



Sachstand

Kohlendioxid Sättigung des Absorptionsbands

Kohlendioxid

Sättigung des Absorptionsbands

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 014/20
Abschluss der Arbeit: 3. April 2020
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Anteil des Kohlendioxids in der Erdatmosphäre	5
3.	Infrarotspektren des Kohlendioxids	7
4.	Sättigung der Absorptionsbanden	13
4.1.	Sättigung	14
4.2.	Abhängigkeit der Wärmestrahlung von Temperatur und Höhe	15
5.	Quellenverzeichnis	17

1. Einleitung

Kohlendioxid (CO₂) und andere Spurengase bilden in der Atmosphäre ein komplexes System, das den Wärmehaushalt der Erde reguliert. Der Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre schwankt in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit und der geographischen Lage. Die Veränderung des CO₂-Gehalts kann innerhalb eines Jahres in Bodennähe ± 10 ppm betragen. Trotz der Schwankungen hat sich der mittlere CO₂-Gehalt in den letzten Jahren erhöht. Der Gehalt stieg vom Jahr 1750 von unter 280 ppm (Volumenanteile) über das Jahr 1972 bis in die 90er Jahre von unter 330 ppm über 355 ppm und auf etwa 400 ppm in der heutigen Zeit. Die zeitlich schnelle Änderungsrate der globalen Temperatur ist soweit bekannt einzigartig in der bisherigen Erdgeschichte.¹

Erste wissenschaftliche Arbeiten zum Verständnis der Wechselwirkungen von Wärmestrahlung und Sonne von Joseph Fourier reichen in das Jahr 1820 zurück. Svante Arrhenius hat im Jahr 1896 den Zusammenhang zwischen CO₂-Gehalt und der Erhöhung der globalen Temperatur hergestellt. Arrhenius leitete ab, dass bei Verdopplung des Gehalts des atmosphärischen CO₂ der Temperaturanstieg etwa 5 Grad betragen würde.²

Um die Theorie von Arrhenius zu überprüfen, ließ Knut Ångström Experimente im Labor durchführen. Ein Aspekt dabei ist die Sättigung des infrarotaktiven³ Spurengases Kohlendioxid. Ångström ging fälschlicherweise davon aus, dass sich die Absorptionsspektren von Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid überdecken und die Absorptionswirkung des Kohlendioxids deshalb vernachlässigbar sei. Ångström deutete seine Ergebnisse basierend auf einem Laborversuch mit Hilfe einer Röhre mit diskreten Gasschichten, die in vertikaler Teilung die Gase in entsprechenden Anteilen, wie sie in der Atmosphäre vorkommen, enthalten. Die Forscher bestrahlten die Röhre mit Wärme und fanden keine durchgehende Wärmestrahlung. Ångström schlussfolgerte, dass drei Meter CO₂ schon sättigen und zusätzliches CO₂ keinen Effekt haben könnte. Im Fall der Laborröhre ist der Begriff der Sättigung richtig, aber nicht für die Erdatmosphäre, die nicht wie eine Laborröhre aufgebaut ist. Die Atmosphäre lässt sich nicht in diskrete Schichten zerlegen. Auch

1 Bliefert, K. (1994). „Umweltchemie“, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1994

Spiegel online (2019). „CO₂-Gehalt der Atmosphäre erreicht neuen Höchststand“, vom 14.5.2019, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/co2-gehalt-der-atmosphaere-erreicht-historischen-hoechststand-a-1267384.html>

2 Arrhenius, S. (1896). "On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground." Philosophical Magazine 41: 237-76, https://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf

3 Spektrum der Wissenschaft (1998). „Lexikon der Physik - infrarot aktiv“, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/infrarot-aktiv/7244>:

„Bezeichnung für Molekülschwingungen, die im Infrarotspektrum zu sehen sind, d.h. bei denen eine IR-Absorption auftritt. Moleküle sind dann infrarot aktiv, wenn während der Schwingung eine periodische Änderung des Dipolmomentes auftritt, wobei das Dipolmoment des Moleküls im einen Extremum der Schwingung verschieden sein muss von dem im anderen. Bei Schwingungen, die nicht symmetrisch zum Symmetriezentrum erfolgen, tritt eine solche Änderung des Dipolmomentes auf. Daraus folgt, dass symmetrische Moleküle wie H₂, N₂, oder O₂ infrarot inaktiv sind und bei ihnen keine IR-Spektren zu beobachten sind.“

sind Bedingungen auf Höhe des Meeresspiegels nicht mit den atmosphärischen Höhen vergleichbar. In den höheren Schichten nehmen Temperatur und Druck ab. Diese Schichten enthalten weniger CO₂ und die Absorptionsbanden dieser in den Weltraum abstrahlenden Schichten sind nicht gesättigt.⁴

Durch die falsche Schlussfolgerung von Ångström kam die wissenschaftliche Betrachtung dieser Thematik zunächst zum Erliegen. Erst etwa 40 Jahre später, im Jahr 1931, hat Eward Olsen Hulbert wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt und gezeigt, dass die Verdopplung bzw. Verdreifachung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre auf eine Temperaturerhöhung auf Meereshöhe von 4 bis 7 Grad [Kelvin] führt. Weitere Jahrzehnte mit intensiver weltweiter Forschung zum Verständnis der Wetter- und Klimaphänomene, wie beispielsweise Isotopenmessungen des CO₂ und satellitengestützte Messungen des CO₂-Gehalts, folgten.⁵ Seitdem gilt die Sättigungsthese als widerlegt.

Die vorliegende Arbeit behandelt Einzelfragen zur Thematik der Sättigung der Absorptionsbanden des Kohlendioxids in der Erdatmosphäre.

2. Anteil des Kohlendioxids in der Erdatmosphäre

Die Erdatmosphäre hat eine Schlüsselrolle in der Energiebilanz zwischen der kurzwelligen solaren Absorption und den langwelligen Infrarot-(IR)-Emissionen. Die Atmosphäre absorbiert nicht nur die IR-Strahlung (Wärme) von der Erdoberfläche. Sie strahlt auch IR-Strahlung (Wärme) in den Weltraum ab. Wenn diese Wärmeströme im Gleichgewicht sind, verändert sich die Temperatur der Atmosphäre nicht - sie bleibt in der Balance. Die folgende Grafik zeigt schematisch das Gleichgewicht des Strahlungshaushalts der Erdatmosphäre. Die einfallende Strahlung der Sonne wird zum Teil reflektiert, absorbiert, emittiert und in den Weltraum abgestrahlt.⁶

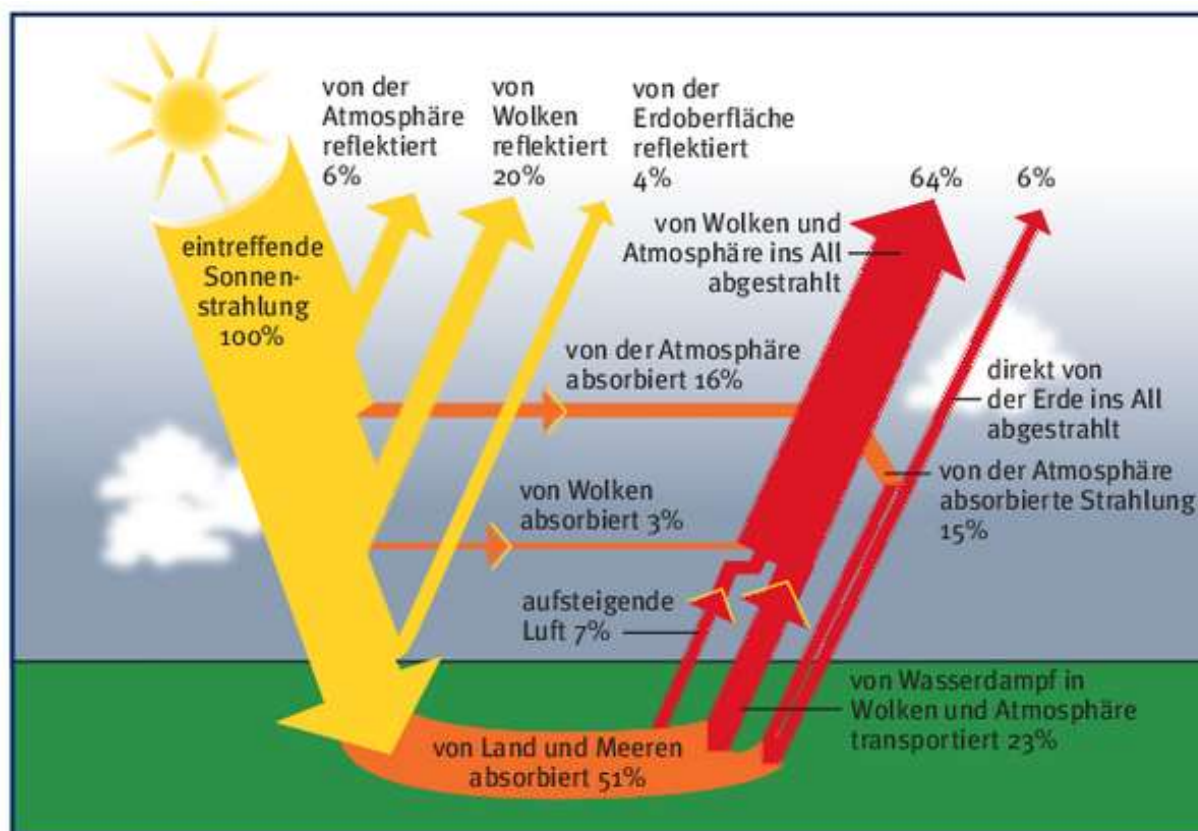
4 Weart, S. (2017). „A Hyperlinked History of Climate Change Science“, <https://history.aip.org/climate/summary.htm>

Ångström, K. (1900). "Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre." *Annalen der Physik* 4(3): 720-32. doi:10.1002/andp.19003081208, <https://online-library.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19003081208>

5 Weart, S. (2017). „A Hyperlinked History of Climate Change Science“, <https://history.aip.org/climate/summary.htm>

Weart, S. (2020). „The Discovery of Global Warming“, <https://history.aip.org/history/climate/co2.htm>

6 Raschke, E., *Welt der Physik* (2008). „Der Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/atmosphaere/klimaforschung/treibhauseffekt/>



Etwa 0,1 % der Gase in der Erdatmosphäre sind infrarotaktiv. Diese Spurengase können infrarotes Licht, also Wärme, absorbieren. Kohlendioxid gehört dazu. Der Volumenanteil des Kohlendioxids in der Atmosphäre beträgt mittlerweile über 400 ppm. Das sind etwa 0,04 %. Zum natürlichen Treibhauseffekt trägt CO_2 mit einem Anteil von bis zu 26 % bei.⁷ **Der Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt liegt für 300 ppm CO_2 bei 50 % und für 600 ppm bei 54 % der Spurengase.**⁸ Die Steigerung auf 300 ppm im Jahr 1990 trägt umgerechnet 0,83 Grad [Kelvin] zur Erderwärmung bei. Eine weitere Steigerung auf 660 ppm entspricht nach Berechnungen einer Erwärmung um 5,6 Grad [Kelvin].⁹

Eine Verdoppelung des CO_2 -Anteils bringt nur 4% mehr Treibhauseffekt. Wenn also 300 ppm 0,83 Grad bringen, sollten 600 ppm nur 0,8632 Grad bringen.

7 Kiehl, J. T. et al., National Center for Atmospheric Research (1997). „Earth's annual global mean energy budget“, American Meteorological Society. Vol. 78, 1997, S. 197–208, <http://www.geo.utexas.edu/courses/387H/PAPERS/kiehl.pdf>, Seite 206

8 Welt der Physik (2002). „Der Klimawandel kommt in Fluss“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/atmosphaere/klimaforschung/klimawandel-in-fluss/>

Heintz, A., (2013). „Chemie und Umwelt: Ein Studienbuch für Chemiker, Physiker, Biologen und Geologen“, Springer-Verlag, Seite 46,

9 World Meteorological Organization (WMO) (2019). „Data Summary WDCGG No. 43“, <https://gaw.kishou.go.jp/static/publications/summary/sum43/sum43.pdf>, Seite 4

3. Infrarotspektren des Kohlendioxids

Die Infrarotspektroskopie ist eine optische Analyse­methode, die Energiezustände in Molekülen oder Molekülgruppen misst. Neben der Absorption messen die Forscher auch die Emission, bzw. Transmission, die Durchlässigkeit der Moleküle, für Infrarotlicht. Es gibt daher beispielsweise Absorptionsspektren und Transmissionsspektren. Bestimmte Frequenzen bzw. Frequenzbereiche der Infrarot-Strahlung lassen die Moleküle durch, andere absorbieren sie. Durch die absorbierte Strahlung (Wärmeenergie) gehen die Moleküle in einen höheren energetischen Zustand über. Ihre Vibrations- oder Rotationszustände werden angeregt, die Moleküle kommen ins Schwingen. Ist die Schwingung mit einer Dipoländerung verbunden, dann ist diese Bewegung, bzw. die Änderung des Energiezustands, infrarotaktiv. Bei der Bewegung wird Energie frei, die als Wärmestrahlung in verschiedene Richtungen abgegeben wird.¹⁰ Die gemessenen Spektren liefern auch Informationen über die Zusammenhänge von Emission und Absorption der Strahlung:

„Wenn das durchgelassene Licht analysiert wird, findet man bei absorbierten Wellenlängen eine sehr viel geringere Intensität als bei den benachbarten Wellenlängen. Ein Teil der angeregten Zustände wird wieder, unter Aussenden derselben Wellenlänge, in den alten Zustand zurückkehren. Das könnte bedeuten, soweit das emittierte Licht von gleich großer Intensität ist wie das absorbierte Licht, dass keine Absorption messbar ist. Entscheidend ist aber, dass das emittierte Licht in alle Richtungen ausgestrahlt wird, während der Lichtstrahl, aus dem absorbiert wurde, nur in eine Richtung strahlt. Deshalb ist auch bei spontaner Rückemission (die nicht bei allen Übergängen vorkommt) der durchgelassene Lichtstrahl bei der Absorptionswellenlänge der Substanz stark geschwächt.“¹¹

Hinzu kommt, dass Moleküle, die ihre Strahlung abgegeben haben, erneut für die Absorption zur Verfügung stehen. Es ist ein dynamischer Prozess, der permanent abläuft.

Heintz, A., (2013). „Chemie und Umwelt: Ein Studienbuch für Chemiker, Physiker, Biologen und Geologen“, Springer-Verlag, Seite 46

Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019) „Klimawandel und ich“, youtube-video <https://www.youtube.com/watch?v=iKz11y4nRg0>, Grafik bei 1:09:11 min

Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019). Paper „Argumente gegen den anthropogenen Treibhauseffekt und ihre Widerlegung“, http://www.ak-schmitt.hhu.de/fileadmin/redaktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/Chemie/Phys_Chem1/AK_Schmitt/Argumente_gegen_den_anthropogenen_Treibhauseffekt_und_ihre_Widerlegung.pdf

Weart, S., American Institute of Physics (2017). „A Hyperlinked History of Climate Change Science“, <https://history.aip.org/climate/summary.htm>

10 Diehl, H. et al. (1981). „Physik für Biologen“, Springer-Verlag, Heidelberg 1981

Briefert, K. (1994). „Umweltchemie“, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1994

UCAR Center of Science Education (2012). „Carbon Dioxide Absorbs and Re-emits Infrared Radiation“, <https://scied.ucar.edu/carbon-dioxide-absorbs-and-re-emits-infrared-radiation>

11 Diehl, H. et al. (1981). „Physik für Biologen“, Springer-Verlag, Heidelberg 1981, Seite 265 f

Die gemessenen Banden des IR-Gasspektrums teilen sich bei höherer Auflösung in diskrete, scharfe Einzelbanden bzw. -linien auf. Die diskreten Energiezustände, bzw. Schwingungen/Rotationen sind im Infrarotspektrum als Senken zu erkennen, wenn man die Transmission, die Durchlässigkeit für Wärme, betrachtet, und als Peaks, wenn die Absorption gemessen wird. Die gemessenen Spektren sind Linienspektren. Durch Überlagerung der Einzelzustände entstehen (Absorptions-) Banden.¹²

Die folgenden Abbildungen zeigen schematisch die ausgehende Wärmestrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge in logarithmischer Darstellung. Die Spektren verdeutlichen auch die Anteile verschiedener Gase an der IR-Strahlung und die Überlappung der einzelnen Spektren der Gase. Bei Wellenlängen mit sehr hohem Absorptionsvermögen wird die Strahlung nur aus den oberen Schichten der Atmosphäre in den Weltraum abgegeben. In den absorptionschwachen Fenstern emittiert die Erdoberfläche die Strahlung direkt in den Weltraum.¹³

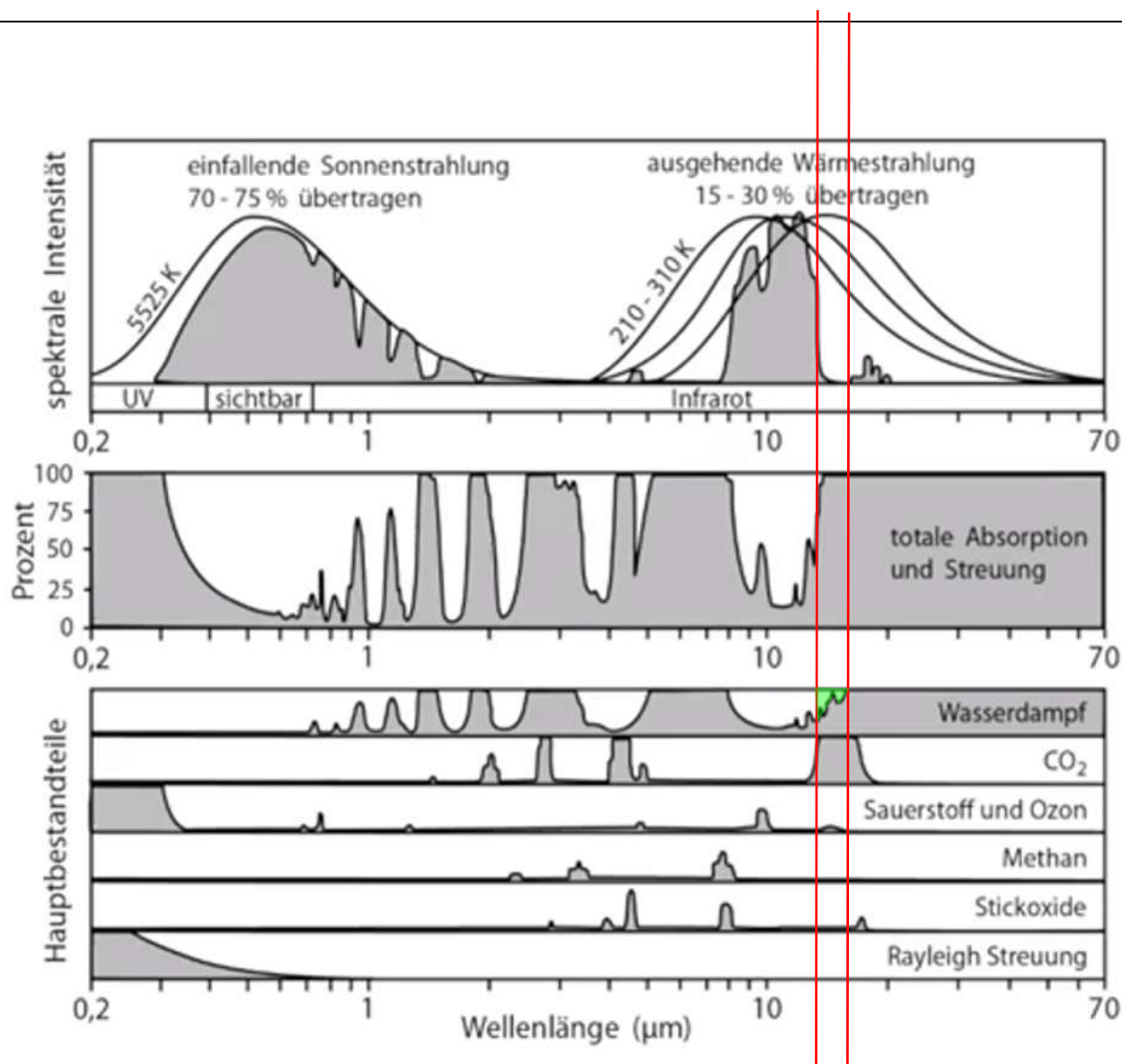
Die wichtigsten Banden für Absorption und Emission sind die von Wasser und Kohlendioxid. Wasser hat eine starke Rotationsschwingungsbande zwischen 5 und 8 μm mit einem Peak bei 6,3 μm und eine breite Bande bei 16 μm . Kohlendioxid hat eine starke Rotationsschwingung zwischen 13 und 17 μm mit einem Peak bei 15 μm , die sich teilweise mit dem des Wassers überlappt. Kohlendioxid und Wasserdampf lassen ein Fenster zwischen 7 und 13 μm offen, in denen teilweise die anderen Spurengase wirken.¹⁴

12 Spektrum der Wissenschaft (1998). „Lexikon der Physik - Spektroskopie“, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spektroskopie/13557>

13 Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019) „Klimawandel und ich“, youtube-video <https://www.youtube.com/watch?v=iKz11y4nRg0>

Raschke, E., Welt der Physik (2008). „Kurz- und langwellige Strahlung“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/atmosphaere/klimaforschung/treibhauseffekt/>

14 Roedel, W. (1994). „Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre“, 2. Auflage, Springer, Berlin 1994, Seite 40

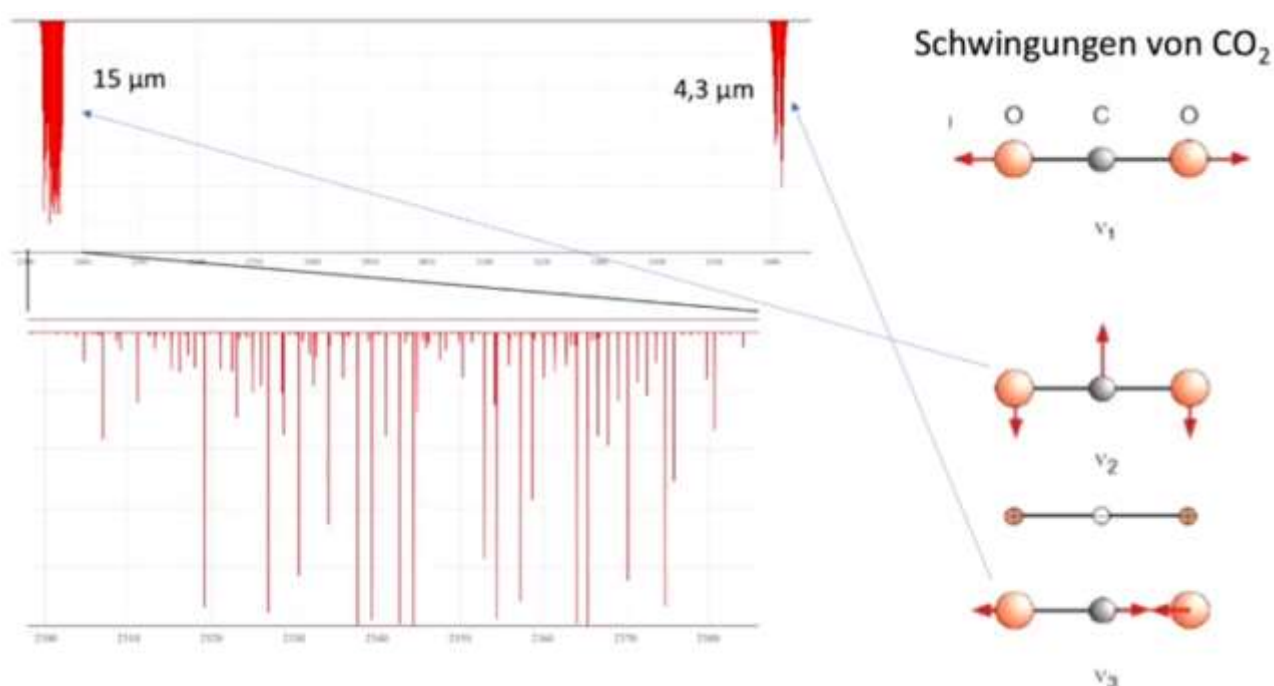


Die von der Erdoberfläche emittierte Infrarotstrahlung bewegt sich durch die einzelnen Schichten der Atmosphäre nach oben. In jeder Schicht wird Energie aus der Strahlung absorbiert. Das Molekül kann die Energie wieder abstrahlen oder bei Kollisionen mit anderen Molekülen in Geschwindigkeit umwandeln. Die Umwandlung führt zu Wärme. Die Schicht strahlt einen Teil der von ihr absorbierten Wärme zurück in Richtung Erdoberfläche, und einen Teil nach oben in höhere Schichten ab. Je höher die Schicht liegt, desto mehr nimmt ihre Dichte ab und umso kälter ist es in der Schicht. Wenn die Schicht so dünn ist, dass so wenig CO₂ oder ein anderes IR-aktives Gas vorhanden ist, entweicht die Wärmestrahlung in den Weltraum.¹⁵

15 Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019). Paper „Argumente gegen den anthropogenen Treibhauseffekt und ihre Widerlegung“, http://www.ak-schmitt.hhu.de/fileadmin/redaktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/Chemie/Phys_Chem1/AK_Schmitt/Argumente_gegen_den_anthropogenen_Treibhauseffekt_und_ihre_Widerlegung.pdf

Weart, S., American Institute of Physics (2018). „The Discovery of Global Warming“, https://history.aip.org/climate/simple.htm#L_0141

Das CO₂ absorbiert langwellige elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlängen bzw. insbesondere in zwei zusammenhängenden Wellenlängenintervallen, den Absorptionsbändern. Die folgende Abbildung verdeutlicht die Absorptionsbänder für CO₂ und die dazugehörigen Schwingungen. Der erste Teil der Abbildung zeigt die Absorptionsbänder bei 4,3 und 15 µm. Im zweiten Teil der Abbildung ist das 15 µm Absorptionsband vergrößert dargestellt. Je nach Auflösung der Darstellung sieht der Betrachter ein durchgehendes Band oder einzelnen Linien. Die zu den Bändern gehörenden Schwingungen sind ebenfalls zugeordnet.¹⁶



Infrarot-Spektren verschiedener wissenschaftlicher Datenbanken zeigen in hoher Auflösung beispielhaft, dass die Bänder in Linien aufgelöst sind und aus vielen einzelnen Absorptionslinien bestehen. Die folgende Abbildung zeigt die spektralen Linienlisten, die die Wellenlänge und

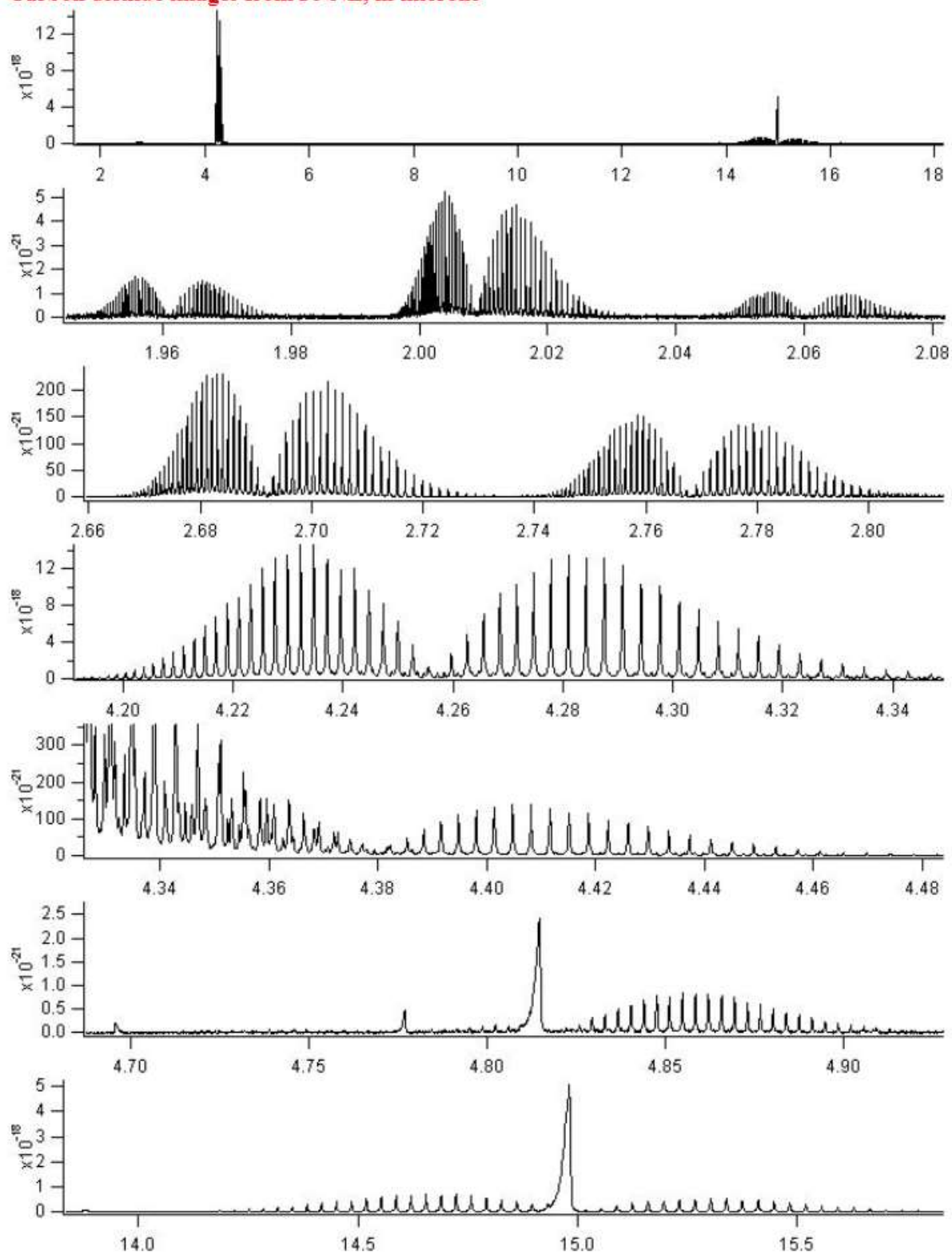
16 Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019) „Klimawandel und ich“, youtube-video <https://www.youtube.com/watch?v=iKz11y4nRg0>

Rayleigh-Streuung: Strahlung wird gestreut ohne dass sich die Wellenlänge der Strahlung ändert.

Stärke der Absorption beschreiben.¹⁷ Die Wellenzahl (ν) 667 cm^{-1} entspricht dabei etwa der Wellenlänge (λ) von $15\text{ }\mu\text{m}$.¹⁸ Im ersten Spektrum sind die beiden markanten Absorptionsbanden zu erkennen. Die nachfolgenden Spektren zeigen bei höherer Auflösung deutlich die einzelnen Spektrallinien der Banden; auch die mit geringerer Intensität. Die Auflösung der Y-Achse variiert daher entsprechend.

-
- 17 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (2015). „The HITRAN Database“(high-resolution transmission molecular absorption database“, <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
- Rothman, L.S., et al. (2005). „The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database“, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 96 (2005) 139–204, <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/Download/HITRAN04paper.pdf>
- Virtual Planetary Laboratory (VPL), University of Washington (2020). „VPL Molecular Spectroscopic Database“, <http://depts.washington.edu/naivpl/content/spectral-databases-and-tools> und <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/> (Startseite), <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2.htm> (CO₂-Spektren), zuletzt abgerufen am 12. März 2020
- HITRAN-Spektren für Wellenzahl [cm^{-1}] und Wellenlänge [μm]: <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2hitran2004images.htm> und <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2hitran2004imagesmicrons.htm>
- PNNL (Pacific Northwest Laboratory)-Spektren in Wellenzahl [cm^{-1}] und Wellenlänge [μm]: <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2pnnlimages.htm> und <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2pnnlimagesmicrons.htm>
- 18 Die Wellenzahl stellt die Anzahl der Schwingungen in einem Längenintervall von 1 cm dar und ist eine zur Energie proportionale Einheit der Spektroskopie. Die Infrarotspektroskopie verwendet zur Charakterisierung der Schwingungsübergänge oft die Wellenlänge. Umrechnung: Wellenlänge λ (μm) = $10.0000/\text{Wellenzahl } \nu$ (cm^{-1})

Carbon dioxide images from PNNL, in microns



4. Sättigung der Absorptionsbanden

Im Folgenden werden der Begriff der Sättigung und die Abhängigkeit der Sättigung von der Höhe der Atmosphärenschichten erläutert.

Der Begriff „Sättigung“ bezieht sich auf die im IR-Spektrum des CO₂ durchgelassene Infrarotstrahlung. Für durchgelassene IR-Strahlung ist die Atmosphäre „dünn“ und für absorbierte Strahlung „dick“. Die folgenden beiden Abbildungen verdeutlichen den Bereich der Sättigung und den Flankenbereich, in dem die Sättigung noch lange nicht erreicht ist. Der Wellenlängenbereich in der Mitte der 15 µm-Bande ist weitgehend gesättigt. Die Abbildungen zeigen einen stark vergrößerten Bereich des 15 µm Bandes in logarithmischer Darstellung. Im rot markierten, mittleren Bereich ist das Spektrum bei der heutigen CO₂-Konzentration gesättigt. „Das bedeutet, dass zusätzlich in die Atmosphäre gelangendes Kohlendioxid auf die Absorption in diesem Teilbereich der Bande keinen Einfluss hat, weil das in der Atmosphäre befindliche Kohlendioxid die Wellenlängen in dem Teilbereich bereits vollständig absorbiert.“¹⁹ Der gelbe Bereich zeigt die Sättigung bei einer Vervierfachung der CO₂-Konzentration. Die Flankenbereiche sind danach noch lange nicht gesättigt. Zusätzliches CO₂ kann in diesen Bereichen infrarote Strahlung absorbieren.²⁰

19 Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Sind die „CO₂-Absorptionsbanden“ nicht weitgehend gesättigt?“, vom 18.12.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#12-sind-die-co2-absorptionsbanden-nicht-weitgehend-gesattigt>

Hoffmann, G., Institute of Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU), University Utrecht (2009). „Sie ist gesättigt, sie ist es nicht, sie ist gesättigt, ... Anmerkungen zum Strahlungstransport“, vom 31. März 2009, <http://scienceblogs.de/primaklima/2009/03/31/sie-ist-gesattigt-sie-ist-es-nicht-sie-ist-gesattigt-anmerkungen-zum-strahlungstransport/>

20 Die zugrundeliegenden Daten entstammen dem HITRAN-Datenbanksystem: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (2015). „The HITRAN Database“ (high-resolution transmission molecular absorption database“, <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>

Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019). Paper „Argumente gegen den anthropogenen Treibhauseffekt und ihre Widerlegung“, http://www.ak-schmitt.hhu.de/fileadmin/redaktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/Chemie/Phys_Chem1/AK_Schmitt/Argumente_gegen_den_anthropogenen_Treibhauseffekt_und_ihre_Widerlegung.pdf

RealClimate (2007). „A Saturated Gassy Argument“, <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/a-saturated-gassy-argument/> und <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/a-saturated-gassy-argument-part-ii>

RealClimate (2007). „Part II: What Ångström didn't know“, <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/a-saturated-gassy-argument-part-ii/>

Daniel, Lübbert, Deutscher Bundestag Wissenschaftliche Dienste (2007). Ausarbeitung Kapitel 3, 4 und 5 „Bestimmung der Absorptions-Eigenschaften von CO₂“, „Sättigung der CO₂-Absorptionsbanden?“, „Absorption und Re-Emission von Strahlung durch CO₂-Moleküle“, WD 8 - 004/2007

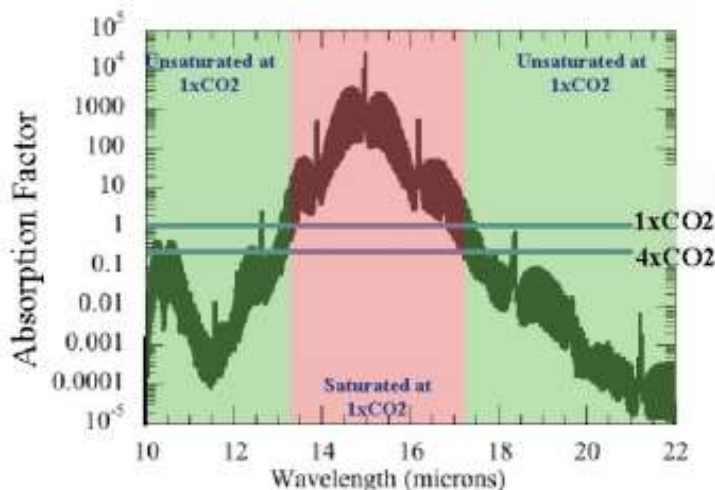


Abbildung 4: Absorption in der 15 µm Bande des CO₂ bei Vervielfachung der CO₂ Konzentration. Quelle: ⁱⁱ

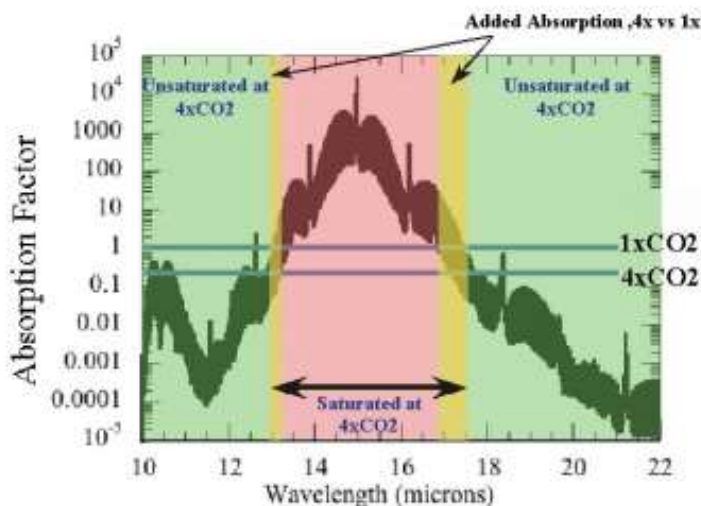


Abbildung 5: Zusätzliche Absorption in der 15 µm Bande des CO₂, bei Vervielfachung der CO₂ Konzentration.

4.1. Sättigung

In der Atmosphäre sind die Gase nicht homogen und nicht in diskreten Schichten verteilt. Neben den Prozessen der Absorption und Transmission finden auch Emission bzw. Re-emission statt. Moleküle nehmen Wärme auf und geben diese als Wärme oder Energie (in Form von Geschwindigkeit) ab. Die Wärme kann nach unten, auf die Erde abgestrahlt werden und erhöht dabei die Temperatur. Sie kann auch in höhere Schichten abstrahlen, diese erwärmen oder in den Welt- raum abgeben werden. Die Wärme der höheren Schichten kann zudem wieder nach unten abge- strahlt werden, wo sie zur Temperaturerhöhung bodennaher Schichten beitragen kann.

Genauer betrachtet entsteht die Unschärfe der Spektren der obigen Grafik durch Überlagerung von tausenden gemessenen Spektren bzw. Messpunkten der Datenbank. Die horizontalen Linien in der Grafik geben den Schwellenwert an, bei dem die Atmosphäre optisch dick wird. Geht man bildlich gesehen an der Linie der einfachen CO₂-Konzentration entlang, erhält man die Sättigung

als Kreuzpunkt mit dem Mittelwertbereich der Messwerte des Spektrums zwischen 13,4 und 17 μm . Da es sich um eine logarithmische Auflösung handelt, wäre die Atmosphäre immer noch nicht gesättigt, auch wenn sich der CO_2 -Gehalt deutlich erhöht. Der zweite Teil der Grafik markiert den zusätzlichen Bereich für den abgenommenen Fall der vierfachen Menge CO_2 . Mit zunehmendem CO_2 -Gehalt erhöht sich die Breite des Spektralbereichs, in dem die Atmosphäre optisch dick ist, die Atmosphäre in Gänze aber noch nicht gesättigt ist.

Die Einheiten des Absorptionsfaktors hängen von den Einheiten der CO_2 -Menge der Messung ab. Bei 300 ppm CO_2 bezogen auf einen Quadratmeter ist die Atmosphäre für den Analytiker optisch dick, wenn der Absorptionskoeffizient eins oder größer. Optisch dünn ist die Atmosphäre, wenn der Absorptionskoeffizient kleiner als eins ist. Bei einer Verdopplung des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre müsste der Absorptionskoeffizient nur 1/2 oder größer sein, damit die Atmosphäre optisch dick erscheint.

In dem Teil des Spektrums, in dem die Atmosphäre als optisch dick erscheint, erfolgt die Strahlung in den Weltraum, in dem Teil, der optisch dünn ist, in Richtung der Oberflächentemperatur. Mit zunehmendem CO_2 -Gehalt erhöht sich die Breite des Spektralbereichs, in dem die Atmosphäre optisch dick ist. Ein größerer Teil der Oberflächenstrahlung wird durch Strahlung aus der oberen Atmosphäre ersetzt und damit die Strahlungsverluste in den Weltraum verringert.

4.2. Abhängigkeit der Wärmestrahlung von Temperatur und Höhe

Die Luft ist aufgrund der niedrigen Temperaturen in höheren Schichten sehr trocken. Die Überschneidung der Absorptionsbande von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf wirken sich dort kaum auf die Sättigung aus. Da die Luft auch weniger dicht ist als am Boden, führt eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration zu einer verstärkten Absorption der IR-Strahlung. Die Strahlung wird auch nach unten abgestrahlt und bewirkt eine Verstärkung des Treibhauseffekts.

Nach der barometrischen Höhenformel²¹ nimmt der Gehalt von CO_2 mit der Höhe exponentiell ab. In den oberen Schichten der Atmosphäre ist der CO_2 -Gehalt so gering, dass keine Sättigung auftritt. Eine Erhöhung des CO_2 Gehalts verschiebt den Bereich, in dem die Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht, zu größeren Höhen. „In diesen Höhen ist die Temperatur niedriger und die Wärmeabstrahlung deshalb geringer (Stefan-Boltzmann-Gesetz²²). Die Atmosphäre nimmt in diesem Zustand mehr Energie auf, als sie abstrahlt. Die höchsten Schichten strahlen auch nach

21 Spektrum der Wissenschaft (2001). „Lexikon der Geographie - barometrische Höhenformel“, <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/barometrische-hoehenformel/726>

Die barometrische Höhenformel beschreibt den Zusammenhang zwischen Luftdruck und Höhe bzw. die vertikale Verteilung der (Gas-)Teilchen in der Atmosphäre der Erde.

22 Spektrum der Wissenschaft (2001). „Lexikon der Physik - Stefan-Boltzmann-Gesetz“, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/stefan-boltzmann-gesetz/13797>

Die Strahlungsleistung ist proportional zur vierten Potenz der Temperatur.

unten, so dass sie sukzessive die niedrigeren Schichten erwärmen.“ Durch den höheren CO₂-Gehalt muss sich erst ein neues Gleichgewicht einstellen, bei dem die hohen Schichten sich soweit erwärmt haben, dass sie weitere Wärme nach oben abstrahlen können.²³

Wie weit die Erdatmosphäre von der Sättigung entfernt ist, verdeutlicht ein Vergleich mit der Venusatmosphäre. Der CO₂-Gehalt liegt bei 96,5 % [Erdatmosphäre 0,04 %]. „Auf der Venus herrscht ein gigantischer Treibhauseffekt. Obwohl 95 % des einfallenden Sonnenlichtes durch die dichten Wolken reflektiert werden, reichen die restlichen 5 % aus, um unseren Nachbarplaneten aufzuheizen. An der Venusoberfläche herrscht eine mittlere Temperatur von 468 °C.“²⁴

23 Schmitt, M. (2019). Paper „Argumente gegen den anthropogenen Treibhauseffekt und ihre Widerlegung“, http://www.ak-schmitt.hhu.de/fileadmin/redaktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/Chemie/Phys_Chem1/AK_Schmitt/Argumente_gegen_den_anthropogenen_Treibhauseffekt_und_ihre_Widerlegung.pdf

24 European Space Agency (ESA) (2012) „Im Visier: Die rastlose Gashülle der Venus“, http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Im_Visier_Die_rastlose_Gashuelle_der_Venus

Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Sind die „CO₂-Absorptionsbanden“ nicht weitgehend gesättigt?“, vom 18.12.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#12-sind-die-co2-absorptionsbanden-nicht-weitgehend-gesaegtigt>

5. Quellenverzeichnis

- Ångström, K. (1900). "Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre." *Annalen der Physik* 4(3): 720-32. doi:10.1002/andp.19003081208, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19003081208>
- Arrhenius, S. (1896). "On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground." *Philosophical Magazine* 41: 237-76, https://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf
- Bliefert, K. (1994). „Umweltchemie“, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1994
- Diehl, H. et al. (1981). „Physik für Biologen“, Springer-Verlag, Heidelberg 1981
- European Space Agency (ESA) (2012) „Im Visier: Die rastlose Gashülle der Venus“, http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Im_Visier_Die_rastlose_Gashuelle_der_Venus
- Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (2015). „The HITRAN Database“ (high-resolution transmission molecular absorption database“, <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
- Hoffmann, G., Institute of Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU), University Utrecht (2009). „Sie ist gesättigt, sie ist es nicht, sie ist gesättigt, ... Anmerkungen zum Strahlungstransport“, vom 31. März 2009, <http://scienceblogs.de/primaklima/2009/03/31/sie-ist-gesattigt-sie-ist-es-nicht-sie-ist-gesattigt-anmerkungen-zum-strahlungstransport/>
- PNNL (Pacific Northwest Laboratory), zuletzt abgerufen 11. März 2020, <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2pnnlimages.htm> und <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2pnnlimagesmicrons.htm>
- RealClimate (2007). „A Saturated Gassy Argument“, <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/a-saturated-gassy-argument/> und <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/a-saturated-gassy-argument-part-ii>
- RealClimate (2007). „Part II: What Ångström didn't know“, <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/06/a-saturated-gassy-argument-part-ii/>
- Roedel, W. (1994). „Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre“, 2. Auflage, Springer, Berlin 1994
- Rothman, L.S., et al. (2005). „The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database“, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 96 (2005) 139–204, <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/Download/HITRAN04paper.pdf>
- Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019) „Klimawandel und ich“, youtube-video, <https://www.youtube.com/watch?v=iKz11y4nRg0>

Schmitt, M., Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2019). Paper „Argumente gegen den anthropogenen Treibhauseffekt und ihre Widerlegung“, http://www.ak-schmitt.hhu.de/fileadmin/re-daktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/Chemie/Phys_Chem1/AK_Schmitt/Argumente_gegen_den_anthropogenen_Treibhauseffekt_und_ihre_Widerlegung.pdf

Spektrum der Wissenschaft (2001). „Lexikon der Geographie - barometrische Höhenformel“, <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/barometrische-hoehenformel/726>

Spektrum der Wissenschaft (2001). „Lexikon der Physik - Stefan-Boltzmann-Gesetz“, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/stefan-boltzmann-gesetz/13797>

Spektrum der Wissenschaft (1998). „Lexikon der Physik - Spektroskopie“, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spektroskopie/13557>

Spiegel online (2019). „CO₂-Gehalt der Atmosphäre erreicht neuen Höchststand“, vom 14.5.2019, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/co2-gehalt-der-atmosphaere-erreicht-historischen-hoehchststand-a-1267384.html>

UCAR Center of Science Education (2012). „Carbon Dioxide Absorbs and Re-emits Infrared Radiation“, <https://scied.ucar.edu/carbon-dioxide-absorbs-and-re-emits-infrared-radiation>

Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Sind die „CO₂-Absorptionsbanden“ nicht weitgehend gesättigt?“, vom 18.12.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#12-sind-die-co2-absorptionsbanden-nicht-weitgehend-gesattigt>

Virtual Planetary Laboratory (VPL), University of Washington (2020). „VPL Molecular Spectroscopic Database“, <http://depts.washington.edu/naivpl/content/spectral-databases-and-tools> und <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/> (Startseite), <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/co2.htm> (CO₂-Spektren), zuletzt abgerufen am 12. März 2020

Weart, S., American Institute of Physics (2017). „A Hyperlinked History of Climate Change Science“, <https://history.aip.org/climate/summary.htm>

Weart, S., American Institute of Physics (2018). „The Discovery of Global Warming“, https://history.aip.org/climate/simple.htm#L_0141

Weart, S., American Institute of Physics (2020). „The Discovery of Global Warming“, <https://history.aip.org/history/climate/co2.htm>