

Kommentierte Rohübersetzung von **Infrarot-Strahlung und planetarische Temperatur**

Raymond T. Pierrehumbert

Rohübersetzung

Dipl.-Physiker Jochen Ebel

16. Mai 2012

Inhaltsverzeichnis

-1	©-Bestimmungen	2
0	Kopfdaten und Ergänzungen	4
0.1	Fachartikel	4
0.2	Bitte	4
0.3	Vereinbarungen	4
0.4	Fehlendes	4
0.5	Kurzfassung Treibhauseffekt	6
1	Grundlagen	6
2	Ein paar Grundlagen	8
3	Spektroskopie der Treibhausgase	11
4	Bestätigung durch beobachtete Spektren	13
4.1	Troposphäre – Stratosphäre	13
5	Trugschlüsse bezüglich Sättigung	16
6	Energiebilanz und Oberflächentemperatur	17
7	Planeten nah und fern	19
8	Danksagung	19
9	Verzeichnisse	20
	Abbildungsverzeichnis	20
	Tabellenverzeichnis	21
	Literaturverzeichniss	21

-1 ©-Bestimmungen

Ein Paper mit Zitierungen anderer Paper ist ein selbständiges Werk. Abhängig vom Zweck des selbständigen Werkes sind dabei die Zitierungen aus anderen Papern mehr oder weniger umfangreich. Für nichtwissenschaftliche Werke gibt es dabei Beschränkungen für den Umfang der Zitierung (§ 51 UrhG <http://dejure.org/gesetze/UrhG/51.html>):

§ 51 Zitate

Zulässig ist die Vervielfältigung, Verbreitung und öffentliche Wiedergabe eines veröffentlichten Werkes zum Zweck des Zitats, sofern die Nutzung in ihrem Umfang durch den besonderen Zweck gerechtfertigt ist. Zulässig ist dies insbesondere, wenn

1. einzelne Werke nach der Veröffentlichung in ein selbständiges wissenschaftliches Werk zur Erläuterung des Inhalts aufgenommen werden,
2. Stellen eines Werkes nach der Veröffentlichung in einem selbständigen Sprachwerk angeführt werden,
3. einzelne Stellen eines erschienenen Werkes der Musik in einem selbständigen Werk der Musik angeführt werden.

Bei jeder Veröffentlichung eines selbständigen Werkes mit Zitaten kann man natürlich immer zusätzlich die Zustimmung des ©-Besitzers einholen. Werden in dem selbständigen Werk Fehler in dem zitierten Paper nachgewiesen, wird in der Regel der ©-Besitzer seine Zustimmung verweigern – allerdings ist die Verweigerung der Zustimmung nach 1. irrelevant.

Hat der ©-Besitzer allerdings sogar Interesse an der Veröffentlichung, so wird in der Regel der ©-Besitzer seine Zustimmung erteilen und ggf. Auflagen nennen.

Hier ist die Antwort auf die Anfrage zur Veröffentlichung der Übersetzung:

Das Paper “Raymond T. Pierrehumbert, TR.: Infrarotstrahlung und Planetentemperatur. Physics Today (2011) 64 / 1 S. 33 -38“

kann in der folgenden Weise verwendet werden:

Übersetzt ins Deutsche und veröffentlicht auf: <http://www.ing-buero-ebel.de/>.

1. Das American Institute of Physics gewährt Ihnen das Recht zur Vervielfältigung des obigen Materials auf einer einmaligen, nicht-exklusiven Basis, ausschließlich für den beschriebenen Zweck. Die Erlaubnis muss separat für jeden künftigen oder zusätzlichen Einsatz angefordert werden.
2. Diese Erlaubnis bezieht sich auf Benutzung und sein Online-elektronisches Äquivalent zu drucken, einschließlich CD-ROM oder DVD.
3. Der folgende Urheberrechtsschutz muss mit dem Material erscheinen: Copyright (2011) [©(2011)] beim American Institute of Physics. Dieser Artikel kann heruntergeladen werden, wenn er für den persönlichen Gebrauch bestimmt ist. Jede andere Verwendung bedarf der vorherigen Zustimmung des Urhebers und des American Institute of Physics.

Zusammen mit der folgenden Meldung:

Der Original-Artikel erschien in Physics Today (2011) 64/1 p. 33 – 38 und kann gefunden werden unter <http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PHTOAD000064000001000033000001&idtype=cvips&gifs=yes&ref=no> bzw. <http://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/PhysTodayRT2011.pdf>.

4. Diese Erlaubnis gilt nicht für Materialien, die aus anderen Quellen stammen als denen des Copyright-Inhabers.
5. Wenn Sie es nicht bereits getan haben, versuchen Sie bitte die Erlaubnis erhalten von mindestens einem der Autoren. Die Adresse des Autors aus dem Artikel gefunden werden.

Die Zustimmung des Autors liegt auch vor (und sein Paper ist auch veröffentlicht unter <http://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/PhysTodayRT2011.pdf>):

Wenn Sie [die Übersetzung] irgendwo veröffentlichen, dann müssen Sie wahrscheinlich die urheberrechtliche Genehmigung von AIP erhalten. Wenn es nur auf einer Website veröffentlicht wird, ist das wahrscheinlich kein Problem.

Die englischen Originaltexte lauten:

The article, “Raymond T. Pierrehumbert, TR.: Infrared radiation and planetary temperature. Physics Today (2011) 64/1 p. 33 – 38“

To be used in the following manner:

Translated into German and posted to <http://www.ing-buero-ebel.de/>.

1. The American Institute of Physics grants you the right to reproduce the material indicated above on a one-time, non-exclusive basis, solely for the purpose described. Permission must be requested separately for any future or additional use.
2. This permission pertains to print use and its online electronic equivalent, including CD-ROM or DVD.
3. The following copyright notice must appear with the material: Copyright (2011) American Institute of Physics. This article may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the author and the American Institute of Physics.

along with the following message:

The following article appeared in (citation of published article) and may be found at (URL/link for published article abstract).

4. This permission does not apply to any materials credited to sources other than the copyright holder.
5. If you have not already done so, please attempt to obtain permission from at least one of the authors. The author’s address can be obtained from the article.

und

If you are publishing it someplace, then you probably need to get copyright permission from AIP. If it’s just posted on a web site, that’s probably no problem.

0 Kopfdaten und Ergänzungen

Infrarot-Strahlung und planetarische Temperatur

Raymond T. [Pierrehumbert, 2011a]

<mailto:rtp1@uchicago.edu>

0.1 Fachartikel

Die Theorie des Infrarot Strahlungstransports, einer der produktivsten physikalischen Theorien des letzten Jahrhunderts, hat unzählige Geheimnisse des Universums einschließlich der planetaren Temperatur und der Verbindung zwischen der globalen Erwärmung und den Treibhausgasen entschleiert.

Raymond T. Pierrehumbert ist der Louis Block Professor in Geophysical Sciences an der University of Chicago.

0.2 Bitte

Der Übersetzer bittet um eine Mitteilung, falls jemand irgendeine Stelle findet, die er als zu frei oder als fehlerhaft übersetzt empfindet <mailto:JEbel@t-online.de>.

0.3 Vereinbarungen

Die Kommentierung der Übersetzung, muß sich von der Übersetzung für den Leser unterscheiden. In diesem Paper wird die Unterscheidung durch Farbgebung gemacht:

schwarz: der übersetzte Text

blau: Kommentierung

0.4 Fehlendes

In dem Paper ist wesentlich unterschieden zwischen Troposphäre (turbulenter Wärmetransport) und Stratosphäre (Strahlungsbilanz), siehe auch Abschnitt 4.1 auf Seite 13. Es findet sich aber kein Hinweis darauf, was die Ursache des Unterschieds ist und wie sich die Grenze bei steigender Treibhausgas-Konzentration verschiebt.

Bei der Strahlungsberechnung in einer zunächst ruhend angenommenen Atmosphäre, entstehen höhenabhängige Temperaturgradienten, deren Wert im unteren Bereich mit der ruhend angenommenen Atmosphäre unvereinbar ist, da bei einer Störung der Luftschichtung diese Störung sich im Laufe der Zeit nicht verringert, sondern verstärkt (Brunt-Väisälä-Frequenz – [Smith, 2001, S. 19]). Mit steigender Treibhausgaskonzentration wird diese Grenze bei geringeren Drücken erreicht.

Bei der Sättigung von Spektrallinien (siehe Abschnitt 5 auf Seite 16) drückt sich Pierrehumbert ungenau aus. Wenn er die Sättigung im Sinne von Ångström so versteht, daß kaum ein Infrarot-Photon, das von der Erdoberfläche emittiert wird, auch das Weltall erreicht, so trifft das für die zentralen Teile der CO₂-Absorptionslinien nicht nur für die Venus-Atmosphäre, sondern auch für die Erd-Atmosphäre zu – allerdings hat die Venus-Atmosphäre keine Wellenlängen-Lücken wie die Erd-Atmosphäre. Allerdings werden die Lücken in der Erd-Atmosphäre schmaler, wenn die Konzentration steigt – wegen der Flügel der CO₂-Absorptionslinien. Aber die Sättigung von Spektrallinien hat noch eine zweite Bedeutung,

die allerdings erst bei so hohen Intensitäten auftritt, wie sie in keiner Naturumgebung auftritt (Schlüsselwort: Lamb-Dip – [Käs, 2009, Punkt 9.1.7]). Außerdem ist bei dieser Sättigung kein LTE mehr vorhanden. Trotzdem argumentieren einige falsch mit diesem Sachverhalt.

Für die Treibhausgase ist der Strahlungsantrieb [IPCC, 2007] eine ungeeignete Größe, da die Strahlung aus der Stratosphäre bei Erhöhung der Treibhausgaskonzentration die Strahlungsintensität nicht zunimmt, sondern abnimmt. Zitat der Definition:

Strahlungsantrieb

Der Strahlungsantrieb ist die Veränderung in der vertikalen Nettoeinstrahlung (Einstrahlung minus Ausstrahlung; ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter: Wm^{-2}) an der Tropopause (Grenze zwischen *Troposphäre* und *Stratosphäre*) aufgrund einer Veränderung eines *äusseren Antriebs des Klimasystems*, wie z. B. eine Veränderung in der Konzentration von *Kohlendioxid* oder der *Sonnenstrahlung*. Der Strahlungsantrieb wird berechnet, indem alle troposphärischen Eigenschaften auf ihren ungestörten Werten konstant gehalten werden und nachdem sich die stratosphärischen Temperaturen, sofern verändert, an das strahlungsdynamische Gleichgewicht angepasst haben. Der Strahlungsantrieb wird als »unverzögert« bezeichnet, wenn keine Veränderung in den stratosphärischen Temperaturen beobachtet wird. Für die Zielsetzung dieses Berichtes wurde der Strahlungsantrieb weiter definiert als die Veränderung im Vergleich zum Jahr 1750 und bezieht sich, sofern nicht anders vermerkt, auf den global und jährlich gemittelten Wert. Der Strahlungsantrieb darf nicht mit dem Wolkenstrahlungsantrieb verwechselt werden, einem ähnlichen Begriff für die Beschreibung des Einflusses der Wolken auf die Einstrahlung an der Aussengrenze der *Atmosphäre*.

Eine solche Definition ist zwar zulässig (eine Definition ist immer zulässig), aber die Auswirkungen haben ggf. wenig mit der Realität zu tun. Der Solar-Strahlungsantrieb (in Wm^{-2}) wirkt hauptsächlich von der Oberfläche her, der Kohlendioxid-Strahlungsantrieb existiert als Wm^{-2} in der Realität überhaupt nicht. Mit der nicht vorhandenen Größe Kohlendioxid-Strahlungsantrieb in Wm^{-2} wird aber so getan, als ob er eine tatsächliche Größe wäre und es werden z. B. Wasserdampffeedbacks bestimmt, obwohl die Wirkung des Wasserdampfes hauptsächlich darin besteht, den Temperaturgradienten in der Troposphäre von der Trockenadiabate auf die Feuchtadiabate zu erniedrigen. Irgendwelche Wasserdampf-feedbacks gehören dazu nicht - können aber definiert werden als nicht reale Größen.

Der Temperaturgradient schafft sich seine eigene Oberflächentemperatur: Entsprechend ihrer Temperatur strahlt jede Atmosphärenschicht nach oben und unten (siehe Abschnitt 2 auf Seite 8). Die Oberflächentemperatur verändert sich solange, bis sich der notwendige Temperaturgradient einstellt. Ist die Oberflächentemperatur noch zu niedrig, ist die Temperaturkurve auch unter dem endgültigen Wert, allerdings liegt dann noch kein Gleichgewicht vor und die Gegenstrahlung (auch aus dem Wasserdampf) ist größer als im Gleichgewicht, so daß die Oberflächentemperatur steigt, bis das Gleichgewicht erreicht ist. Dabei erhöht sich die Energiemenge, die im Kreislauf aufwärts (Aufwärtsstrahlung und Konvektion) und abwärts (Gegenstrahlung) kreist. Bei anfangs zu hoher Oberflächentemperatur ist es umgekehrt.

Da Definition und Realität auseinander klaffen sind die Wasserdampffeedbacks auch nur virtuell und nicht real. Real ist nur der Temperaturgradient in der Troposphäre ab der Grenzschicht (Tropopause).

0.5 Kurzfassung Treibhauseffekt

Wegen der Nichteignung des Strahlungsantriebs als Ausgangspunkt für die Sensitivität der Oberflächentemperatur wird nachfolgend eine Kurzfassung des Treibhauseffekts gegeben:

Die thermodynamischen Parameter ändern sich bei Verdopplung der CO₂-Konzentration praktisch nicht – aber die Strahlungsparameter, deren Auswirkung durch die Strahlungsübertragungsgleichung beschrieben wird. Der wesentliche Parameter in der Strahlungsübertragungsgleichung ist die Absorptionslänge – die sich bezüglich CO₂ bei Verdopplung der Konzentration halbiert. Unter Verwendung dieser zwei Tatsachen ergibt sich das Prinzip des Treibhauseffekts und seine Änderung in 5 Punkten:

1. Die Atmosphäre ist im Wesentlichen zweigeteilt: unten die konvektionsreiche Troposphäre, in der das Wetter ist und wo wir leben und oben die konvektionsarme Stratosphäre, wobei sich die Grenze zwischen beiden Sphären verschieben kann (siehe Abschnitt 4.1 auf Seite 13).
2. Der Temperaturgradient in der Troposphäre ist (fast) konstant – auch wenn sich die Dicke der Troposphäre ändert. Diese Konstanz ist konvektionsbedingt (thermodynamische Parameter) und nahezu adiabatisch (siehe auch Abschnitt 4.1 auf Seite 13).
3. Die fast konstante optische Dicke einer sich ändernden Stratosphäre. Diese Konstanz ist strahlungsbedingt (Strahlungsparameter) und wird beschrieben mit der Skalierung (Maßstabsänderung) der Strahlungstransportgleichung (deren Anwendbarkeit und Gültigkeit auch Kramm, Gerlich und Tschuschner anerkennen) bei Änderung der optischen Dicke infolge von Konzentrationsänderungen der Treibhausgase. Dabei muß nur vorausgesetzt werden, das die Lösungen existieren - ohne das die Lösungen explizit bekannt sein müssen.
4. Wo der Temperaturgradient (z.B. am unteren Rand der Stratosphäre) einen bestimmten Grenzwert überschreitet, kann die Luftschichtung nicht ruhig bleiben und wird instabil = Konvektion = Kennzeichen der Troposphäre [Smith, 2001]. Durch die Skalierung verschiebt sich der Ort dieses Grenzwertes zu niedrigeren Atmosphärendrücken.
5. Im stationären Zustand (d.h. auch wenn Zeit vergeht, ändert sich der mittlere Zustand fast nicht) ist im Mittel die Wärmeabgabe der Erde genau so groß wie die Wärmeabsorption – andernfalls müßten sich die mittleren Temperaturen laufend erheblich ändern. Das aber widerspräche der Stationarität. Das bedeutet eine Zunahme der Oberflächentemperatur (mit erhöhter Strahlung durch das offene atmosphärische Fenster) und Abnahme der Stratosphärentemperatur (mit verringerter Abstrahlung ins All). Durch die langsame Steigerung der Oberflächentemperatur wegen der gebrauchten Wärmespeicherung - insbesondere der Ozeane - ist das ein langsamer Prozess bis zum stationären Zustand.
6. noch nicht enthalten ist die breitenabhängige Tropopausenhöhe [Birner, 2003, S. 11 – 24].

Auf der Basis dieser 5 Punkte kann man eine Grundsensitivität der Oberflächentemperatur gegenüber Änderungen der CO₂-Konzentration berechnen – die bedeutend höher ist als beobachtet. Denn durch die höhere Temperatur kommt z. B. mehr Feuchtigkeit in die Atmosphäre (siehe Seite 18), daraus folgen mehr Wolken und Albedoänderung, die die Grundsensitivität verkleinert.

1 Grundlagen

In einer einzigen Sekunde, absorbiert die Erde 1.22×10^{17} Joule Energie von der Sonne. Gleichmäßig über die Masse des Planeten verteilt, würde die absorbierte Energie die Erdtemperatur in einer Milliarde Jahren auf fast 800 000 K erhöhen, wenn die Erde keine Möglichkeit hätte, sie loszuwerden. Für einen Planeten, der sich im Fast-Vakuum des Weltraums

befindet, ist der einzige Weg, um erhebliche Energie zu verlieren, die Emission von elektromagnetischer Strahlung, vor allem in den Teilbereich des IR-Spektrums mit Wellenlängen von $5\ \mu\text{m}$ bis $50\ \mu\text{m}$ für Planeten mit Temperaturen zwischen etwa 50 K und 1000 K. Für die Zwecke dieses Artikels wird dieser Teilbereich thermisches Infrarot (IR) genannt. Die Schlüsselrolle der Energiebilanz zwischen kurzweiliger solarer Absorption und langweiliger IR-Emission wurde erstmals 1827 von Joseph Fourier erkannt [Pierrehumbert, 2004], [Archer und Raymond T. Pierrehumbert (eds.), 2011], über ein Vierteljahrhundert nachdem William Herschel die IR-Strahlung entdeckt hatte. Fourier erkannte auch, daß die Rate, mit der die elektromagnetischen Strahlung in den Weltraum entweicht, stark durch die dazwischen befindliche Atmosphäre beeinflusst wird. Mit diesen Einsichten, setzte Fourier ein Programm zur Erforschung des planetaren Klimas in Bewegung, das nach mehr als einem Jahrhundert zum Erfolg führte.

Der Strahlungstransport ist die Theorie, mit der das oben genannte präzisiert werden konnte. Es ist eine bemerkenswert produktive Theorie, die auf zwei Jahrhunderten der Arbeit aufbaut, die von vielen führenden Köpfen der Physik geleistet wurde. Abgesehen von ihrer Rolle in der Energiebilanz der Planeten und Sterne, liegt sie allen denjenigen am Herzen, die Formen von Fernerkundung und Astronomie verwenden, um Planeten, Sterne und das Universum als Ganzes zu beobachten. Die Theorie ist mit einer breiten Palette von Geräten verbunden, die Bestandteil des modernen Lebens sind, von Mikrowellenöfen bis zu wärmesuchenden Raketen. Dieser Artikel konzentriert sich auf den thermischen IR Strahlungstransport in Planetenatmosphären und deren Folgen für die planetare Temperatur. Diese Aspekte der Theorie sind von besonderem Interesse, weil sie von zentraler Bedeutung für die Prognose-Berechnungen sind, wie das globale Klima auf Störungen durch anthropogenen Emissionen von Kohlendioxid und anderen klimawirksamen Gasen reagiert.

Eine Atmosphäre ist ein Gemisch aus Gasmaterie und Photonen. Der Strahlungstransport befasst sich mit der Nichtgleichgewichtsthermodynamik des Strahlungsfeldes als Wechselwirkung zwischen Materie und dem Transport von Energie durch den Photonen-Bestandteil der Atmosphäre. [Allerdings ist für den tatsächlichen Treibhauseffekt auch der Transport von Energie durch Konvektion und die Kondensation von Wasserdampf wesentlich.](#) Außer in den dünnen äußeren Bereichen Atmosphären, kann für die Behandlung des Strahlungstransport [die Atmosphäre](#) in der Regel in Päckchen aufgeteilt werden, die groß genug sind, um genügend Moleküle für die Anwendung der Thermodynamik zu enthalten, aber klein genug sind, um als isotherm zu gelten und damit als lokales thermodynamisches Gleichgewicht (LTE) angesehen zu werden.

Das lokale Strahlungsfeld muss nicht im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Materie bei der lokalen Temperatur sein. Dennoch prognostizieren die Gleichungen, daß das Strahlungsfeld für den Grenzfall, in dem es sehr stark mit der Materie wechselwirkt, das thermodynamische Gleichgewicht erreicht. Für solche Schwarzkörperstrahlung, ist die Verteilung des Energieflusses über die Frequenzen durch einen universellen Ausdruck mit der bekannte Planck-Funktion $B(\nu, T)$ gegeben, wobei ν die Frequenz und T die Temperatur ist.

Die Integration der Planck-Funktion über alle Richtungen [in den freien Halbraum oberhalb einer ideal schwarzen Strahlungsfläche](#)¹ und Frequenzen ergibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz für den Fluß F , der von der Oberfläche eines Schwarzkörpers emittiert wird: $F = \sigma T^4$, wobei $\sigma = 2\pi^5 k_B^4 / (15c^2 h^3) \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ist. Hier ist k_B Boltzmann's thermodynamische

¹Die Strahlung von einer ideal schwarzen Fläche ist natürlich isotrop, d.h. die Strahlungsintensität in alle Richtungen des freien Halbraums ist gleich. Das geht sogar noch weiter: Wenn der ideale Schwarzkörper z.B. eine Delle hat, trifft ein Teil der emittierten Strahlung auf eine andere Stelle der schwarzen Oberfläche und wird dort absorbiert. Strahlungsmäßig ist deshalb diese Delle nicht zu bemerken – als strahlende Fläche in die Umgebung wirkt nur die Fläche, die die Delle überspannt, die tatsächliche Oberfläche der Delle ist uninteressant.

sche Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit und h die Plancksche Konstante. Die vierte Potenz des Flussanstiegs mit der Temperatur ist die wichtigste Rückkopplung, die es Planeten oder Sterne ermöglicht, ins Gleichgewicht mit ihrer Energiequelle zu kommen. Da solche Körper nicht wirklich isotherm sind, ergibt sich die Frage, welches T für die Berechnung des entkommenden Flusses in das All zu benutzen ist. Der Strahlungstransport ist das Werkzeug, das die Antwort liefert.

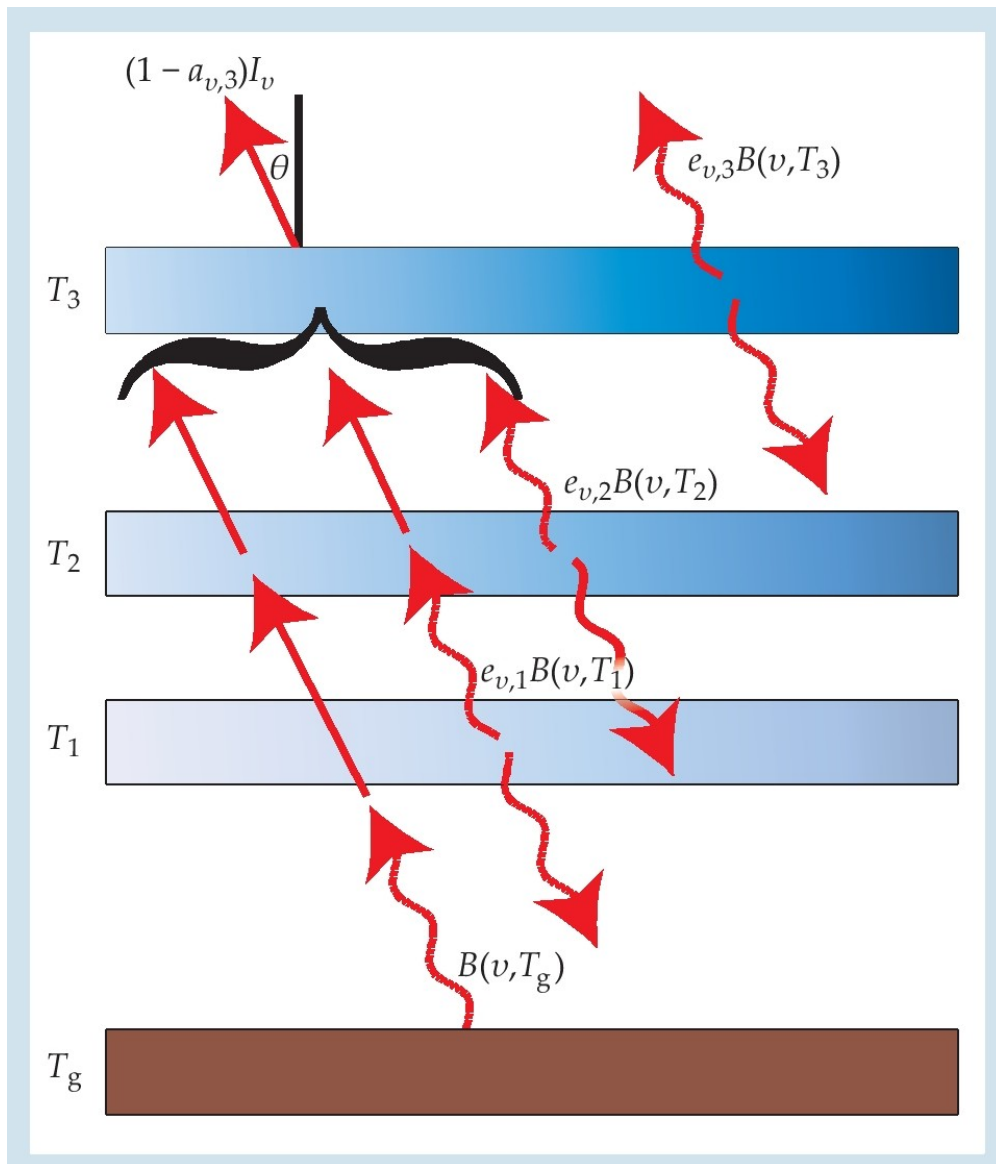
Das Auftreten von h und c in der Stefan-Boltzmann-Konstante bedeutet, dass sich Relativitätstheorie und Quantisierung – die beiden nichtklassischen Aspekte des Universums – in makroskopischen Sachen ebenso grundlegend manifestieren wie die Temperaturen von Planeten und Sternen. Es ist faszinierend zu beachten, dass man ein Universum rechnerisch konstruieren kann, das klassisch im Hinblick auf die Quantisierung ist, aber dennoch nur gut ist im Hinblick auf die Thermodynamik der Strahlung, wenn man auch das Universum in Bezug auf die Relativitätstheorie klassisch macht. Das heißt, σ bleibt fest, wenn wir zwar $h \rightarrow 0$ gehen lassen, aber dann muß auch $c \rightarrow \infty$ gehen mit $h^{-2/3}$. **Das bedeutet, das Produkt $c^2 h^3$ bleibt konstant.**

2 Ein paar Grundlagen

Bei den planetarischen Energiedichten wechselwirken die Photonen untereinander nicht signifikant, ihre Verteilung entsteht nur durch Wechselwirkung mit der Materie. Der Impuls der atmosphärischen Photonen ist zu klein, um irgendeinen wesentlichen Anteil ihrer Energie direkt in translatorische kinetische Energie der Moleküle umzusetzen, die dieses Photon absorbieren (**wegen des sehr großen Massenunterschieds der Stoßpartner beim elastischen Stoß**). Stattdessen geht die Energie in die Änderung der internen Quantenzustände der Moleküle. Ein Photon mit der Frequenz ν hat Energie $h\nu$, so dass mit einem Photon, das absorbiert oder emittiert wird, beim beteiligten Molekül nur ein Übergang zwischen unterschiedlichen Energieniveaus um diesen Betrag stattfindet.

Gekoppelte Schwingungs- und Rotations-Zustände sind die Hauptakteure in der IR-Absorption. Wenn ein IR-Photon durch ein Molekül absorbiert wird, wird das Molekül in einen höheren Energie-Quantenzustand gestoßen. Diese Zustände haben sehr lange Lebensdauern, gekennzeichnet durch die spektroskopisch messbaren Einstein A-Koeffizienten. Zum Beispiel überstreichen die Lebensdauern für die CO₂-Übergänge, die die wichtigsten im thermischen IR sind, einen Bereich von einigen Millisekunden bis zu wenigen Zehntelsekunden. Im Gegensatz dazu ist die typische Zeit zwischen den Kollisionen für, sagen wir, eine Stickstoff-Atmosphäre, dominiert bei einem Druck von 1×10^4 Pa und einer Temperatur von 250 K, deutlich unter 1×10^{-7} s. Daher wird die Energie des Photons fast immer durch Kollisionen in den allgemeine Energie-Pool übergehen und zu einer neuen Maxwell-Boltzmann-Verteilung führen mit einer etwas höheren Temperatur. Das beschreibt, wie die Strahlung Materie erwärmt – so lange wie das LTE gilt. **Analog gilt, daß sich bei der Emission eines Photons eine neue Maxwell-Boltzmann-Verteilung einstellt mit einer etwas niedrigeren Temperatur – siehe nachfolgend.**

Nach dem Prinzip der Gleichverteilung führen anschließend die Molekülzusammenstöße zu einer Gleichgewichtsverteilung der Moleküle in höheren (**analog niederen**) Schwingungs- und Rotations-Zuständen. Viele Moleküle besetzen den höheren Energie-Zustand, so das auch – wenn die Lebensdauer des angeregten Zustandes lang ist – über einer mäßig kleinen Ausdehnung der Zeit eine große Anzahl von Molekülen zerfällt unter Emission von Photonen. Wenn die Strahlung entweicht, ohne absorbiert zu werden, werden die höheren Energiezustände entvölkert und das System ist aus thermodynamischen Gleichgewicht geworfen. Molekulare Kollisionen bevölkern die Zustände wieder und ein neues thermodynamisches Gleichgewicht



Diagr. 1: Modell einer Atmosphäre mit drei isothermen Schichten. In dieser Darstellung bewegt sich elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz ν nach oben. Die Strahlung, die ohne Streuung angenommen wurde, breitet sich unter einem Winkel Θ mit Bezug auf die Vertikale aus und tritt aus Schicht 3 aus – der obersten atmosphärischen Schicht. Der Boden unterhalb der Atmosphäre emittiert als ideal schwarzer Körper, beschrieben mit der Planck-Funktion B . Jede Schicht, mit eigener Temperatur T emittiert mit eigener Emissivität e_ν und absorbiert – entsprechend dem Kirchhoffschen Gesetz – einen Teil $a_\nu = e_\nu$ der einfallenden Strahlung. Die Strahlungsfluss Verteilung, die auf Layer 3 auftrifft, ist I_ν . Sie ist die Summe der thermischen Emission aus dem Boden, aus Layer 1 und aus Layer 2, abgeschwächt durch Absorption in den dazwischenliegenden Schichten 1 und 2. Gewellte Pfeile zeigen die thermische Emission, gerade Pfeile zeigen die durchgelassene Strahlung.

bei einer etwas kühleren Temperatur entsteht. Das beschreibt, wie die thermische Emission von Strahlung Materie kühlt – so lange wie das LTE gilt.

Betrachten wir nun eine Atmosphärensäule in dünnen horizontalen Schichten, wobei für jede Schicht das LTE gilt. Thermisches IR wird nicht signifikant gestreut an atmosphärischen Molekülen oder stark absorbierende Materialien, wie die Wasser- und Eiswolken der Erde. In Abwesenheit von Streuung ist jede Richtung von den anderen abgekoppelt und die Linearität der elektromagnetischen Wechselwirkung bedeutet auch, dass jede Frequenz isoliert betrachtet werden kann. Wenn eine Strahlungsfluss-Verteilung I_ν mit einer bestimmten Ausbreitungsrichtung Θ auf eine Schicht von unten trifft, wird ein Bruchteil a_ν absorbiert, wobei $a_\nu \ll 1$ nach Voraussetzung ist ([dünne Schicht](#)). Die Schicht kann zu dünn sein, um wie ein Schwarzkörper zu emittieren. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit, kann man aber die Emission in Form $e_\nu B(\nu, T)$ schreiben; hier ist $e_\nu \ll 1$ die Emissivität der Schicht (siehe Bild 1 auf der vorherigen Seite). Beide a_ν und e_ν sind proportional zu der Anzahl der Absorber-Emitter-Moleküle in dieser Schicht.

Die wichtigste Beziehung, die dem Strahlungstransport in der LTE Grenze zugrunde liegt, ist das Kirchhoff'sche Gesetz, in dem es heißt $a_\nu = e_\nu$ entsprechend der empirischen Beschreibung Kirchhoff's bahnbrechender Experimente zur Wechselwirkung von Strahlung mit Materie, die direkt zum Konzept der Schwarzkörperstrahlung geführt hat – die Gustav [Kirchhoff, 1860] zuerst als Gesetz empirisch formuliert hat. Es kann als eine Folge des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik durch die Forderung abgeleitet werden, wie es Kirchhoff tat, dass der Strahlungstransport bewirkt, daß sich Materie in einem geschlossenen System hin zu einem isothermen Zustand ausgleicht. Wenn das Kirchhoffsche Gesetz verletzt würde, könnte isolierte isotherme Materie spontan Temperaturinhomogenitäten erzeugen durch Wechselwirkung mit den internen Strahlungsfeld. [Zitat Schack \[1972\], den Gerlich und Tscheuschner gern als Kronzeugen zitieren, ohne ihn verstanden zu haben:](#)

Die Absorption der ein Gas durchsetzenden Wärmestrahlung ist im Beharrungszustand genau gleich der Wärmestrahlung dieses Gases. Denn wenn hierbei Abweichungen beständen, würden sich in einem dies Gas erfüllenden Hohlraum von selbst Temperaturdifferenzen bilden, was nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nicht möglich ist.

Angesichts des Kirchhoffschen Gesetzes, ist die Änderung ΔI_ν der Flussverteilung durch eine Schicht $\Delta I_\nu = e_\nu[-I_\nu + B(\nu, T)]$, wobei vorausgesetzt ist $e_\nu \ll 1$ – [was wegen der dünnen Schicht ebenfalls zutrifft](#). Die Strahlung nimmt zwar exponentiell mit der Rate e_ν ab, aber gleichzeitig wird die Strahlung von einer Quelle $e_\nu B$ ergänzt. Die stabile Gleichgewichtslösung der Iteration der Fluß-Änderung ist $I_\nu = B(\nu, T)$, was bedeutet, dass innerhalb einer genügend großen isothermen Region die Lösung die Planck-Funktion ist, wie bei einem Schwarzkörper. Das Erhalten der Schwarzkörperstrahlung in dieser Grenze ist eine der wichtigsten Auswirkungen des Kirchhoffschen Gesetzes und sie gilt für jede Frequenz.

Im Grenzfall unendlich dünner Schichten, reduziert sich die Iteration auf eine gewöhnliche lineare Differentialgleichung erster Ordnung für I_ν . Oder, wie in Bild 1 auf der vorherigen Seite dargestellt, kann man die Beiträge aus jeder Schicht, in geeigneter Weise durch Absorption in den dazwischenliegenden Schichten gedämpft, summieren. Die resultierende Gleichung des Strahlungstransports ist in die Wissenschaft des 20. Jahrhunderts eingegangen durch die Arbeiten von Karl Schwarzschild (berühmt mit Arbeiten zum schwarzen Loch) und Edward Milne, die an astrophysikalischen Anwendungen interessiert waren. Siméon Poisson veröffentlichte eine fast identische Formulierung der Strahlungsübertragung [Poisson, 1835] im Jahr 1835, aber seine Gleichung wurde für fast 100 Jahre vergessen und nicht angewandt.

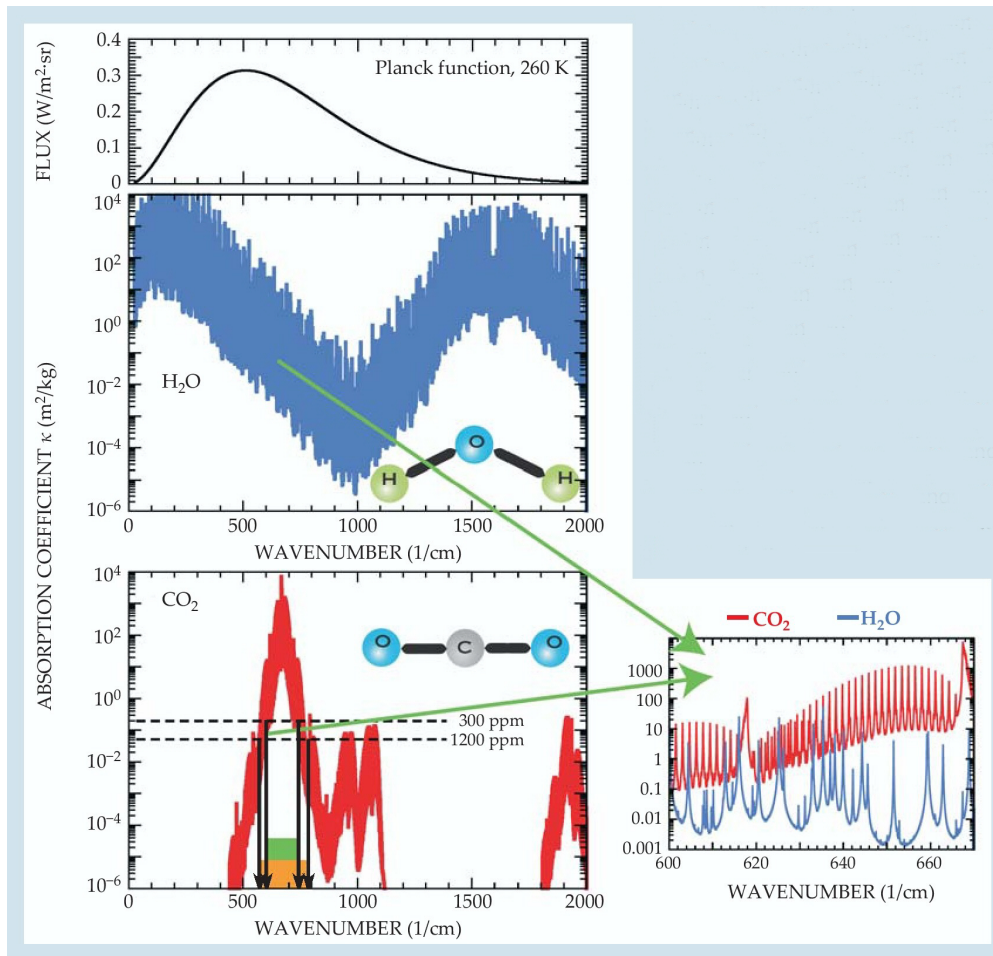
3 Spektroskopie der Treibhausgase

Wegen seiner zahlreichen Einsatzmöglichkeiten in Wissenschaft und Technologie wurde die Spektroskopie der Gase ein hoch entwickeltes Thema. Die Anwendung der Spektroskopie der Gase der atmosphärischen Bestandteile begann mit John Tyndall, der im Jahre 1863 entdeckte, dass die meiste IR-Trübung der Erdatmosphäre von zwei Nebenbestandteilen der Erdatmosphäre, dem CO₂ und dem Wasserdampf, verursacht wird. Alle spektralen Absorptionslinien erwerben eine endliche Breite durch eine Reihe von Prozessen, so dass ein Molekül ein Photon absorbieren kann, selbst wenn dessen Energie leicht vom exakten Übergang abweichend ist. Bei einigermaßen dichten Atmosphären, ist der Wichtigste dieser Prozesse die Stoßverbreiterung, die etwas kinetische Energie aus dem vorliegenden Zusammenstoß nimmt für die Differenz zwischen der absorbierten Photonen-Energie und dem Übergang. **Dazu kommt, daß nach der Quantentheorie sowieso in der kurzen Zeit des Absorptionsvorganges die Frequenz des absorbierten Photons nicht genau bestimmt werden kann.**

Datenbanken der spektralen Linien-Eigenschaften sind die Grundlage aller IR-Strahlungstransport-Berechnungen in Gasen. Die HITRAN Datenbank, [Rothman u. a., 2009] sammelt Tausende sorgfältig kreuzgeprüfte spektroskopische Untersuchungen und bietet die Linien-Eigenschaften für 39 Moleküle, die ausgiebig bei Anwendungen in Technik und atmosphärische Wissenschaften verwendet werden. Die Datenbank ist frei zugänglich bei <http://www.cfa.harvard.edu/hitran>. Die einfache, flexible Umgangssprachen-Schnittstelle zu HITRAN wird durch Online-Software ergänzt, die in [Pierrehumbert, 2010] enthalten ist, abrufbar unter <http://geosci.uchicago.edu/~rtp1/PrinciplesPlanetaryClimate>.

Messungen der Absorptionsquerschnitte erlauben es, aus den Absorptions-Emissions-Eigenschaften einer Schicht der Atmosphäre, ihre Zusammensetzung zu ermitteln. Bild 2 auf der nächsten Seite zeigt zum Beispiel die Absorptions-Querschnitte für CO₂ und Wasserdampf als Funktion der Wellenzahl, die proportional zur Frequenz ist, für den thermischen IR-Bereich von 200 cm⁻¹ bis 2000 cm⁻¹. Die Spektren sind mit der HITRAN Datenbank für Linien berechnet, die durch Kollision in Luft bei einem Druck von 5 × 10⁴ Pa verbreitert sind, dies entspricht etwa der Massenmitte der Erdatmosphäre. **Die Massenmitte ist zugleich die Druckmitte, denn der Druck entsteht durch das Gewicht der Masse darüber.** Das CO₂-Molekül hat vier Hauptgruppen der Absorptionen im thermischen IR, von denen für erdähnliche Bedingungen die Wichtigste mit der Wellenzahl in der Nähe von 667 cm⁻¹ ist. (Die entsprechenden Wellenlänge ist 15 µm.) Diese Absorptionen sind Vibrations-Biegemoden des linearen dreiatomigen Moleküls, die Feinstruktur ergibt sich durch Mischen mit Rotations-Übergängen, die Einlage auf Bild 2 auf der nächsten Seite zeigt die entsprechenden Linien. Wasserdampf ist ein polares Molekül und sein reicher Satz von Schwingungs- und Rotations-Modi erlaubt es, effektiv über ein viel breiteres Spektrum von Frequenzen als CO₂ zu absorbieren.

Gase zeigen auch Kontinuum-Absorption, ebenso wie kondensierten Materie, aus denen Wolken aller Arten bestehen. In einigen Fällen ergeben sich die Kontinua aus der Überlappung benachbarter Linien, aber in anderen Fällen, werden Kontinua sichtbar, wenn keine Linien in der Nähe sind. Grob gesagt, diese Kontinua entstehen wegen der Endlichkeit der Dauer einer Kollision, währenddessen ein Paar kollidierender Moleküle wirkt als wäre es etwas wie ein einziges, komplexes Molekül mit eigenen Übergängen. Äquivalent, resultieren sie aus dem von den überschneidenden Schwänzen von entfernt liegenden kollisionsverbreiterten Linien. Die statistische Mechanik bestimmt die fernen Abschnitte der langen Linien-Schwänze und nicht alles ist dabei gut verstanden [Halevy u. a., 2009], gleichwohl sind die Kontinua sehr gut charakterisiert, zumindest für jene Fälle, die relevant sind für den



Diagr. 2: Die Absorptionskoeffizienten für Wasserdampf und Kohlendioxid sind hier in Abhängigkeit von der Wellenzahl aus Spektrallinien-Daten der Datenbank HIT-RAN synthetisiert. Die obere Schicht gibt die Planck-Funktion $B(\nu, T)$ für eine 260 K Oberfläche, mit dem Spektralbereich, der wichtig ist für die planetare Energiebilanz. Die Wellenzahl, als der Kehrwert der Wellenlänge definiert, ist proportional zur Frequenz. Wenn eine Schicht der Atmosphäre M Kilogramm Absorber für jeden Quadratmeter an der Basis dieser Schicht enthält, dann wird das Licht um den Faktor $\exp(-\kappa M)$ abgeschwächt beim Durchqueren dieser Schicht, wobei κ der Absorptionskoeffizient ist. Die horizontalen gestrichelten Linien auf dem CO₂-Plot geben den Wert des Absorptionskoeffizienten an, oberhalb dessen die Atmosphäre für CO₂-Konzentrationen von 300 ppmV und 1200 ppmV sehr stark absorbierend wird; das grüne Rechteck zeigt den Teil des Spektrums, in dem die Atmosphäre optisch dick ist für die geringere Konzentration und das orangefarbene Rechteck zeigt an, wie sich die optisch dicke Region bei erhöhter Konzentration verbreitert. Der Einschub zeigt die Feinstruktur der Absorption durch die Rotationsniveaus.

Strahlungstransport in der Erdatmosphäre. Für heutige Erde ist das einzige wichtige Kontinuum das Wasserdampf-Kontinuum im Fenster um 1000 cm^{-1} . Kohlendioxid-Kontinua sind unwichtig für Bedingungen, die sich auf der Erde während der letzten mehreren Milliarden Jahren durchgesetzt haben, aber sie sind wichtig für die Lücken in den Linienspektren für die dichten CO_2 -Atmosphären von Venus und frühen Mars. Zweiatomige Molekülen aus gleichen Atomen wie N_2 , sind transparent für IR unter erdähnlichen Bedingungen, haben aber Kollisions-Kontinua, die wichtig werden in kalten, dichten Atmosphären. Zum Beispiel ist das N_2 -Kontinuum eines der wichtigsten Treibhausgase auf dem größten Saturnmond, dem Titan.

Die komplizierten Änderungen der Absorption mit der Frequenz machen es schwierig, die Strahlungstransport-Gleichungen effektiv zu lösen. In Linie für Linie Modellen sind die Gleichungen separat auf einem Raster von Millionen von Frequenzen gelöst und die Ergebnisse werden addiert, um die Netto-Flüsse zu erhalten. Klimamodelle erfordern jedoch größere Recheneffizienz, denn der Frequenz-gemittelte Strahlungsfluss ist bei jedem Modell mit mehreren tausend Iterations-Schritten zu berechnen für jeden von mehreren tausend Gitterboxen für die Atmosphäre eines Planeten. Modellentwickler verwenden verschiedene Näherungen für die aggregierten Effekte der vertretenen Spektrallinien, gemittelt über ca. 50 cm^{-1} breite Bänder. Solche Näherungen für die Linie für Linie Codes, werden wiederum mit Labor- und atmosphärische Beobachtungen validiert. Wenn über ein breites Band gemittelt wird, vermindert sich der Strahlungsfluss mit der durchlaufen Distanz eher algebraisch statt exponentiell, weil sich bei fortschreitender Verringerung des Flusses bei stark absorbierenden Frequenzen sich die Flüsse von Frequenzen, die schwächer absorbiert werden, stärker auswirken [Pierrehumbert, 2010].

4 Bestätigung durch beobachtete Spektren

Die Sonne strahlt etwa wie ein Schwarzkörper mit einer Temperatur von 6000 K, obwohl die Temperatur im Inneren der Sonne viele Millionen Grad ist. Das ist so, weil die sichtbaren Wellenlängen- und IR-Photonen, die in der Sonneneinstrahlung vorherrschen, nur aus den kühleren äußeren Schichten der Sonne entweichen können. Ebenso zeigt die 2.7 K kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung die Temperatur der abstrahlenden Schicht des sehr frühen Universums, die allerdings gegenüber ihrer ursprünglichen, viel höheren Temperatur rotverschoben ist.

Die Abstrahlschicht eines Planeten ist das IR-Äquivalent der Photosphäre der Sonne. Wenn ein Planet von oben betrachtet wird, entsteht die sichtbare Emission bei einer bestimmten Frequenz aus der tiefsten Schicht, die optisch dünn genug ist, damit eine große Zahl von Photonen entkommt. Die effektive Emission-Temperatur für diese Frequenz ist eine entsprechend gewichtete Durchschnitts-Temperatur dieser Schicht. Wenn sich die Atmosphären-Temperatur mit der Höhe ändert, zeigen sich die Änderungen der Absorptionskoeffizienten der atmosphärischen Bestandteile bei den Frequenzen der planetaren Emissionsspektren als Änderungen der Entweichungstemperatur – je transparenter die Atmosphäre **bei bestimmten Frequenzen** ist, desto tiefer kann man sondieren.

4.1 Troposphäre – Stratosphäre

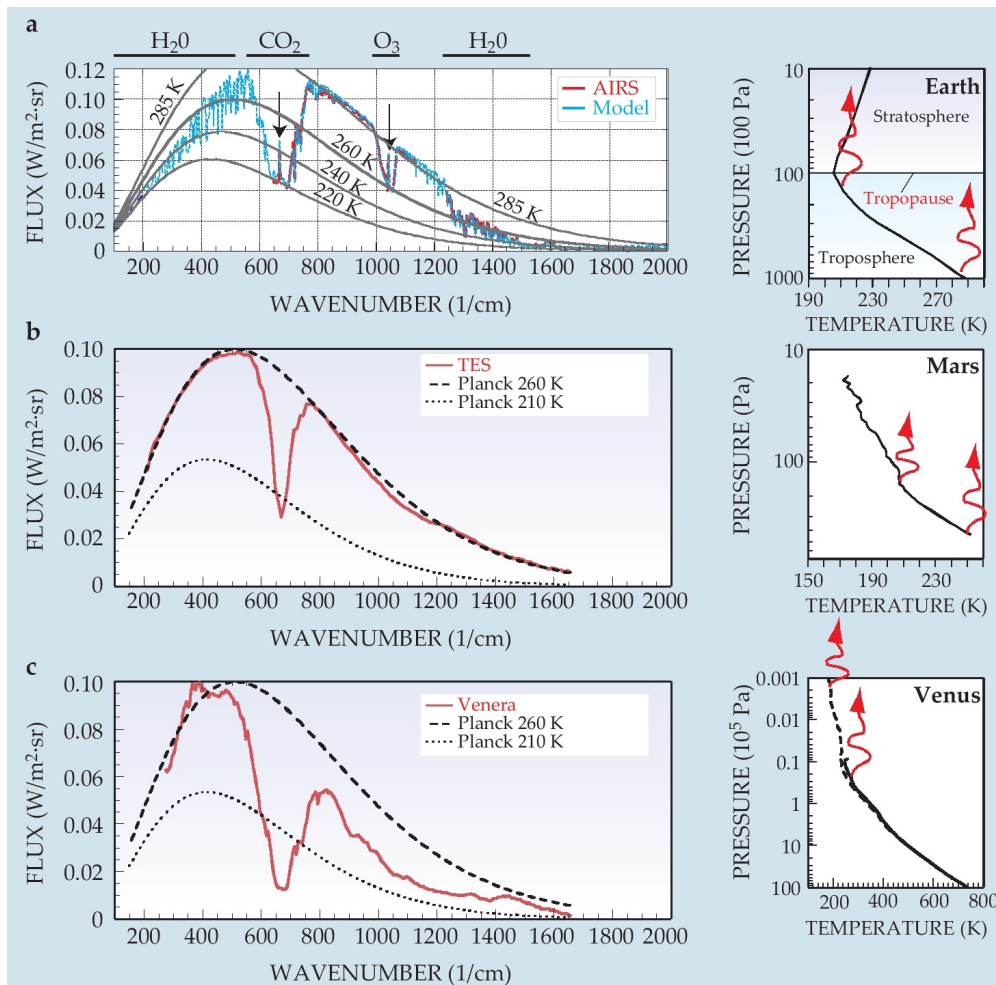
Für Atmosphären die teilweise von unten erwärmt werden, entweder als Folge von solarer Absorption am Boden wie im Falle von Erde, Mars und Venus oder durch innere Absorption und die Flucht innerer Wärme wie bei Jupiter und Saturn - die unteren Schichten der Atmosphäre sind vermischt durch Konvektion und anderen fluide Bewegungen und das

ständige Aufsteigen und [die daraus folgende Druckabnahme mit](#) adiabater Kühlung etablieren einen Bereich, dessen Temperatur mit der Höhe fällt, und sich einer Adiabate nähert. Dieser Bereich ist die Troposphäre. In höheren Lagen wird die Wärmeübertragung durch Strahlungstransport statt durch Fluidbewegungen dominiert, der entsprechende Bereich ist die Stratosphäre. Die stratosphärische Temperatur ist konstant oder sanft abfallend mit der Höhe für ein reines IR-Strahlungsgleichgewicht, aber lokal läßt die Absorption von Sonnenstrahlung die stratosphärische Temperatur mit der Höhe ansteigen. Ozon erleichtert solche Absorption auf der Erde und organischer Dunst hat einen ähnlichen Effekt auf dem Titan. Typische Temperatur-Profile für die Erde, für die Tagzeit Mars und Venus sind in der rechten Spalte von Bild 3 auf der nächsten Seite dargestellt.

Der obere Teil von Bild 3 auf der nächsten Seite vergleicht den globalen Mittelwert der jährlichen Mittel, mit den beobachteten Spektren der Erde bei klarem Himmel durch die Atmosphäre Infrared Sounder (AIRS) Satelliten-Instrumente mit Spektren, die mit den Strahlungstransport Gleichungen berechnet wurden als Ausgabe eines Klimamodells, das angetrieben wurde durch Nutzung der beobachteten Oberflächen-Temperaturen [Huang u. a., 2007]. Die Übereinstimmung zwischen den beiden ist nahezu perfekt, was die Gültigkeit der Strahlungstransport Theorie bestätigt, die in der Spektroskopie verwendet wird, und um sie umzusetzen in die Physik der Klimamodelle. Das AIRS Instrument deckt nur Wellenzahlen oberhalb von 650 cm^{-1} ab, aber die Theorie und die Quellen spektroskopischer Daten für Strahlungstransport werden auch bei niedrigeren Wellenzahlen verwendet und unterscheiden sich nicht in nennenswerter Weise von denen, die in den Wellenzahlbereichen der AIRS-Sondierung verwendet werden. Zahlreiche Beobachtungen - vor allem die nach unten gerichtete Strahlungs-Messungen aus Höhenflugzeugen - bestätigen die Gültigkeit der Strahlungstransport-Modelle auch bei den niedrigen Wellenzahlen des Wasserdampfbereiches - siehe z. B. [Marsden und Valero, 2004].

Im Fensterbereich von etwa 800 cm^{-1} bis 1300 cm^{-1} , ist die Strahlungstemperatur der Erde in den Weltraum sehr nahe an der mittleren Temperatur der Erdoberfläche, außer für einen Dip durch Ozon in der Nähe von 1050 cm^{-1} . Bei höheren Wellenzahlen kann man die Verringerung der Strahlungs-Temperatur durch die Opazität des Wasserdampfes sehen. Die wichtigsten CO_2 -Absorptions-Gruppen führen zu einer ausgeprägten Reduktion der Strahlungstemperatur in einem weiten Bereich um 667 cm^{-1} . Die Emissions-Spitze in der Mitte des Absorptionsbereiches entsteht, weil CO_2 so stark absorbiert, dass die Abstrahlungs-Höhe [in den Weltraum bei dieser Frequenz](#) in der oberen Stratosphäre ist, diese ist deutlich wärmer als die Tropopause ([Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre](#)); der Ozon-Bereich zeigt eine ähnliche Spitze. Das Spektrum zeigt also das Vorhandensein von CO_2 , Wasserdampf, Ozon und anderen Gasen, die hier nicht diskutiert werden. Wir können daraus schließen, dass der Planet eine Stratosphäre hat, bei der die Temperatur mit der Höhe zunimmt, was die Anwesenheit eines Solarabsorbers in der oberen Ebene zeigt. Wir können feststellen, dass sich die Temperaturen der Atmosphäre und der Oberfläche mindestens im Bereich von 220 K bis 285 K bewegen. Jedoch - wenn weitere Informationen fehlen - können wir nicht sagen, dass das obere Ende dieses Temperatur-Bereiches tatsächlich von der Oberfläche stammt.

Klimaforscher erörtern routinemäßig spektrale Folgerungen wie oben, um den Zustand der Erdatmosphäre aus dem Weltraum zu überwachen. Jedes Mal, wenn Sie ein IR-Wetter Satellitenbild sehen, sehen Sie den Strahlungstransport in Aktion. Die Wolken der Erde aus flüssigem oder gefrorenem Wasser wirken im Wesentlichen als Schwarzkörper. Sie emittieren bei der Temperatur der oberen Wolkenfläche, die kalt ist, wenn die Wolken tief sind. Auf einem IR-Satelliten-Bild, erscheinen die Wolken-Regionen als schwache Emission, weil vereinbarungsgemäß IR-Wetter-Satellitenbilder in der Regel mit umgekehrten Graustufen dargestellt werden, da man aus der Alltagserfahrung erwartet, dass Wolken weiß aussehen.



Diagr. 3: Die Satelliten-Messungen der Emissionsspektren sind nicht auf die Erde beschränkt.

(a) Die linke Tafel vergleicht den berechneten globalen Mittelwert des Jahresmittels des Emissionsspektrums der Erde (blau) mit Beobachtungen aus der satellitengestützten AIRS Instrument (rot), beide sind mit eine Reihe von Planck-Verteilungen unterlegt. Zwei Pfeile zeigen auf die Absorption-Spitzen, die im Text diskutiert sind. Das Temperaturprofil rechts, ebenfalls als jährlicher und globaler Durchschnitt beruht auf lokalen Messungen.

(b) Die Tafel auf der linken Seite zeigt ein Sommer-Nachmittags Emissionsspektrum des Mars, beobachtet von dem TES Instrument auf dem Mars Global Surveyor. Sein begleitendes Temperaturprofil wurde aus Radiowellen-Dämpfungs-Messungen entsprechend ähnlichen Bedingungen erhalten.

(c) Die Tafeln zeigen hier eine äquatoriale Venus-Nacht des thermischen Spektrums des Venera 15 Orbiters [Moroz u. a., 1986] zusammen mit einem gemessen typischen Temperatur-Profil für den Planeten. Der obere Teil (gestrichelte Kurve) beruht auf Temperatur-Sondierungen durch Radiowellen-Dämpfungs Beobachtungen aus der Magellan-Mission; der untere Teil (durchgezogene Linie) wurde beim Abstieg einer Pioneer Venus-Sonde beobachtet.

Für alle drei Planeten zeigen Wellenlinien-Pfeile an den Temperaturprofilen den Höhenbereich, aus denen IR in den Weltraum entweicht.

Wettervorhersage-Zentren nutzen weltweit solche Bilder oft jeden Tag, weil sie das Wolkenmuster sogar auf der Nachtseite der Erde zeigen – im Gegensatz zu Bildern im sichtbarem Licht. Die Meteorologen bestimmen sogar mit IR-Bildern die Höhe der Wolkenobergrenzen. Beobachtungen in ausgewählten IR- und Mikrowellen-Bändern werden routinemäßig verwendet, um Temperatur-Profile und Muster der atmosphärischen Bestandteile wie Wasserdampf und CO₂ abzurufen.

Bild 3 auf der vorherigen Seite zeigt auch Emissionsspektren von Mars und Venus. Das Mars-Spektrum wurde an einem Sommernachmittag gewonnen und hat hauptsächlich die Form einer Schwarzkörper-Emission einer 260 K Oberfläche, aber wie beim Spektrum der Erde, hat es einen Bereich bei der wichtigsten CO₂-Absorptionsbande, wo die Strahlungstemperatur im Zentrum viel kälter ist. Soweit ist aus den IR-Spektren zu sagen, daß die Nachtseite der Venus etwa so kalt ist wie die Tagseite des Mars. Doch aus den Mikrowellen Emissionen (für die die Atmosphäre weitgehend transparent ist), dem Venera Lander und dem Pioneer Abstieg, wissen wir jetzt, dass die Venus eine extrem heiße Oberfläche hat, eine fast reine CO₂-Atmosphäre und eine Flächenpressung von fast 100 Erdatmosphären hat. Wegen ihrer dichten Atmosphäre stammt alle IR-Emission der Venus im Wesentlichen aus der oberen Region der Atmosphäre, wo der Druck weniger als 2.5×10^4 Pa ist. Die höchste-Temperatur-strahlende Oberfläche dieser Schicht ist vor allem eine CO₂-Kontinuums-Absorption, die die transparenten Bereiche des – in Bild 2 auf Seite 12 dargestellten – Linienspektrums füllt. Schwefelsäure-Wolken und Spuren von Wasserdampf tragen auch dazu bei, die Lücken zu schließen.

5 Trugschlüsse bezüglich Sättigung

Der Weg zum heutigen Verständnis der Wirkung von Kohlendioxid auf das Klima war nicht ohne Fehlritte. Insbesondere im Jahr 1900 argumentierte Knut Ångström (der Sohn von Anders Ångström, dessen Name eine Einheit der Länge ziert, die weltweit unter Spektroskopikern verwendet wird) im Gegensatz zu seinem Kollegen, dem schwedischen Wissenschaftler Svante Arrhenius, dass eine zunehmende CO₂-Konzentration das Erdklima nicht beeinträchtigen könnte. Ångström behauptete, dass die IR-Absorption von CO₂ in dem Sinne gesättigt wäre, dass bei jenen Wellenlängen, wo CO₂ überhaupt absorbieren könne, das bereits vorhandene CO₂ in der Erdatmosphäre im Wesentlichen alles IR absorbiert **und vergaß, das dort, wo absorbiert wird, auch emittiert wird**. Im Hinblick auf erdähnliche Atmosphären war Ångström doppelt falsch. Erstens zeigt die moderne Spektroskopie, dass CO₂ nirgends nahezu gesättigt ist. Ångströms Labor Experimente waren einfach zu ungenau, um die zusätzlichen Absorption zu zeigen, die in den Flügeln der 667 cm^{-1} -CO₂-Funktion bei steigendem CO₂ erfolgt. Aber selbst wenn CO₂ im Ångström's Sinne gesättigt wäre – wie es im Übrigen auf der Venus ist – würde sein Argument dennoch trügerisch sein. Die Atmosphäre der Venus als Ganzes kann im Hinblick auf IR-Absorption gesättigt sein, aber die Strahlung entweicht nur aus den dünnen oberen Teilen der Atmosphäre, die nicht gesättigt sind. Heiß wie die Venus ist, würde sie noch heißer, wenn man ihrer Atmosphäre CO₂ hinzufügt.

Ein verwandter Sättigungs-Trugschluss, der auch durch Ångström popularisiert wurde, ist, dass das CO₂ keinen Einfluss auf Strahlungsbilanz haben könne, weil Wasserdampf bereits alles IR absorbiert, dass auch CO₂ absorbieren könnte. Die Erde ist sehr feucht, nahe der Oberfläche ist die tropische Atmosphäre in diesem Sinne fast gesättigt, aber der Fehler in Ångström ist das Argument, dass die Strahlung im Bereich des Spektrums des CO₂, die in den Weltraum entweicht, emittiert wird von dem kalten, trockenen oberen Teil der Atmosphäre und nicht aus warmen, feuchten unteren Abschnitten. Auch, wie im Nebenbild

zu Bild 2 auf Seite 12 gezeigt, verschachteln sich zwar die einzelnen Wasserdampf- und CO₂-Spektrallinien, aber sie überlappen nicht völlig ihre Kurven. Diese Struktur begrenzt den Wettbewerb zwischen CO₂ und Wasserdampf.

6 Energiebilanz und Oberflächentemperatur

Die gleichen Überlegungen bei der Interpretation von Spektren bestimmen auch die IR Abkühlgeschwindigkeit eines Planeten und damit seine Oberflächentemperatur. Ein atmosphärisches Treibhausgas ermöglicht es einem Planeten auf einer niedrigeren Temperatur als die der Oberfläche abzustrahlen, wenn kalte Luft aufsteigt². Es verursacht somit eine Oberflächentemperatur, die im Gleichgewicht mit einer bestimmten Menge der absorbierten Sonneneinstrahlung höher ist, als sie für den Fall wäre, wenn die Atmosphäre transparent für IR wäre. Hinzufügen von mehr Treibhausgasen in die Atmosphäre macht höhere, dünnere, vorher transparente Bereiche der Atmosphäre undurchsichtig für IR und erhöht somit die Differenz zwischen der Bodentemperatur und der Strahlungstemperatur. Das Ergebnis ist – nachdem das System ins Gleichgewicht gekommen ist – eine Erwärmung an der Erdoberfläche. Der Effekt ist besonders spektakulär für die Venus, deren Bodentemperatur 730 K beträgt. Wenn der Planet ein Schwarzkörper im Gleichgewicht mit der Sonneneinstrahlung auf den Planeten wäre, wäre die Bodentemperatur nur 231 K.

Der Treibhauseffekt von CO₂ auf der Erde und Mars manifestiert sich visuell als der Graben, bei dem das Planck-Spektrum bei 667 cm⁻¹ einbricht. Der Dip ist Energie, die in den Weltraum entkommen wäre, gäbe es nicht die Deckkraft von CO₂. Auf der Venus, erstreckt sich der CO₂-Treibhauseffekt, wegen der Undurchsichtigkeit des Kontinuums, die mit so viel CO₂ verbunden ist, weit über diesen Graben. Im Spektrum der Erde kann man auch ein breites Gebiet sehen, in dem vom Wasserdampf die Strahlungs-Temperatur auf einen Wert deutlich unterhalb der Oberflächentemperatur reduziert wurde.

Für Erde und Mars entspricht die Breite des Grabens des CO₂ etwa der Breite des Spektralbereich, bei dem die Atmosphäre für IR fast undurchsichtig ist³. Zunehmendes atmosphärische CO₂ erhöht die Breite des Grabens (kaum, weil die Stratosphäre bei einem ähnlichem Partialdruck des CO₂ bleibt, aber wegen abnehmender Stratosphärentemperatur wird der Graben tiefer) und erhöht damit den CO₂ Treibhauseffekt. Aber die Steigerung kommt in den Flügeln der Absorptionskurve eher als in der Mitte (Wenig zutreffend, weil die Stratosphärentemperatur insgesamt sinkt und die Stratosphäre dünner wird) (siehe Bild 2 auf Seite 12). Diese Beschränkung ist der Ursprung der logarithmischen Beziehung zwischen CO₂-Konzentration und die daraus resultierende Störung im Energiehaushalt der Erde⁴. Sie ist ein Merkmal jedes Klimamodells seit Svante Arrhenius im Jahre 1896. Pro Quadratmeter Fläche hat Mars fast 70 mal so viel CO₂ in der Atmosphäre wie die Erde, aber aus dem geringeren Mars-Atmosphärendruck folgen schmalere Spektrallinien (geringere Druckverbreiterung). Das schwächt Absorption so sehr, dass der Mars CO₂-Gaben eine etwas

²Besser: wenn die Oberflächenluft beim Aufsteigen adiabatisch abkühlt.

³Diese Aussage ist fast richtig, aber deutlicher ist ein anderer Zusammenhang. In Abschnitt 4.1 auf Seite 13 erster Absatz ist die fast konstante Temperatur der Stratosphäre erwähnt und der Boden des Grabens folgt fast genau einer Planckkurve – obwohl sich die Absorptionslänge des CO₂ als Funktion der Wellenlänge stark ändert. Damit bildet der Boden des Grabens weitgehend die Stratosphäre ab – siehe auf Seite 14 die Erklärung der CO₂-Absorptionskurve.

⁴Die Abhängigkeit des Treibhauseffekts von der CO₂-Konzentration ist weder eine logarithmische Abhängigkeit noch kommt sie von den Flügeln her. Die näherungsweise logarithmische Abhängigkeit kommt daher, dass die Stratosphäre immer dünner wird, aber nie eine negative Dicke erreichen kann. Solche Funktionen mit beschränkten Endwerten (z. B. auch die Logistik-Funktion [WikiPedia]) haben in bestimmten Bereichen Ähnlichkeit mit der Logarithmusfunktion, die ja bei steigendem Argument langsamer zunimmt als das Argument.

geringere Breite als der der Erde hat.

Der planetarische Erwärmung durch den Treibhauseffekt steht im Einklang mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, weil ein Planet ein nicht geschlossenes System ist. Es tauscht Wärme aus einem Hochtemperatur-Bad durch Absorption von Strahlung aus der Photosphäre von seinem Stern zu einem kalten Bad durch Emission von IR in das Reservoir des Alls, das im Wesentlichen eine Temperatur von nahezu Null hat. Es wird daher ein Gleichgewicht bei einer Temperatur erreicht, die zwischen den beiden Extremen liegt. Die Verschiebungen der Temperatur der Erdoberfläche in Richtung der Temperatur der Photosphäre durch den Treibhauseffekt erfolgt durch eine Verringerung der Geschwindigkeit, mit der der Planet Energie bei einer gegebenen Oberflächentemperatur verliert⁵. Die Art und Weise, wie das funktioniert, ist nicht wirklich anders als die Art und Weise bei dem eine Fiberglas-Isolierung oder ein Low-E-Fenster bei Ihnen zu Hause ihre Raum-Temperatur erhöht, ohne dass mehr Energie aus dem Ofen kommt. Die Temperatur Ihres Hauses ist Vermittler zwischen der Temperatur der Flamme in Ihren Ofen und der Temperatur im Freien, und das Hinzufügen der Isolierung verschiebt die Raumtemperatur in Richtung der ersteren (der Temperatur der Flamme) durch die Reduzierung der Geschwindigkeit, mit der das Haus Energie in die Natur verliert. Bereits Fourier verstand, wie die Temperatur mit den Grundsätzen des Energiegleichgewichtes verbunden ist, deshalb ist es von wenig Bedeutung, wie der Mechanismus des Wärme-Verlustes ist, ob er im Fall eines Planeten eine Mischung von Strahlung und turbulenter Konvektion ist oder auch im Fall eines Hauses oder eines Gewächshaus als reine Strahlung. Kohlendioxid ist eben eine Planeten-Isolierung. Der »einzig« Unterschied zur Hausdämmung ist, daß diese »Dämmung« für die absorbierte Solarstrahlung durchlässig ist (was aber auch für ein Fenster zutrifft). Im Zimmer erwärmt die Strahlung getroffene Flächen, die dann wie eine Ofenoberfläche wirken.

Für die vorliegenden Bedingungen der Erde, entfällt auf CO₂ etwa ein Drittel des klaren Himmel-Treibhauseffekts auf die Tropen und zu einem etwas größeren Teil auf die trockneren, kälteren Extratropen (siehe [Pierrehumbert u. a., 2007, Abbildung 12.1]), der Rest entfällt in erster Linie auf Wasserdampf. Der Beitrag des CO₂ zum Treibhauseffekt untertreibt, obwohl er beträchtlich ist, die zentrale Rolle des Gases als Steuerer des Klimas. Die Atmosphäre wäre, wenn CO₂ aus ihr entfernt würde, kühl genug, dass ein Großteil des Wasserdampfs ausregnen würde. Der Niederschlag wiederum würde zur weiteren Abkühlung führen und letztlich zu einer Spirale führen, die die Erde in den Zustand eines global vereisten Schneeballs bringt [Voigt und Marotzke, 2010]. Es ist nur die Anwesenheit von CO₂, die die Erdatmosphäre warm genug hält, um viel Wasserdampf zu enthalten. Umgekehrt wird bei steigender CO₂-Konzentration die Atmosphäre wärmer und kommt schließlich zu größeren Wasserdampfgehalt - das bekannte Resultat der inzwischen gut verstandenen Situation der Wasserdampfdruckkopplung [Pierrehumbert u. a., 2007], [Dessler und Sherwood, 2009]. Der Wasserdampf ist weitgehend nur in der Troposphäre und dort wird der Temperaturgradient durch die Adiabatik und nicht durch die Strahlung bestimmt. Die Wasserdampfdruckkopplung kann also nicht gut verstanden sein. Allerdings stammt der größte Teil der Gegenstrahlung an der Erdoberfläche vom Wasserdampf – aber der Regelmechanismus ist eben, daß der Fußpunkt für die Adiabate richtig ist.

Obwohl die erste Berechnung der Erwärmung der Erde durch einen CO₂-Anstieg von Arrhenius im Jahr 1896 durchgeführt wurde und es genaue CO₂- und Wasserdampf-

⁵Eine etwas ungeschickte Formulierung: Zwar verringert sich tatsächlich die Geschwindigkeit der Abkühlung bei ausfallender Heizquelle – aber besser wäre: der kühlende Wärmestrom wird durch Dämmung bei einer gegebenen Oberflächentemperatur geringer. Wenn der heizende Wärmestrom auf dem alten Wert bleibt, entsteht ein Wärmeüberschuß, der beim Körper die Oberflächentemperatur erhöht – und zwar so lange, bis der durch die höhere Oberflächentemperatur gestiegene kühlende Wärmestrom genau so hoch ist, wie die gleich geliebene Wärmezuführung.

Spektroskopie gab, kam es nicht zu einer voll korrekten Formulierung der planetaren Energiebilanz, bis zur Arbeit von Syukuro Manabe und Richard Wetherald im Jahre 1967 [Archer und Raymond T. Pierrehumbert (eds.), 2011], [Weart, 2008]. Mit dieser Entwicklung wurde das Theorie Verständnis auf den modernen Stand gebracht. Es hat allen nachfolgenden Herausforderungen standgehalten und ist ohne Frage einer der großen Triumphe der Physik des 20. Jahrhunderts.

7 Planeten nah und fern

Die Grundlagen des Strahlungstransports wurden von einigen der größten Physiker den 19. und 20. Jahrhundert geschaffen: Fourier, Tyndall, Arrhenius, Kirchhoff, Ludwig Boltzmann, Max Planck, Albert Einstein, Karl Schwarzschild, Arthur Eddington, Edward Milne und Subrahmanyan Chandrasekhar und vielen mehr, deren Namen nicht bekannt wurden, darunter auch von Physikern, die es aber wahrscheinlich verdient hätten. Das Thema war ein Jahrhundert des Triumphes (und, wie es Abschnitt 5 auf Seite 16 beschreibt, mancher Irrwege) [Pierrehumbert, 2011b] und ist etwas auf Hochtouren, denn es geht in das anbrechende Zeitalter der Entdeckung extrasolarer Planeten. Welche Art von Atmosphäre würde einen Planet in der potenziell bewohnbaren Zone seines Sterns tatsächlich bewohnbar machen [Pierrehumbert, 2011b] und wie würden es Astronomen entdecken? Wenn sie ein Objekt mit hohem Albedo sehen mit CO_2 in die Atmosphäre, wie werden sie feststellen, ob es ein Schneeball oder eine großer Venus-artiger felsiger Planet ist?

Was auch immer die Zukunft für kürzlich entdeckte Planeten bereit hält, es bleibt das intensive Interesse für die Erhaltung der Bewohnbarkeit des Planeten, der wahrscheinlich unser einziges Haus für einige Zeit zu sein hat. Die Beiträge der fundamentalen Physik zu Erreichung dieses Ziels sind klar. Der CO_2 -Treibhauseffekt ist direkt sichtbar bei Satellitenbeobachtungen mit dem herausgenommenen Graben im IR-Spektrum in der Nähe von 667 cm^{-1} , ein Merkmal, dessen Details genau mit den Ergebnissen der Berechnungen auf dem Grundprinzip der Strahlungstransport Berechnungen übereinstimmen. Die Labor-Spektroskopie zeigt, dass die Breite des Grabens mit dem CO_2 -Anstieg ansteigt und Erwärmung unweigerlich aus den etablierten Energie-Balance-Prinzipien folgt. Die genaue Größe der resultierenden Erwärmung hängt von der ganz gut bekannten Größe an Verstärkung durch Wasserdampf-Feedbacks und auf der Größe des weniger gut bekannten Wolke-Feedbacks ab. Tatsächlich gibt es Unsicherheiten in der Größenordnung und den Auswirkungen der anthropogenen globalen Erwärmung, aber die grundlegende Physik des Strahlungsantrieb des anthropogenen Treibhauseffekts ist unangreifbar.

8 Danksagung

Ich danke Yi Huang für die Bereitstellung von AIRS Spektren für mich, David Crisp für die Bereitstellung von digitalen Venera Daten und vielen erleuchtenden Diskussionen zum Thema Strahlungstransport im Laufe der Jahre und mit Joachim Pelkowski für den Hinweis auf Poissons Arbeiten des Strahlungstransports.

9 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

- 1 Modell einer Atmosphäre mit drei isothermen Schichten. In dieser Darstellung bewegt sich elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz ν nach oben. Die Strahlung, die ohne Streuung angenommen wurde, breitet sich unter einem Winkel Θ mit Bezug auf die Vertikale aus und tritt aus Schicht 3 aus – der obersten atmosphärischen Schicht. Der Boden unterhalb der Atmosphäre emittiert als ideal schwarzer Körper, beschrieben mit der Planck-Funktion B . Jede Schicht, mit eigener Temperatur T emittiert mit eigener Emissivität e_ν und absorbiert – entsprechend dem Kirchhoffschen Gesetz – einen Teil $a_\nu = e_\nu$ der einfallenden Strahlung. Die Strahlungsfluss Verteilung, die auf Layer 3 auftrifft, ist I_ν . Sie ist die Summe der thermischen Emission aus dem Boden, aus Layer 1 und aus Layer 2, abgeschwächt durch Absorption in den dazwischenliegenden Schichten 1 und 2. Gewellte Pfeile zeigen die thermische Emission, gerade Pfeile zeigen die durchgelassene Strahlung. 9
- 2 Die Absorptionskoeffizienten für Wasserdampf und Kohlendioxid sind hier in Abhängigkeit von der Wellenzahl aus Spektrallinien-Daten der Datenbank HITRAN synthetisiert. Die obere Schicht gibt die Planck-Funktion $B(\nu, T)$ für eine 260 K Oberfläche, mit dem Spektralbereich, der wichtig ist für die planetare Energiebilanz. Die Wellenzahl, als der Kehrwert der Wellenlänge definiert, ist proportional zur Frequenz. Wenn eine Schicht der Atmosphäre M Kilogramm Absorber für jeden Quadratmeter an der Basis dieser Schicht enthält, dann wird das Licht um den Faktor $\exp(-\kappa M)$ abgeschwächt beim Durchqueren dieser Schicht, wobei κ der Absorptionskoeffizient ist. Die horizontalen gestrichelten Linien auf dem CO_2 -Plot geben den Wert des Absorptionskoeffizienten an, oberhalb dessen die Atmosphäre für CO_2 -Konzentrationen von 300 ppmV und 1200 ppmV sehr stark absorbierend wird; das grüne Rechteck zeigt den Teil des Spektrums, in dem die Atmosphäre optisch dick ist für die geringere Konzentration und das orangefarbene Rechteck zeigt an, wie sich die optisch dicke Region bei erhöhter Konzentration verbreitert. Der Einschub zeigt die Feinstruktur der Absorption durch die Rotationsniveaus. 12

- 3 Die Satelliten-Messungen der Emissionsspektren sind nicht auf die Erde beschränkt.
- (a) Die linke Tafel vergleicht den berechneten globalen Mittelwert des Jahres-Mittels des Emissionsspektrums der Erde (blau) mit Beobachtungen aus der satellitengestützten AIRS Instrument (rot), beide sind mit eine Reihe von Planck-Verteilungen unterlegt. Zwei Pfeile zeigen auf die Absorption-Spitzen, die im Text diskutiert sind. Das Temperaturprofil rechts, ebenfalls als jährlicher und globaler Durchschnitt beruht auf lokalen Messungen.
- (b) Die Tafel auf der linken Seite zeigt ein Sommer-Nachmittags Emissionsspektrum des Mars, beobachtet von dem TES Instrument auf dem Mars Global Surveyor. Sein begleitendes Temperaturprofil wurde aus Radiowellen-Dämpfungs-Messungen entsprechend ähnlichen Bedingungen erhalten.
- (c) Die Tafeln zeigen hier eine äquatoriale Venus-Nacht des thermischen Spektrums des Venera 15 Orbiters [Moroz u. a., 1986] zusammen mit einem gemessenen typischen Temperatur-Profil für den Planeten. Der obere Teil (gestrichelte Kurve) beruht auf Temperatur-Sondierungen durch Radiowellen-Dämpfungs Beobachtungen aus der Magellan-Mission; der untere Teil (durchgezogene Linie) wurde beim Abstieg einer Pioneer Venus-Sonde beobachtet.
- Für alle drei Planeten zeigen Wellenlinien-Pfeile an den Temperaturprofilen den Höhenbereich, aus denen IR in den Weltraum entweicht. 15

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [Archer und Raymond T. Pierrehumbert (eds.) 2011] ARCHER, D. A. ; RAYMOND T. PIERREHUMBERT (EDS.): *The Warming Papers: The Scientific Foundation for the Climate Change Forecast [Die Erwärmungs-Paper: Die Wissenschaftliche Begründung für die Prognose der Klimaänderungen]*. Hoboken, NJ : Wiley- Blackwell, 2011. – ISBN 978-1-4051-9617-8 7, 19
- [Birner 2003] BIRNER, Thomas: *Die extratropische Tropopausenregion*. 2003. – URL http://edoc.ub.uni-muenchen.de/1720/1/Birner_Thomas.pdf 6
- [Dessler 2010] DESSLER, Andrew E.: A Determination of the Cloud Feedback from Climate Variations over the Past Decade [Eine Bestimmung der Wolken Rückkopplungen von Klimaschwankungen im letzten Jahrzehnt]. In: *Science* 330 (2010), Dez, Nr. 6010, S. 1523 – 1523. – URL <http://www.sciencemag.org/content/330/6010/1523.abstract>
- [Dessler und Sherwood 2009] DESSLER, Andrew E. ; SHERWOOD, Steven C.: A Matter of Humidity – How strong a part does water vapor play in global warming? [Eine Wirkung der Luftfeuchtigkeit - Wie stark ist die Rolle, die der Wasserdampf in der globalen Erwärmung spielt?]. In: *Science* 323 (2009), Feb, Nr. 5917, S. 1020 – 1021. – URL <http://www.sciencemag.org/content/323/5917/1020.summary> 18
- [Halevy u. a. 2009] HALEVY, I. ; PIERREHUMBERT, Raymond T. ; SCHRAG, D. P.: Radiative transfer in CO₂-rich paleoatmospheres [Strahlungstransport in CO₂-reichen Paleo-Atmosphären]. In: *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 114, D18112 (2009). – URL <http://europa.agu.org/?view=>

article&uri=/journals/jd/jd0918/2009JD011915/2009JD011915.xml&t=Halevy,
RadiativetransferinCO2-richpaleoatmospheres 11

- [Huang u. a. 2007] HUANG, Yi ; RAMASWAMY, V. ; HUANG, X. ; FU, Q. ; BARDEEN, C.: A strict test in climate modeling with spectrally resolved radiances: GCM simulation versus AIRS observations [Ein strenge Prüfung der Klimamodellierung mit spektral aufgelösten Strahldichten: GCM-Simulation ./ AIRS Beobachtungen]. In: *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 34, L24707 (2007) 14
- [IPCC 2007] IPCC: *Autoren und Experten-Gutachter, Glossar, Abkürzungen, Akronyme, Einheiten*. 2007. – URL <http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutsch/IPCC2007-Annex.pdf> 5
- [Kirchhoff 1860] KIRCHHOFF, G.: Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. In: *Annalen der Physik* 185 (1860), Nr. 2, S. 275–301. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18601850205>. – ISSN 1521-3889 10
- [Käs 2009] KÄS, Josef A.: *Experimentalphysik*. 2009. – URL http://www.uni-leipzig.de/~pwm/teaching/ExPhys4_SS09/script/EP4_juni22_09.pdf 5
- [Marsden und Valero 2004] MARSDEN, D. ; VALERO, F. P. J.: Observation of Water Vapor Greenhouse Absorption over the Gulf of Mexico Using Aircraft and Satellite Data [Die Beobachtung von Wasserdampf Treibhausgas Absorption über den Golf von Mexiko mit Flugzeugen und Satelliten-Daten]. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 61 (2004), March, S. 745. – URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%282004%29061%3C0745%3A00WVGA%3E2.0.CO%3B2> 14
- [Moroz u. a. 1986] MOROZ, V. I. ; SPÄNKUCH, D. ; LINKIN, V. M. ; DÖHLER, W. ; MATSYGORIN, I.A ; SCHÄFER, K. ; ZASOVA, L.V. ; OERTEL, D. ; DYACHKOV, A. V. ; SCHUSTER, R. ; KERNHANOVICH, V. V. ; BECKER-ROSE, H. ; USTINOV, E. A. ; STADTHAUS, W.: Venus spacecraft infrared radiance spectra and some aspects of their interpretation [Venus Raumschiff Infrarot Strahlungs-Spektren und einige Aspekte ihrer Interpretation]. In: *Applied Optics* 25 (1986), Nr. 10, S. 1710 – 1719. – URL <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ao-25-10-1710> 15, 21
- [Pierrehumbert 2004] PIERREHUMBERT, Raymond T.: Warming the world – Greenhouse effect: Fourier’s concept of planetary energy balance is still relevant today [Erwärmung der Welt - der Treibhauseffekt: Fouriers Konzept der planetaren Energiebilanz ist auch heute noch aktuell]. In: *Nature* 432 (2004), Dez., S. 677 – 679. – URL <http://www.nature.com/nature/journal/v432/n7018/full/432677a.html> 7
- [Pierrehumbert 2010] PIERREHUMBERT, Raymond T.: *Principles of Planetary Climate [Prinzipien des planetaren Klimas]*. Cambridge U. Press, 2010. – 640 S. – URL http://assets.cambridge.org/97805218/65562/copyright/9780521865562_copyright_info.pdf. – ISBN 978-0-521-86556-2 11, 13
- [Pierrehumbert 2011a] PIERREHUMBERT, Raymond T.: Infrared radiation and planetary temperature [Infrarot-Strahlung und planetarische Temperatur]. In: *Physics Today* 64 (2011), Januar, S. 33 – 38. – URL <http://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/PhysTodayRT2011.pdf> 4

- [Pierrehumbert 2011b] PIERREHUMBERT, Raymond T.: A PALETTE OF CLIMATES FOR GLIESE 581g [Eine Palette von Klimazonen Gliese 581g]. In: *The Astrophysical Journal Letters* 726 (2011), apr., Nr. 1, S. L8+ 19
- [Pierrehumbert u. a. 2007] PIERREHUMBERT, Raymond T. ; BROGNIEZ, H. ; ROCA, R.: Chapter 6: On the relative Humidity of the Atmosphere. In: *The Global Circulation of the Atmosphere [Die globale Zirkulation der Atmosphäre]*, Tapio Schneider, Adam H. Sobel (eds). Princeton, NJ : Princeton U. Press., 2007, S. 143 – 186. – ISBN 978-0-691-12181-9 18
- [Poisson 1835] POISSON, Siméon D.: *Théorie mathématique de la chaleur [Die mathematische Theorie der Wärme]*. Bachelier, 1835. – 532 S. – URL <http://www.archive.org/details/thoriemathma00pois> 10
- [Rothman u. a. 2009] ROTHMAN, L.S. ; I.E.GORDON ; BARBE, A. ; BENNER, D. C. ; BERNATH, P.F. ; BIRK, M. ; BOUDON, V. ; BROWN, L.R. ; CAMPARGUE, A. ; CHAMPION, J.-P. ; CHANCE, K. ; COUDERT, L.H. ; DANA, V. ; DEVI, V.M. ; FALLY, S. ; FLAUD, J.-M. ; GAMACHE, R.R. ; GOLDMAN, A. ; JACQUEMART, D. ; KLEINER, I. ; LACOME, N. ; LAFFERTY, W.J. ; MANDIN, J.-Y. ; MASSIE, S.T. ; MIKHAILENKO, S.N. ; MILLER, C.E. ; MOAZZEN-AHMADI, N. ; NAUMENKO, O.V. ; NIKITIN, A.V. ; ORPHAL, J. ; PEREVALOV, V.I. ; PERRIN, A. ; PREDOI-CROSS, A. ; RINSLAND, C.P. ; ROTGER, M. ; SIMECKOVA, M. ; SMITH, M.A.H. ; SUNG, K. ; TASHKUN, S.A. ; TENNYSON, J. ; TOTH, R.A. ; VANDAELE, A.C. ; ; AUWERA, J. V.: The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [Die HITRAN 2008 molekulare spektroskopische Datenbank]. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 110 (2009), S. 533 – 572. – URL <http://www.cfa.harvard.edu/atmosphere/publications/HITRAN2008.pdf> 11
- [Schack 1972] SCHACK, Alfred: Der Einfluß des Kohlendioxid-Gehaltes der Luft auf das Klima der Welt. In: *Physikalische Blätter* 28 (1972), Nr. 1, S. 26 – 28 10
- [Smith 2001] SMITH, Roger K.: *Thermodynamik der Atmosphäre III.* 2001. – URL http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~roger/Einfuehrung_Teil_I/Teil_I_WS2001-07.pdf 4, 6
- [Voigt und Marotzke 2010] VOIGT, Aiko ; MAROTZKE, Jochem: The transition from the present-day climate to a modern Snowball Earth [Der Übergang vom heutigen Klima zu einer modernen Schneeball-Erde]. In: *Climate Dynamics* 35 (2010), Nr. 5, S. 887 – 905. – URL <http://www.springerlink.com/content/7885353268284k01/> 18
- [Weart 2008] WEART, Spencer R.: *The Discovery of Global Warming [Die Erforschung der globalen Erwärmung]*. Harvard U. Press, 2008. – 228 S. – und online Material [urlhttp://www.aip.org/history/climate/index.htm](http://www.aip.org/history/climate/index.htm). – ISBN 0-674-01637-8 19
- [WikiPedia] WIKIPEDIA: *Graf der logistischen Funktion.* – URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Logistisch.svg> 17