol größer (dort ist die Stratosphäre heute noch dick).

Durch die dickere Troposphäre entsteht ein dickerer Transportkanal für die Verteilung der Wärme, weswegen die Temperaturen am Pol stärker zunehmen als am Äquator - gleichzeitig können aber auch die Wirbel stärker werden (Zunahme der Extremwetter-Ereignisse).

Noch andere Untersuchungen bestätigen diese Zusammenhänge. Mit Großrechnern und umfangreichen Programmen wird auch etwa der genannte Wert der Klimasensitivität erhalten und unterschiedliche Änderungen in Abhängigkeit vom Breitengrad.

Eine weitere Frage betrifft den Einfluß der Wolken usw. Da die Werte von Hohenpeißenberg gemessen wurden, enthalten die Meßwerte automatisch den Einfluß der Wolken usw. (z. B. Wärmetransport in Ozeanen).

Die große Streuung der Meßwerte, aber auch der eindeutige Trend der Änderungen zeigen, daß die Beobachtungen nur weniger Jahre nicht ausreichen, um den Trend zu erkennen. Das berücksichtigt die WMO bei der Klimadefinition.

Die Temperaturänderungen an der Oberfläche folgen den Auswirkungen nur langsam, da die Oberflächentemperatur wegen der großen thermischen Trägheit stärkerer Bestrahlung nur langsam folgt.

Größe des Treibhauseffekts

Die heutige durchschnittliche Oberflächentemperatur ist ca. $+15^{\circ}\text{C}$. Ohne den Treibhauseffekt wäre die Durchschnittstemperatur bei gleicher absorbierter Solarstrahlung [Produkt von Solarstrahlung und $(1 - \text{Albedo})$] und gleicher Oberflächenemissivität deutlich unter -18°C .

Die -18°C stellen den oberen Grenzwert für die Durchschnittstemperatur bei einer treibhausgasfreien Atmosphäre dar, die tatsächlichen Werte müssen darunter liegen. Mathematisch wird die Existenz eines oberen Grenzwerts mit der Hölderschen Ungleichung beschrieben. Je nach Annahmen liegt die Durchschnittstemperatur mehr oder weniger deutlich unter diesem oberen Grenzwert - sogar bis zu -150°C .

Das sind gesicherte Zahlen - und die sagen aus: Mit der heutigen Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre ist die Oberflächentemperatur mindestens 33 K höher ($= +15^{\circ}\text{C} - -18^{\circ}\text{C}$) als ohne Treibhausgase. Bei so einer Größe des Treibhauseffektes muß eine Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen Auswirkungen haben.

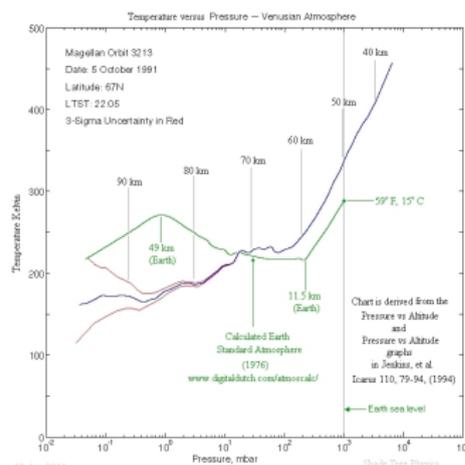
Weitere Auswirkungen des Treibhauseffekts

Die dickere Troposphäre (Anstieg der Tropopausenhöhe) bildet einen effektiveren Kanal zum Transport. Dadurch wird mehr Wärme aus der Äquatorregion in die polaren Regionen befördert, dh. die Polarregionen erwärmen sich stärker als die Äquatorregion. Gleichzeitig mit der sinkenden Temperaturdifferenz nimmt die Windgeschwindigkeit ab (z. B. als Antrieb für Hurricane). Daher können Hurricane langsamer wandern und teilweise andere Wege nehmen - das haben z. B. Hurricane in der Karibik 2017 gezeigt

Venus

Ein Vergleich zwischen Venus und Erde ist interessant.

Der Säulendruck des CO_2 an der Erdtropopause ist gegenwärtig ca. 0.12 mbar und wird bei Verdopplung der CO_2 -Konzentration auf ca. 0.16 mbar steigen.



Der Säulendruck des CO_2 an der Venustropopause ist ca. 0.4 mbar [9]. Von der Dicke der Troposphäre hängen die Temperaturen ab. Über Bergen ist die Dicke der Troposphäre dünner als über Tälern, deshalb ist es auf Bergen kühler als in Tälern. Die Venustroposphäre ist noch dicker als die Erdtroposphäre, hat aber fast den gleichen Temperaturgradienten, wie das das Diagramm der beiden unterschiedlichen Atmosphären zeigt. Das bestätigt, daß der troposphärische Temperaturgradient fast unabhängig ist von den Eigenschaften der Treibhausgase.

Die grundlegenden Eigenschaften durch Strahlung und Konvektion werden natürlich durch die Rotationsgeschwindigkeiten und Sonnennähe der Planeten etwas beeinflusst.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Auf den restlichen Folien sind die Literaturquellen aufgeführt.

Quellen I

- [1] Wettermast Hamburg - Langwellige Einstrahlung.
- [2] S. Arrhenius. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the earth [Über den einfluß von kohlendäure in der luft auf die temperatur des bodens]. *The London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 1896.
- [3] Beweis. 2011.
<https://ann53.files.wordpress.com/2011/09/klimawandel.jpg>.
- [4] M. Burke, S. M. Hsiang, and E. Miguel. Global non-linear effect of temperature on economic production [globaler nichtlinearer einfluss der temperatur auf die wirtschaftliche produktion]. *Nature*, 527:235, oct 2015.
- [5] R. Clausius. *Die Mechanische Wärmetheorie*, volume 3. Auflage. Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, 1887.
- [6] A. Einstein. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift bzw. Physikalische Gesellschaft Zürich - Mitteilungen*, 18:47 – 62 bzw. 121 – 128, 1916 bzw. 1917.

Quellen II

- [7] ETH. Schatten der Natriumflamme, 2008.
<http://expweb.phys.ethz.ch/07/02/15/bes.pdf>,
<http://expweb.phys.ethz.ch/pdf/katalog.pdf>.
- [8] J. Fourier. Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires [Erinnerung an die Erdtemperaturen und die Temperaturen des Alls]. *Mémoires de l'Academie Royale des Sciences*, 1824.
- [9] R. Fritzius. Venus Atmosphere Temperature and Pressure Profiles [Venus: Atmosphärentemperaturen und Druckprofile], 2014.
<http://www.datasync.com/~rsf1/vel/1918vpt.htm>.
- [10] C. Fröhlich. Strahlung und Klima, 2000.
ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/publications/Vorl_StrKlima_CF.pdf.
- [11] E. Gold. Atmosphere, isothermal layer of the, and atmospheric radiation [die isotherme schicht der atmosphäre und die atmosphärische strahlung]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 69:653 – 658, jun 1909.
Übersetzung <http://www.ing-buero-ebel.de/Treib/Gold.pdf>.

Quellen III

- [12] Hexen. 1445.
http://geschichtedergeologie.blogspot.de/2014_05_01_archive.html.
- [13] C. Hupfer, P. Käpylä, and M. Stix. Reynolds stresses - dependence on latitude [reynolds spannungen - abhängigkeit vom Breitengrad]. *Astronomische Nachrichten*, 326(3 - 4):223 – 226, 2005.
- [14] T. R. Karl, S. J. Hassol, and C. D. M. W. L. Murray. Temperature trends in the lower atmosphere. steps for understanding and reconciling differences [temperaturtrends in der unteren atmosphäre. schritte zum verstehen und versöhnen von unterschieden].
- [15] J. Maxton-Küchenmeister. Absorption von Photonen, 2013.
<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/atomarer-energieaustausch/lb/aufnahme-von-absorptionsspektren-versuch-mit-na>.
- [16] H. Mayer and A. Matzarakis. Ergänzungen zu Meteorologie und Klimatologie, 2003. <http://home.arcor.de/physikalisch/folienMETerg.pdf>.
- [17] W. Roedel and T. Wagner. *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer, 2011. <http://books.google.de/books?id=alvDMUwSgUQC>.

Quellen IV

- [18] K. Schwarzschild. Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1906:41 – 53, 1906.
- [19] J. Stefan. Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 79: 391 – 428, 1879. Faksimile auf <http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/Original/Stefan1879.pdf>.
- [20] Temperaturen. 2012. <http://www.skepticalscience.com/graphics/Escalator1024.gif>, <http://www.skepticalscience.com/graphics.php?g=47>.
- [21] Vergangenheit. 2006. http://www.risknet.de/fileadmin/template_risknet/images_content/Kolumne/Kolumne-03-2006-Abb2.jpg.
- [22] U. Walter. Wie warm ist es im Weltraum? 2014. Gastartikel von Prof. Dr. Ulrich Walter, Diplom-Physiker - Technische Universität München.