

# Ist die CO<sub>2</sub>-Sättigungstheorie widerlegt?

Alfred Dandyk

Dr. Bernhard Strehl begründet seine These, die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration habe keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Erderwärmung, mit einem Sättigungseffekt. Wenn 100% der Lichtenergie absorbiert worden ist, dann kann eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration die Absorptionsrate nicht verändern, so lautet grob gesprochen die These.

Oft hört man die Aussage, die Sättigungstheorie sei „längst widerlegt“ und könne daher ad acta gelegt werden. Dabei wird als Beleg unter anderem die folgende Arbeit angegeben:

„Zhong&Haigh; The greenhouse effect and carbon dioxide“.

Sie ist frei im Internet erhältlich. In der Tat endet diese Arbeit mit der folgenden Schlussbemerkung:

*Berechnungen mit sehr hoher spektraler Auflösung und unter Verwendung modernster Daten zu den Absorptionseigenschaften von Gasen zeigen, dass bei einem Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration von Null aus die gesamte (momentane) RF zunächst sehr stark ansteigt, die Anstiegsrate sich jedoch abschwächt, so dass bei Konzentrationen zwischen etwa 30 und 800 ppmv die RF proportional zum log(Mischungsverhältnis) zunimmt. Dies ist die Situation in der heutigen Atmosphäre, in der die Konzentration 389 ppmv und die Gesamt-HF etwa 38 Wm<sup>-2</sup> beträgt. Bei höheren Konzentrationen wird die Steigerungsrate jedoch supra-logarithmisch. Das liegt daran, dass das Zentrum des 15-µm-Bandes gesättigt ist, während die Bandenflügel und insbesondere die 10-µm-Bänder bei der Bestimmung der Strahlungseffekte eine wichtige Rolle spielen - und diese sind noch lange nicht gesättigt. (Übersetzung aus dem Englischen: Alfred Dandyk)*

Man erkennt, dass die Aussage dieser Arbeit ambivalent ist, und zwar in Abhängigkeit von dem betrachteten Bereich der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Einerseits wird gesagt, dass im Bereich von 30 ppmv bis 800 ppmv die Abhängigkeit des Strahlungsantriebes von der Konzentration logarithmisch ist. Das hat zur Folge, dass bei einer Erhöhung der Konzentration von 30 ppm auf 800 ppm sich die Anstiegsrate der Erwärmung abschwächt. Weiterhin wird gesagt, dass bei höheren Konzentrationen die Steigerungsrate nicht mehr logarithmisch, sondern supra-logarithmisch ist. Als Grund wird angegeben, dass das 15-µm-Meter-Band gesättigt sei, während die Bandenflügel und das 10-µm-Meter-Band für weitere Strahlungseffekte sorgen und eine wichtige Rolle spielen. Man könne also nicht von einer Sättigung sprechen.

Damit gilt für viele Menschen, die sich mit dieser Problematik beschäftigen, die Sättigungstheorie für CO<sub>2</sub> als widerlegt. Auch Dr. Strehls Behauptung, die Erhöhung des CO<sub>2</sub> habe aus Gründen der Sättigung keinen oder einen nur geringen Einfluss auf die Erderwärmung, wäre damit hinfällig.

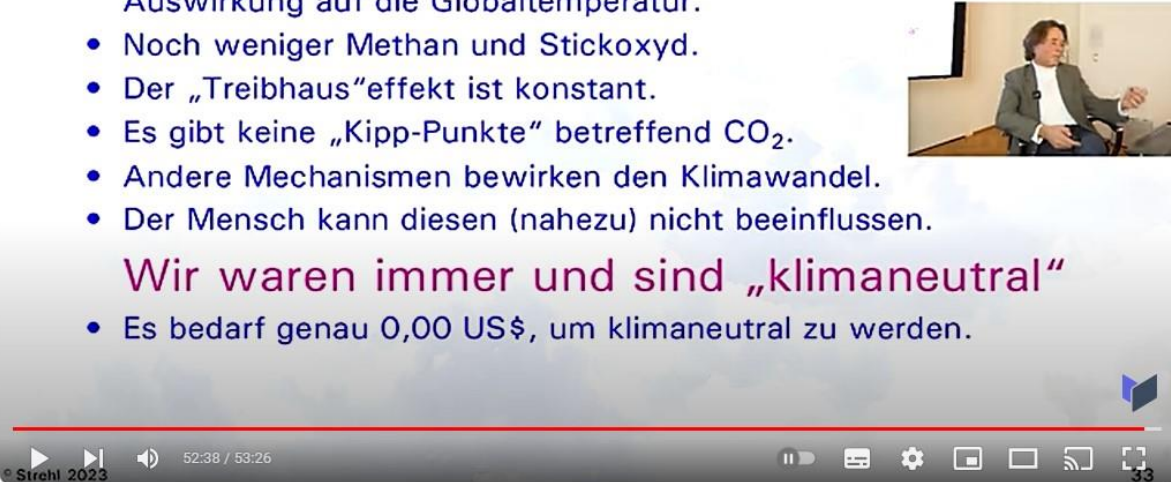
In diesem Aufsatz soll die Behauptung Dr. Strehls mit der Aussage von Zhong&Haigh verglichen werden und es soll untersucht werden, ob und in welchem Sinn die These Dr. Strehls widerlegt ist oder nicht. Strehl fasst seine These folgendermaßen zusammen:

## Schlußfolgerungen

- Das von den Menschen emittierte CO<sub>2</sub> hat nahezu keine Auswirkung auf die Globaltemperatur.
- Noch weniger Methan und Stickoxyd.
- Der „Treibhaus“effekt ist konstant.
- Es gibt keine „Kipp-Punkte“ betreffend CO<sub>2</sub>.
- Andere Mechanismen bewirken den Klimawandel.
- Der Mensch kann diesen (nahezu) nicht beeinflussen.

**Wir waren immer und sind „klimaneutral“**

- Es bedarf genau 0,00 US\$, um klimaneutral zu werden.



Nun ist es nicht einfach, die beiden Aussagen miteinander zu vergleichen. Strehls Aussage bewegt sich auf einer populär-wissenschaftlichen Ebene, während die Thesen von Zhong&Haigh einen wissenschaftlichen Charakter haben. Dennoch sollte es möglich sein, sie in Beziehung zu setzen.

Zunächst fällt auf, dass sich Strehl auf die menschliche Praxis bezieht. Er überlegt also, ob sich das Handeln der Menschen, zum Beispiel die Emission von CO<sub>2</sub> infolge der Verbrennung fossiler Stoffe, auf die Globaltemperatur der Atmosphäre auswirkt. Demgegenüber ist die Arbeit von Zhong&Haigh eher theoretischer Natur. Das ist zum Beispiel daran zu erkennen, dass sie sich auch mit CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beschäftigen, die weit außerhalb der menschlichen Praxis liegen, zum Beispiel 10000 ppm. Dieser Punkt wird für den genannten Vergleich entscheidend sein.

Für mich tauchen in Bezug auf die Arbeit von Zhong&Haigh zunächst mehrere Fragen auf:

- Ab wann ist das 15-Mü-Meter-Band gesättigt?
- Welche Komponenten spielen bei dieser Sättigung eine Rolle?
- Ab wann wird die Steigerungsrate supra-logarithmisch?
- Welchen Effekt hat die Berücksichtigung der Bandenflügel und des 10-Mü-Meter-Bandes hinsichtlich der Erwärmung?

Hinsichtlich der letzten Frage können wir eine Abbildung aus der genannten Arbeit von Zhong&Haigh heranziehen:

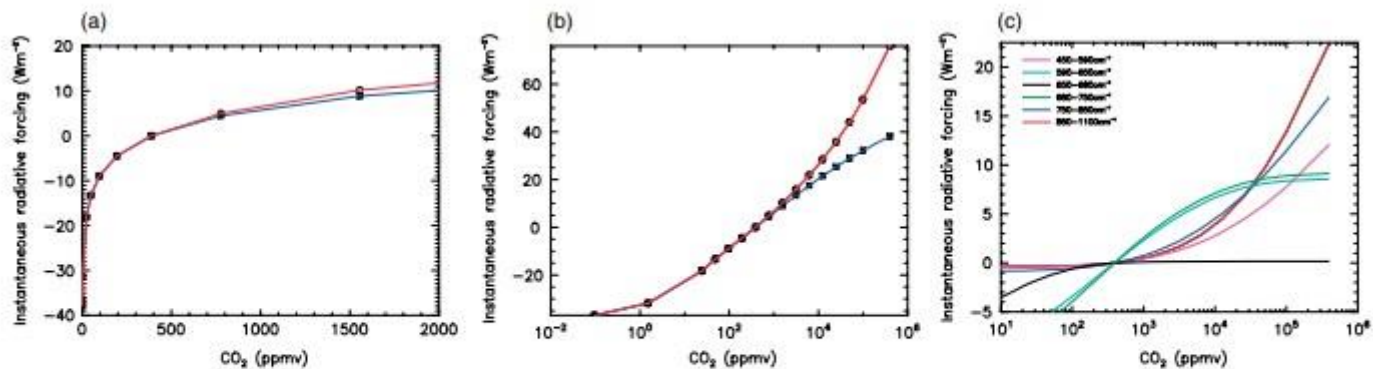


Figure 6. (a) Instantaneous Radiative Forcing of  $\text{CO}_2$  (relative to the present-day concentration) as a function of volume mixing ratio. The red curve is for the whole infrared region,  $0\text{--}3000\text{cm}^{-1}$ . The blue curve covers only the spectral region  $550\text{--}800\text{cm}^{-1}$  (i.e. the  $15\mu\text{m}$  band). (b) As (a) but extending to higher  $\text{CO}_2$  mixing ratios and presented against the logarithm of volume mixing ratio. (c) Radiative Forcing against  $\text{CO}_2$  mixing ratio for the six spectral intervals.

In Bild a) erkennt man die logarithmische Abhängigkeit der Erwärmungs-Effektivität (des Strahlungsantriebs) von der Konzentration. Die blaue Kurve bezieht sich auf das 15-Mü-Meter-Band ohne Berücksichtigung der Ränder und des 10-Mü-Meter-Bandes und die rote Kurve auf alle Bänder. Es ist deutlich zu sehen, dass von 0 ppmv bis zu etwa 800 ppmv kein Unterschied zwischen der roten und der blauen Kurve zu erkennen ist. Mit anderen Worten: Der Beitrag des 15 Mü-Meter-Bandes ist von dem Gesamt-Beitrag, also mit Einschluss der Ränder und der Nebenmaxima, nicht zu unterscheiden. Mit anderen Worten: Das 15-Mü-Meter-Band liefert im Bereich von 0 ppmv bis 800 ppmv den Gesamtbeitrag zur Erwärmung der Atmosphäre. In diesem Bereich müssen die Ränder und die Nebenmaxima nicht berücksichtigt werden. Wenn sie eine Rolle spielen sollten, dann ist der Effekt so gering, dass er zumindest in der obigen Kurve nicht auffällt. Wenn also in diesem Bereich das 15-Mü-Meter-Band gesättigt sein sollte, dann ist auch die gesamte  $\text{CO}_2$ -Absorption in diesem Bereich gesättigt.

Etwas anders liegen die Verhältnisse im Bereich von 1000 ppm bis 2000 ppm. Jetzt ist ein Unterschied zwischen der blauen und der roten Kurve zu erkennen. Je höher die Konzentration ist, desto größer wird der Unterschied. Die Ränder und die Nebenmaxima müssen jetzt berücksichtigt werden. Allerdings bleiben beide Kurven logarithmisch, nur die Anstiegsraten sind etwas unterschiedlich. Die blaue Kurve flacht stärker ab als die rote Kurve. Deutet man das Abflachen der Kurve als Indiz für einen Sättigungsprozess, dann kann man nach wie vor in beiden Fällen von einer Sättigung sprechen.

Die Frage ist allerdings, wie groß dieser Effekt ist und welche Bedeutung er für die Frage der Erderwärmung hat. Soweit anhand der Kurve in quantitativer Hinsicht überhaupt etwas zu erkennen ist, ist der Unterschied bei 1000 ppm so gut wie nicht vorhanden und beträgt bei 2000 ppm vielleicht 1 bis 2 Einheiten der auf der y-Achse aufgetragenen Größe, hier RF (radiative forcing) genannt, was am besten mit dem Ausdruck „Strahlungsantrieb“ übersetzt werden kann.

Wenn man für die Differenz zwischen Rot und Blau einen Wert von 1 bis 2 Einheiten annimmt und den Wert bei 2000 ppm mit 10 Einheiten festlegt, dann ergibt sich, dass die Differenz etwa 10% bis 20% des Strahlungsantriebes ausmacht. Auf die Erwärmung bezogen, könnte man sagen, dass man statt  $1^\circ\text{C}$  die Werte  $1,1^\circ\text{C}$  oder  $1,2^\circ\text{C}$  angeben müsste. Zu beachten ist dabei, dass die Werte des Strahlungsantriebes bei der gegenwärtigen Konzentration von etwa 400 ppm auf 0 gesetzt ist. Es sind also Angaben relativ zum gegenwärtigen Wert der Konzentration.

In Bild b) sieht man wieder den Strahlungsantrieb gegen die Konzentration aufgetragen, jetzt allerdings für sehr vielen höhere Werte der Konzentration, die von 0 ppmv bis  $10^6$  ppmv reichen, also von 0 bis 1 Millionen ppmv. Die Einteilung auf der x-Achse ist logarithmisch, das heißt 1 steht für  $10^1$ , 2 steht für  $10^2$  und so weiter. Bei einer solchen Skalierung ist zu erwarten, dass eine Logarithmuskurve in eine lineare Kurve übergeht, was in Bild b) auch tatsächlich zu erkennen ist. von  $10^1$  ppmv bis  $2 \cdot 10^3$  ppmv, also von  $10^1$  bis  $2 \cdot 10^3$  ist die Kurve in guter Näherung linear. Auch der Unterschied zwischen Rot und Blau ist in diesem Bereich nicht zu erkennen. Man kann also sagen, dass in diesem Bereich die Absorption gesättigt ist und die Seiteneffekte nur zu einer leichten Änderung der Anstiegsrate, aber nicht zu einem supra-logarithmischen Verhalten führen.

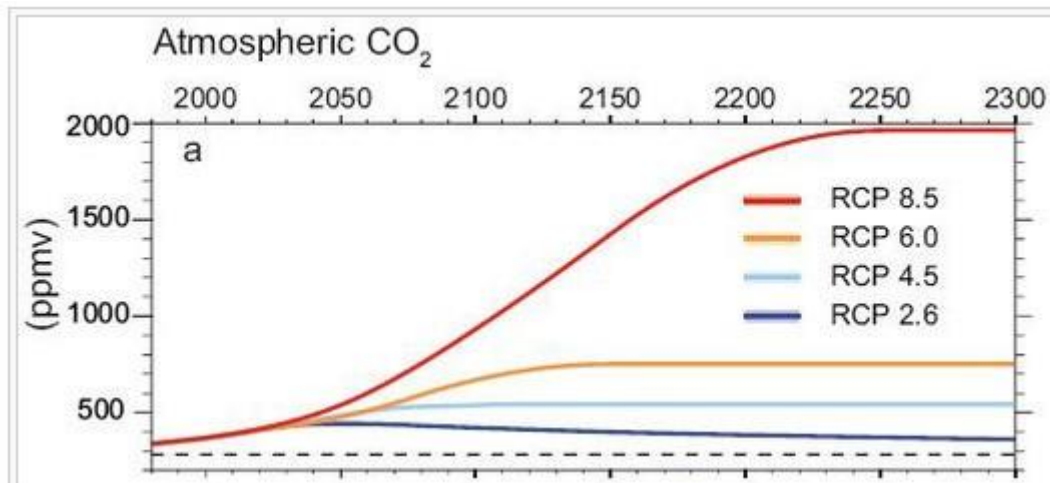
Das supra-logarithmische Verhalten beginnt meines Erachtens bei etwa 5000 ppmv und ist bei etwa 10000 ppmv deutlich zu erkennen. Dabei flacht die blaue Kurve ab, was den Übergang in ein Plateau-Verhalten andeuten könnte, während die rote Kurve ansteigt, was eine Dominanz der Seiteneffekte nahelegt. Es ist also richtig, dass in diesem Bereich nicht von einer Sättigung die Rede sein kann, weil das logarithmische Verhalten in ein supra-logarithmisches Verhalten übergeht.

Inwiefern folgt aus der Kurve b), dass keine Sättigung vorliegt? Man kann den logarithmischen Verlauf des Zusammenhangs als Indiz für das Vorhandensein einer Sättigung nehmen, denn der Logarithmus bedeutet eine stetige Verringerung der Wachstumsrate, was man als Anzeichen eines Sättigungsprozesses deuten kann. Wenn man also den logarithmischen Verlauf im Sinne einer Sättigung deutet, dann beweist der supra-logarithmische Verlauf das Fehlen einer Sättigung. Dieses Argument ist vollkommen richtig.

Die Frage ist aber, ob damit die Sättigungsthese, so wie Dr. Strehl sie aufstellt, widerlegt worden ist.

Zunächst muss man sagen, dass von dem Standpunkt aus, von dem Strehl das Problem betrachtet, Konzentrationswerte von 10000 ppmv vollkommen irrelevant sind. Denn die anthropogenen Emissions-Werte werden niemals zu einem solchen Wert führen. Selbst ein Wert von 2000 ppmv ist in Bezug auf die menschliche Praxis sehr fragwürdig. Zur Zeit haben wir 400 ppmv und es ist sogar fraglich, ob wir jemals 800 ppmv erreichen werden.

Man hat Szenarien entwickelt, nach denen man abschätzen kann, wie hoch die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in Zukunft sein werden:

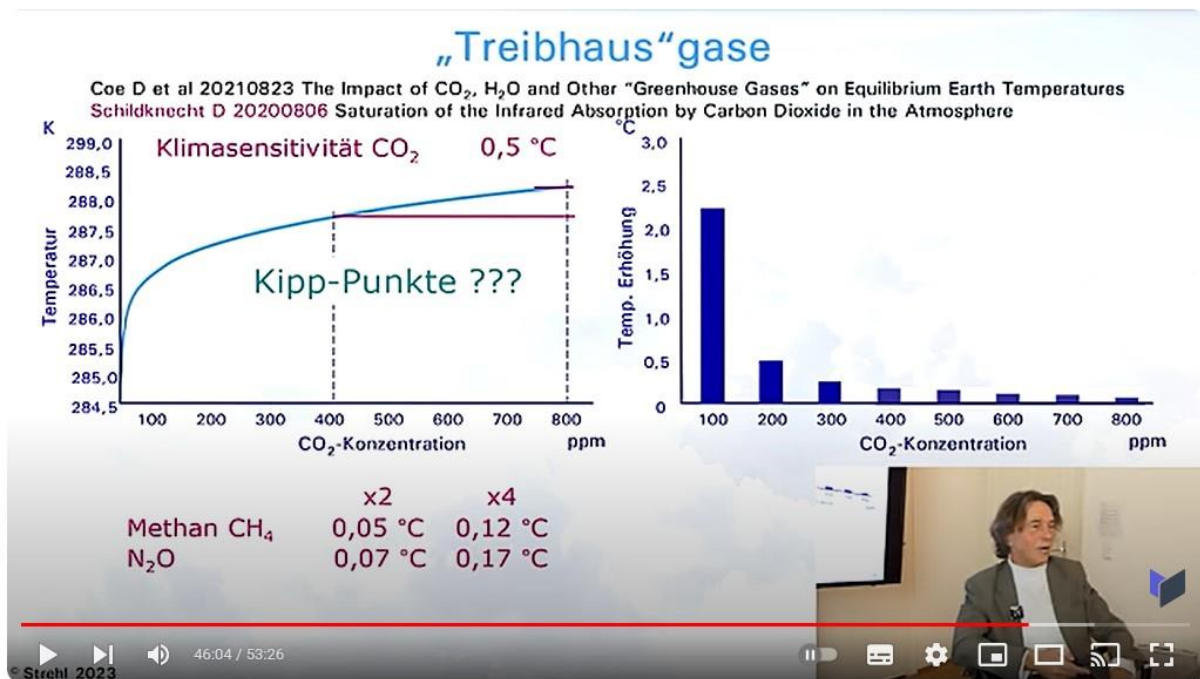


Quelle: [Langfristige Klimaprojektionen – Klimawandel \(bildungsserver.de\)](http://bildungsserver.de)

Hier ist die Zeit in Jahreszahlen gegen die CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppmv aufgetragen. Die Zeit reicht vom Jahre 2000 bis zum Jahr 2300. Es sind vier verschiedene Szenarien zu erkennen, wobei das erste für 2300 einen Wert von unter 500 anzeigt, das zweite einen Wert von 550, das dritte einen Wert von 750 und das vierte einen Wert von 2000. Für die ersten drei Szenarien ist in keinem Fall zu erwarten, dass sich die nicht-gesättigten Bänder des CO<sub>2</sub> bemerkbar machen. Für das vierte Szenario ist eine Differenz von 10% bis 20% zu erwarten: Wohlgermerkt: Diese Zahlen beziehen sich auf das Jahr 2300.

Nun ist eine Abschätzung für das Jahr 2300 vom praktischen Standpunkt aus nicht besonders plausibel und eher fragwürdig. Sinnvoller ist zum Beispiel das Jahr 2100 ins Auge zu fassen. Danach ergeben sich für das erste Szenario ein Wert unter 500 ppmv, dann ein Wert bei 550 ppmv, dann ein Wert von etwa 700 ppmv und dann ein Wert von 800 ppmv. Mit anderen Worten: In keinem der Szenarien ist zu erwarten, dass sich die nicht-gesättigten Bereiche bemerkbar machen werden.

Nun stellt sich die Frage, auf welche Bereich sich Dr. Strehl bezieht. Interessiert er sich für das Jahr 2300? Ich glaube nicht? Interessiert er sich für eine Konzentration von 10000 ppmv. Ich glaube auch nicht. Er interessiert sich für die Verhältnisse, die für den jetzigen Menschen unter den jetzigen Bedingungen herrschen, wobei man vielleicht eine Zeitspanne von 1900 bis 2100 gelten lassen kann. Und in dieser Zeitspanne haben wir es mit einer Konzentration von 280 bis maximal 800 ppmv zu tun, wie eben gezeigt wurde. Auch Strehl geht von einem solchen Bereich aus, wie das folgende Bild zeigt:



Zu sehen ist hier der logarithmische Zusammenhang zwischen der Konzentration und der Temperatur. Der Bereich der Konzentration geht bis 800 ppm. Und in diesem Bereich ist die These von der Sättigung des 15-Mü-Meter-Bandes korrekt und damit auch die Sättigung des CO<sub>2</sub> insgesamt, denn die Strahlung des CO<sub>2</sub> ist in diesem Bereich identisch mit der Strahlung des 15Mü-Meter-Bandes des CO<sub>2</sub>. Die Aussagen von Dr. Strehl und von Zhong und Haigh unterscheiden sich diesbezüglich nicht. Und da sie sich nicht widersprechen, kann man nicht behaupten, dass die Sättigungsthese widerlegt sei, jedenfalls dann nicht, wenn man sie im Sinne des Dr. Strehl auffasst.

Zongh und Haigh bestätigen auch ausdrücklich, dass der nicht-gesättigte Bereich nur für den Fall relevant ist, dass 800 ppmv überschritten werden. Und sie bestätigen weiterhin, dass das Zentrum des 15-Mü-Meter-Bandes gesättigt ist:

*Here we show in detail how, although the very centre of the 15µm band does become saturated, greenhouse trapping by CO<sub>2</sub> at other wavelengths is far from saturation and that, as its concentration exceeds approximately 800ppmv<sup>1</sup>, its effect actually increases at a rate faster than logarithmic.*

Das stimmt mit den Aussagen Dr. Strehls überein, der auch davon spricht, dass das Zentrum des 15 Mü-Meter-Bandes gesättigt ist, obwohl sich gewisse Veränderungen an den Rändern dieses Bandes bemerkbar machen können. Die Effekte sind aber in dem Bereich bis 800 ppmv schwach und zum Beispiel in der Kurve von Zhong und Haigh nicht bemerkbar. Hilfreich wäre hier eine Zahlentabelle, um die Effekte quantitativ besser einschätzen zu können.

Es ist also richtig, dass man auch nach Strehl nicht von einer vollständigen oder vollkommenen Sättigung sprechen kann, weil immer noch an den Rändern des 15-Mü-Meter-Bandes Absorptionen stattfinden können. Wenn man aber von einer vollständigen und einer nicht-vollständigen Sättigung sprechen will, dann rückt das Wort „Sättigung“

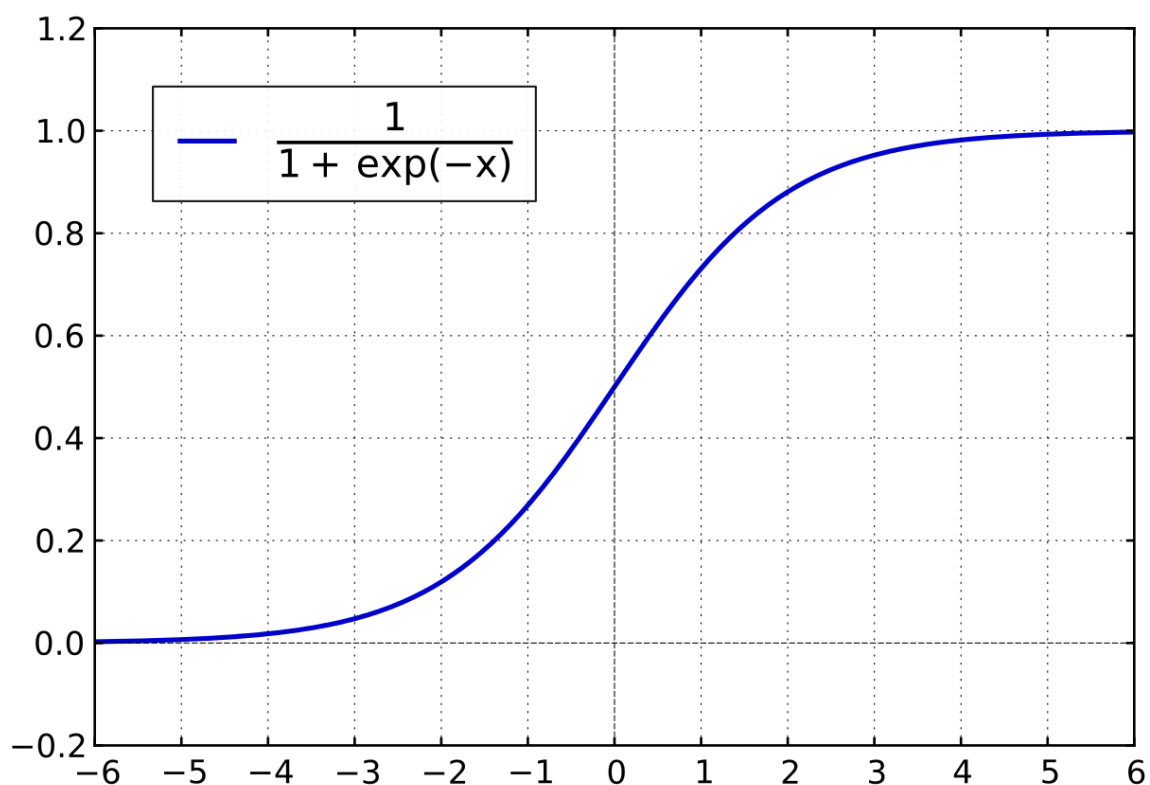


in den Fokus der Betrachtung. Was versteht man eigentlich unter einer Sättigung und was insbesondere unter der Sättigung der CO<sub>2</sub>-Absorption?

Dabei fällt zunächst die Vielfalt der Bedeutungen des Wortes „Sättigung“ auf. So spricht man zum Beispiel von einer Farbsättigung, einer psychologischen Sättigung, einer Sättigung der Wachstumsrate, von gesättigten chemischen Verbindungen oder von Sättigungskonzentrationen.

Man muss also davon ausgehen, dass das Wort „Sättigung“ zunächst einmal ein Wort der Alltagssprache ist und kein wissenschaftlicher Terminus. Es gibt diesen Begriff aber auch als wissenschaftlichen Terminus, der dann auch genau definiert sein muss, was bei dem Allerweltswort „Sättigung“ nicht unbedingt der Fall ist. Man sollte also tolerant sein, und den Gebrauch dieses Wortes sowohl in einem unscharfen als auch in einem scharfen Sinne erlauben. Man sollte nur wissen, worum es sich im konkreten Fall handelt.

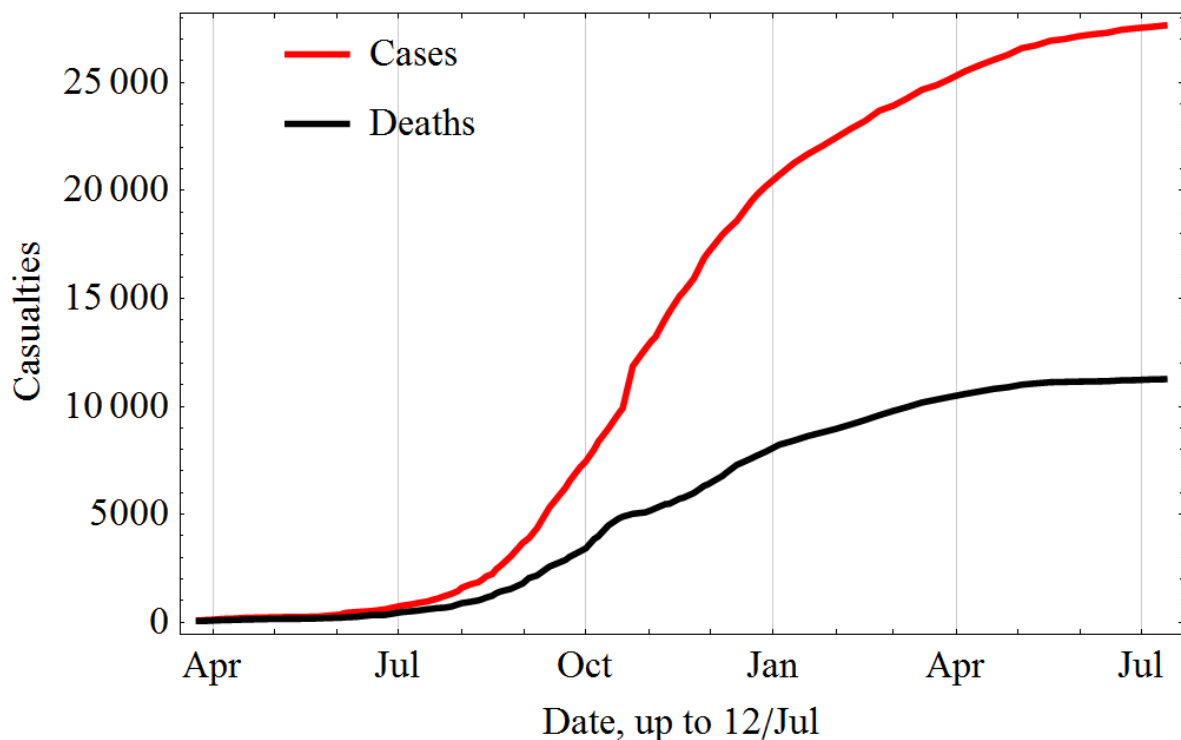
Eine Möglichkeit das Wort Sättigung präzise zu definieren, liegt in der Mathematik, indem man „Sättigung“ mit der logistischen Funktion in Beziehung setzt:



(Bild aus Wikipedia)

Man hat zunächst so etwas wie eine Exponential-Funktion, die allerdings zu einem Wendepunkt führt, so dass die Kurve sich schließlich in ein Plateau verwandelt, bei dem das Wachstum quasi zum Stillstand kommt, und zwar in dem Sinne, dass sie sich einer waagerechten Asymptote nähert. Das Wachstum wird demnach mit fortschreitendem x-Wert immer geringer, so dass es nach einer gewissen Zeit in einem praktischen Sinne vernachlässigbar wird. Wenn ein Prozess sich in diesem Sinne mathematisch

beschreiben lässt, dann kann man von einem Sättigungseffekt sprechen. Beispiel sind nach Wikipedia die Fallzahlen und Todesraten bei einer Epidemie:



Auch die Szenarien zur Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen scheinen dem Modell der logistischen Funktionen zu entsprechen, so dass man auch hier von einem Sättigungseffekt sprechen kann. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre ist – jedenfalls nach diesen Modellen - ein Sättigungsprozess, der ein unbegrenztes Wachstum verhindert und stattdessen in einen Zustand führt, der einen gewissen Grenzwert nicht überschreiten kann.

Die Frage ist nun, wie es sich mit der Absorption von Infrarot-Strahlung durch CO<sub>2</sub> verhält. Handelt es sich auch dabei um einen Sättigungsprozess in dem genannten Sinne? Offensichtlich nicht. Denn sowohl Dr. Strehl als auch Zhong und Haigh definieren einen *logarithmischen* Zusammenhang zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration und dem Strahlungsantrieb beziehungsweise der Temperatur-Erhöhung. Die Logarithmus-Funktion hat aber keine waagerechte Asymptote wie die logistische Funktion. Sie ist nicht beschränkt, sondern geht für  $x$  gegen Unendlich auch selbst gegen Unendlich.

Offensichtlich ist die „Sättigung“ im Falle der CO<sub>2</sub>-Konzentration von anderer Art als die Sättigung im Falle der Absorption von IR-Strahlung durch CO<sub>2</sub>. Im Falle der CO<sub>2</sub>-Konzentration handelt es sich um eine Sättigung im Sinne der logistischen Funktion, also im Sinne der Annäherung an eine waagerechte Asymptote. Bei der Absorption der IR-Strahlung durch CO<sub>2</sub> handelt es sich um eine Sättigung im Sinne der Abflachung der Änderungsrate ohne Annäherung an eine waagerechte Asymptote. Es gibt also keinen mathematischen Grenzwert.



Dafür muss es Gründe geben. Es ist ziemlich gut bekannt, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit ein logistisches Wachstum mit einem Sättigungseffekt entsteht. Diese Bedingungen sind mathematisch sauber definierbar. Es ist bekannt, dass das logistische Wachstum einer „logistischen Differentialgleichung“, auch Verhulst-Gleichung genannt, entspricht. Es gibt eine Geburtenrate und eine Sterberate, die in einem definierten Verhältnis stehen. Zum Beispiel ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre abhängig von der Geburtenrate, also dem Zufügen von CO<sub>2</sub> zur Atmosphäre und der Sterberate, also dem Herausnehmen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre. Sind die Verhältnisse entsprechend der Verhulst-Gleichung gegeben, dann entsteht ein logistisches Wachstum mit einem entsprechenden Sättigungseffekt. Diese Verhältnisse scheinen, wenn man den Szenarien glauben darf, in der Realität gegeben zu sein.

Die Tatsache, dass die Infrarot-Absorption von CO<sub>2</sub> nicht logistisch, sondern logarithmisch ist, ist eine Indiz dafür, dass die Bedingungen für ein logistisches Wachstums nicht erfüllt sind, also keine Sättigung in diesem präzisen Sinne vorliegt. Die Tatsache, dass es sogar einen supra-logarithmischen Bereich gibt, weist darauf hin, dass die Verhältnisse so kompliziert sind, dass sie nur schwer mathematisch modellierbar sind.

Die Frage nach den physikalischen Gründen des logarithmischen Zusammenhanges zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration und dem Strahlungsantrieb sind also offensichtlich sehr kompliziert und bis heute nicht wirklich geklärt. Siehe zum Beispiel:

<https://www.osti.gov/servlets/purl/1864725>

Die Autoren schreiben in dem Abstract ihrer Arbeit folgendes:

*Der Strahlungsantrieb durch Kohlendioxid ist in Relation zur Konzentration von CO<sub>2</sub> ungefähr logarithmisch und erzeugt bei jeder Verdoppelung etwa vier Watt pro Quadratmeter an globalem Mittelwert. Obwohl dies zu den grundlegenden Fakten der Klimawissenschaft gehört, wurden in der Literatur konkurrierende Erklärungen für sie angeführt. Hier werden die Gründe für den logarithmischen Antrieb durch Kohlendioxid im Detail untersucht und ein vereinfachtes Modell für den Antrieb konstruiert. Eine wesentliche Komponente ist die besondere Verteilung der Absorptionskoeffizienten innerhalb der 15-Mikrometer-Bande von Kohlendioxid. Eine alternative Erklärung, die nicht vom Spektrum des Kohlendioxids abhängt, sondern von den troposphärischen Temperaturverhältnissen abhängt, ist nachweislich weder notwendig noch ausreichend, um den logarithmischen Antrieb durch Kohlendioxid zu erklären, und sie ist generell nicht auf gut gemischte Treibhausgase in der Erdatmosphäre anwendbar. (Übersetzung aus dem Englischen: Alfred Dandyk)*

Offensichtlich gibt es zwei konkurrierende Paradigmen zur Erklärung der Logarithmusfunktion. Die eine arbeitet mit der Verteilung der Absorptionskoeffizienten innerhalb des 15-Mü-Meter-Bandes, die andere mit den sogenannten „tropospheric lapse rates“, also mit den Temperaturverhältnissen in der Troposphäre infolge der

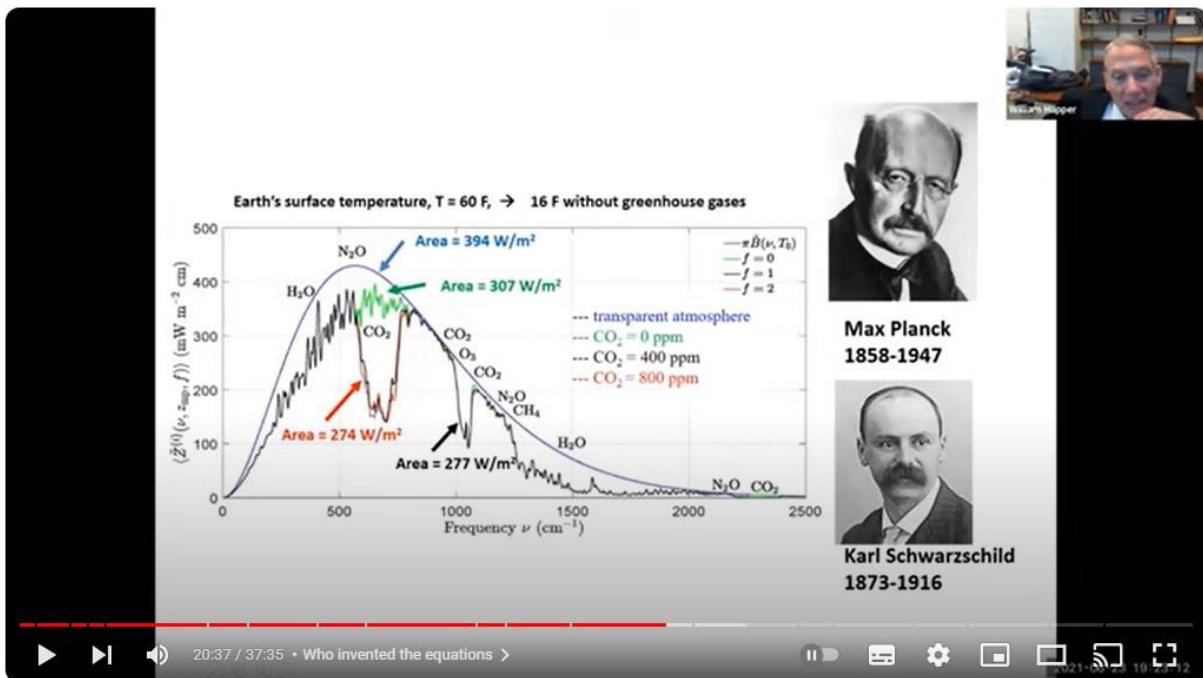
Konvektionsbewegungen der Luft. Die Autoren halten die „laps-rates-theory“ für unzureichend und präferieren die Theorie über die Absorptionskoeffizienten von CO<sub>2</sub>. Jedenfalls zeigt diese Arbeit, dass sich die Gelehrten über den physikalischen Ursprung der Logarithmusfunktion streiten und damit wird auch klar, warum die Frage nach der Sättigung nicht so ohne weiteres zu beantworten ist.

Insofern ist Strehls Darstellung des Sachverhaltes wirklich etwas blauäugig. Und insofern ist der Hinweis darauf, dass die Angelegenheit deutlich komplizierter ist, auch berechtigt. Und dennoch ist es richtig, davon zu sprechen, dass es offensichtlich einen Abflachungsprozess gibt, der sich am besten logarithmisch darstellen lässt. Ob man diesen Abflachungsprozess eine Sättigung nennen sollte oder nicht, ist dabei nicht so wichtig. Wichtig ist, dass man weiß, was damit gemeint ist.

Strehl will offensichtlich betonen, dass die Erhöhung der Temperatur, die durch das CO<sub>2</sub> verursacht wird, im Bereich von 0 ppm bis 800 ppm ungefährlich ist, weil es diesen Abflachungsprozess gibt, der durch eine Logarithmusfunktion dargestellt werden kann. Diese Tatsache wird von allen Diskutanten bestätigt. Strehl weist weiterhin daraufhin, dass dieser Abflachungsprozess etwas mit der Sättigung der CO<sub>2</sub>-Absorption zu tun hat, wobei das Absorptions-Maximum beim 15 Mü-Meter-Band eine entscheidende Rolle spielt. Dabei muss man zwischen dem Zentrum dieses Bandes und den Rändern dieses Bandes unterscheiden. Strehl sagt nun, dass das Zentrum dieses Bandes gesättigt ist und auch das wird von allen Diskutanten bestätigt. Es gibt also eine Rechtfertigung für diese Redeweise Strehls.

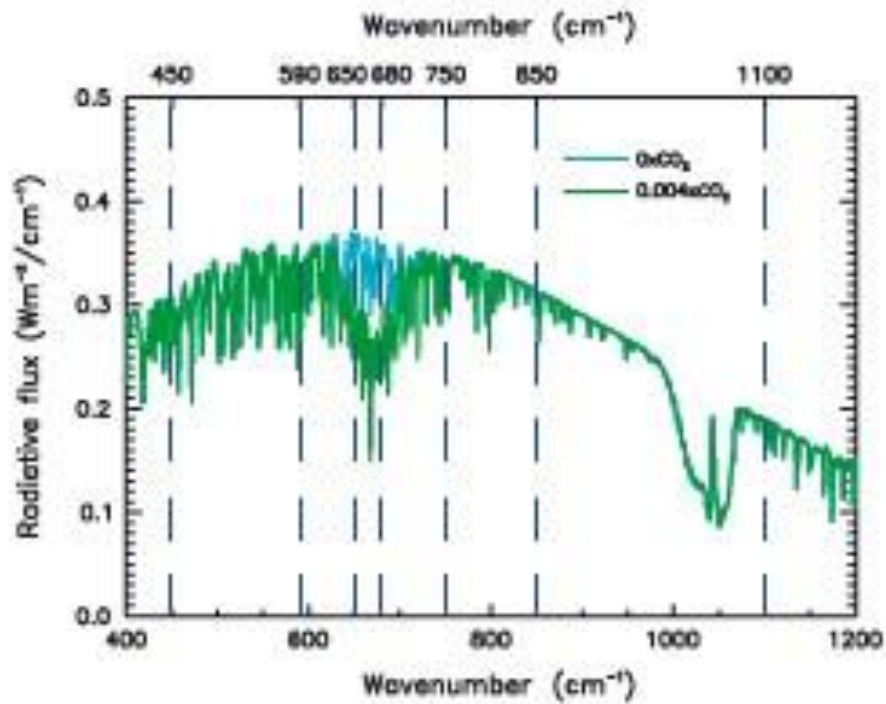
Strehl bestätigt auch, dass diese Art der Sättigung nicht vollständig ist, weil an den Rändern dieses Bandes Absorption stattfinden kann, obwohl das Zentrum gesättigt ist. Er betont aber, dass dieser Effekt klein ist. Hier müsste allerdings eine quantitative Abschätzung kommen, um näher zu bestimmen, was „klein“ bedeuten soll. Aber auch Zhong und Haigh bestätigen, dass im Bereich bis zu 800 ppm diese Seiteneffekte gering sind. Sie sind aber da und das erklärt wahrscheinlich auch zum Teil, warum die Kurve nicht logistisch, sondern logarithmisch ist. Man muss allerdings vorsichtig sein, weil die Sachverhalte nicht endgültig geklärt sind. Dennoch kann man sagen, dass die Art Strehls über die Sättigung der CO<sub>2</sub>-Absorption von Infrarot-Licht zu reden berechtigt ist und dass es keinen Grund gibt für die Behauptung, diese Theorie sei „längst widerlegt.“

Es gibt eine genauere theoretische Berechnung dieses Sachverhaltes von Karl Schwarzschild, die Professor William Happer in dem folgenden Bild darstellt:



Man sieht das Emissionsspektrum der Atmosphäre für verschiedene  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen. Bei 0 ppm hat man die grüne Kurve, mit einer Strahlungsintensität von 307 Watt/Quadratmeter. Bei 400 ppm erhält man die schwarze Kurve mit einer Strahlungsintensität von 277 Watt/Quadratmeter. Es sind also 30 Watt/Quadratmeter absorbiert worden. Dann hat man 800 ppm und man erhält die rote Kurve mit einer Strahlungsintensität von 274 Watt/Quadratmeter. Jetzt sind nur 3 Watt/Quadratmeter zusätzlich absorbiert worden. 400 ppm zusätzlich bewirken also zunächst 30 Watt/Quadratmeter und dann nur 3 Watt/Quadratmeter. In diesem Sinne gibt es offensichtlich eine Sättigung in diesem  $\text{CO}_2$ -Band.

Zongh und Haigh stellen denselben Sachverhalt in dem folgenden Bild dar:

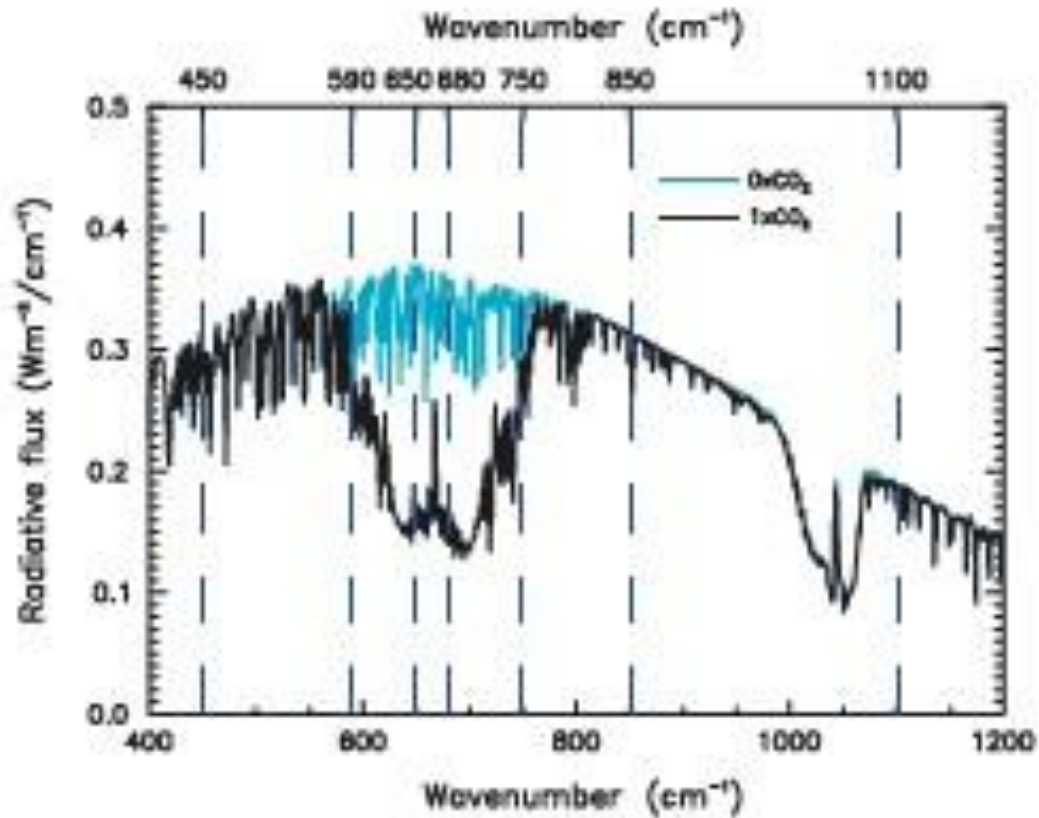


Sie schreiben dazu:

*The light blue curve represents zero CO<sub>2</sub> and the green curve shows that adding as little as 1.5 ppmv CO<sub>2</sub> in the atmosphere has a significant impact with strong absorption in the centre of the band.*

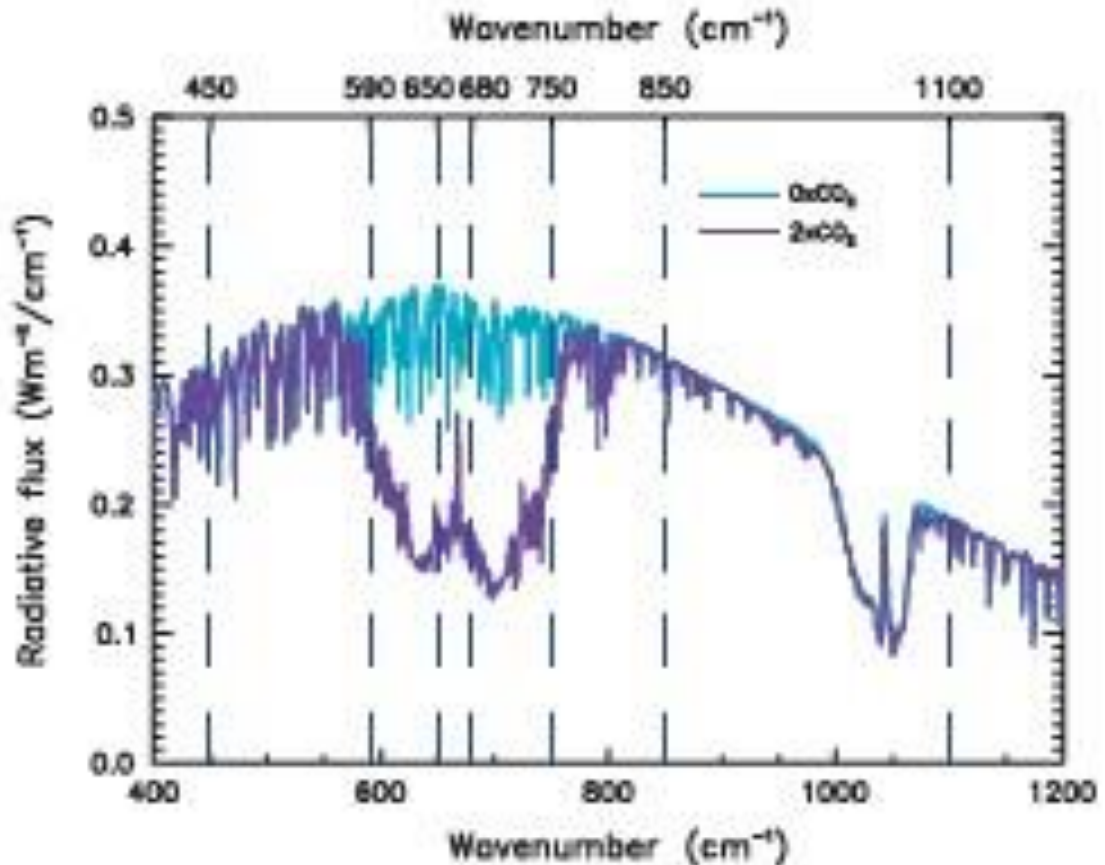
Dieses Bild zeigt also den starken Effekt von nur 1.5 ppmv, wenn man von 0 ppmv startet.

Das nächste Bild zeigt die Absorptionskurve für eine Konzentration von 389 ppmv:



Hier sind zwei Dinge zu erkennen. Erstens hat sich das Absorptionszentrum vertieft und zweitens hat es sich verbreitert. Mit anderen Worten. Im Zentrum gibt es eine deutlich stärkere Absorptionsrate und es tauchen mehr Wellenlängen auf, die absorbiert werden können. Die Geburtsrate erhöht sich also deutlich von zwei Aspekten her gesehen. Von der Vertiefung des Zentrums her und von der Verbreiterung der Linie.

Es folgt nun die Absorptionslinie für eine verdoppelte Konzentration von CO<sub>2</sub> gegenüber dem letzten Bild:

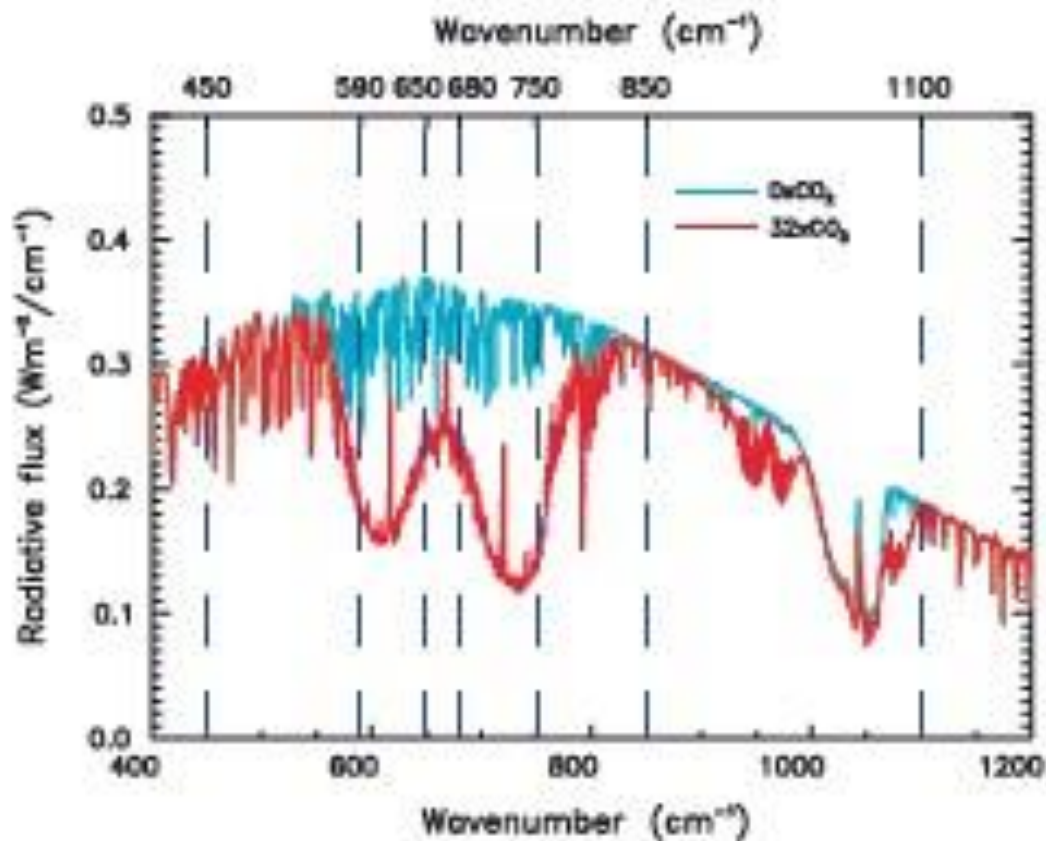


Obwohl die Konzentration nun bei fast 800 ppm liegt und die vorherige Konzentration bei etwa 400 ppm, ist deutlich zu erkennen, dass sich das Zentrum kaum vertieft hat. Dagegen ist die Absorptionskurve deutlich breiter geworden. Das heißt, das Zentrum ist deutlich gesättigt, aber es sind neue Wellenlängen hinzugekommen.

Offensichtlich treten hier zwei Bestrebungen in Konkurrenz. Das Zentrum neigt zur Sättigung und die Kurve neigt zur Verbreiterung. Es mag sein, dass diese Ambivalenz der Spektren bei Konzentrationserhöhung ein Grund für den logarithmischen Zusammenhang zwischen Konzentration und dem Strahlungsantrieb ist. Die Sättigung sorgt dafür, dass der Zuwachs abflacht und die Verbreiterung sorgt dafür, dass die Abflachung nicht logistisch, sondern nur logarithmisch ist. Was man mit Sicherheit sagen kann ist, dass die Abflachung ein Effekt der Sättigung des Zentrums ist.

Es folgt nun ein Bild, das die Absorptionskurve für eine sehr hohe Konzentration zeigt. Angegeben werden 32 mal 389 ppm, das heißt 12448 ppmv.



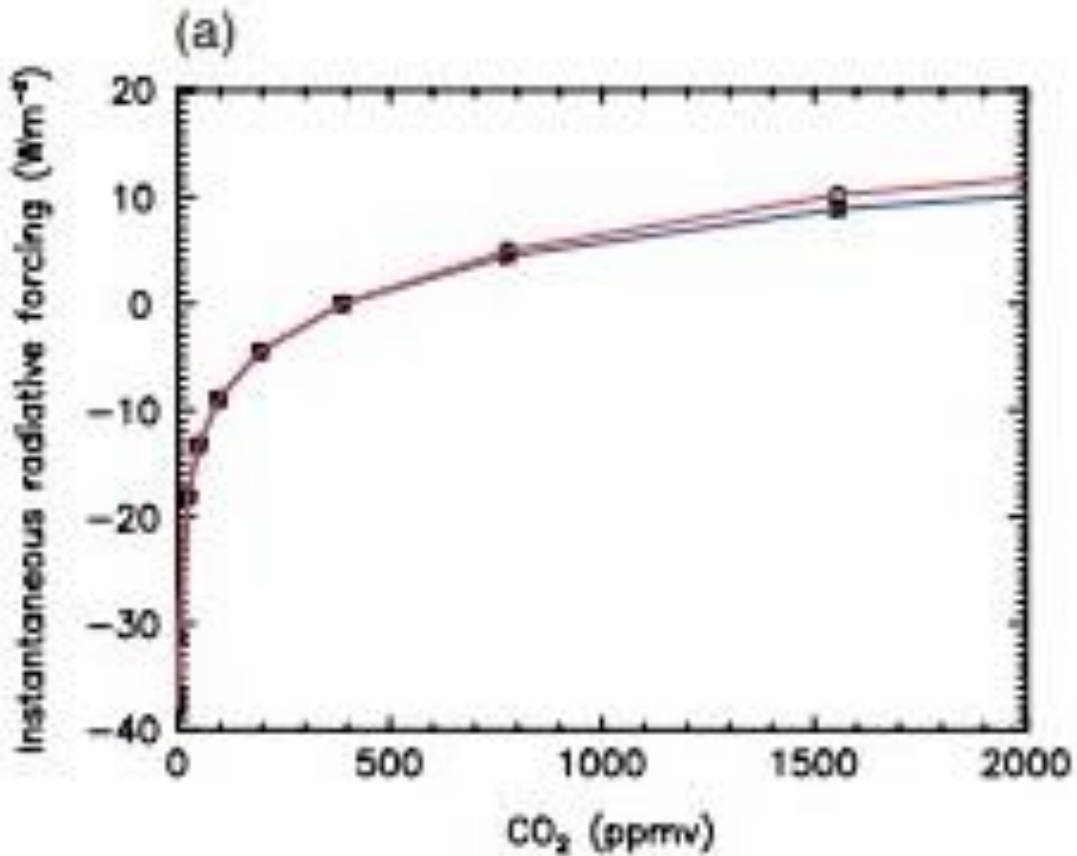


Die Absorptionskurve zeigt hier drei Auffälligkeiten. Die Tiefe der Kurve hat sich kaum verändert. Die Breite hat sich weiterhin verstärkt und als Drittes kommt ein neues Phänomen hinzu: Die Emission im Zentrum hat sich deutlich verstärkt. Zhong und Haigh schreiben dazu:

*For very high CO<sub>2</sub> concentration, the red curve shows an enhancement of these effects: the band centre produces greater emission but the band wings are absorbing more.*

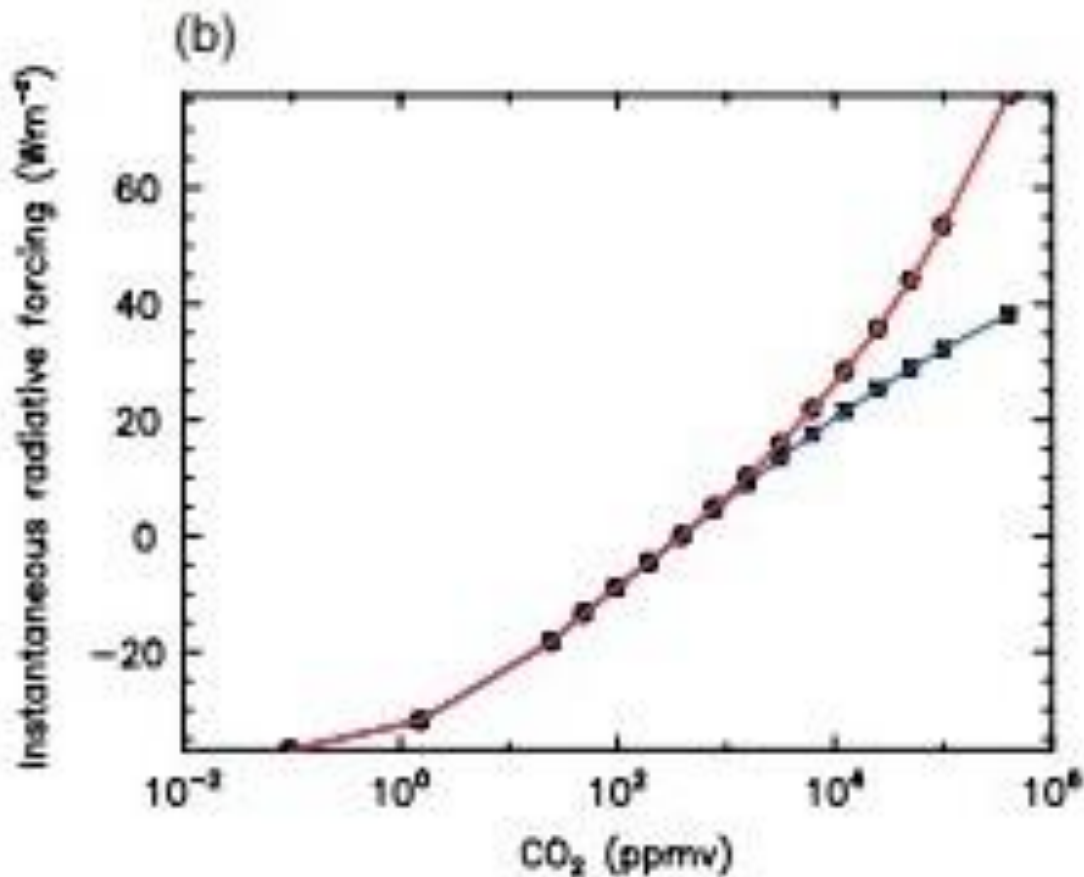
Beeindruckend ist vor allem die Sättigung der Absorptionskurve hinsichtlich der Tiefe. Man kann so viel CO<sub>2</sub> hinzufügen wie man will, die Menge an Absorption im Zentrum bleibt quasi gleich. Die Emission müsste den Strahlungsantrieb eigentlich verringern, während die Verbreiterung zu dessen Erhöhung beiträgt.

Die entscheidende Frage ist aber nun, welche Konsequenzen das alles für die Theorie des Klimawandels hat. Zhong und Haigh zeigen, dass der logarithmische Verlauf des Zusammenhanges zwischen Konzentration und Strahlungsantrieb bis 800 ppm vor allem durch das Zentrum des 15-Mü-Meter-Bandes vom CO<sub>2</sub> dominiert wird. Die Verbreiterung der Absorptionskurve spielt hier nur eine geringe Rolle. Zur Verdeutlichung hier noch einmal die Abbildung:



In dem Bereich bis 800 ppm, den Strehl betrachtet, sind die Seiteneffekte sehr klein, wie die Kurve deutlich zeigt. Also dominiert in diesem Bereich eindeutig die Sättigung des Zentrums des 16-Mü-Meter-Bandes des  $\text{CO}_2$ . Danach nimmt die Bedeutung der Seiteneffekte zu. Aber selbst im Bereich bis 2000 ppmv bleibt die Kurve logarithmisch, und zwar sowohl die blaue als auch die rote, so dass man in dem Sinne einer Abflachung der Anstiegsrate auch weiterhin von einer Sättigung sprechen kann, und zwar sowohl bei Strehl als auch bei Zhong und Haigh.

Auch die zweite Kurve bestätigt den Sachverhalt überdeutlich:



Hier reicht der Bereich der Konzentration bis zu  $10^6$  ppmv. Um diesen Bereich überhaupt darstellen zu können, hat man eine logarithmische Skalierung der x-Achse gewählt. Bei dieser Skalierung ist zu erwarten, dass sich eine Logarithmus-Funktion in eine lineare Funktion verwandelt. Tatsächlich ist zu erkennen, dass im Bereich von 10 ppmv bis 2000, also von  $10^1$  bis  $2 \times 10^3$  ppmv eine lineare Funktion zeigt. Das ist der logarithmische Bereich, indem eine Sättigung im Sinne der Abflachung besteht. Dann trennen sich die blaue und die rote Kurve. Die blaue Kurve flacht ab, was zeigt, dass sie noch mehr abflacht als eine Logarithmusfunktion. Das könnte man im Sinne der Sättigung des Zentrums des Hauptmaximums deuten. Demgegenüber steigt die rote Kurve an, was im Sinne der Dominanz der Seiteneffekte gedeutet werden kann.

Die gezeigten Szenarien hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zeigen, dass man sehr wahrscheinlich bis 2100 die 800 ppmv-Grenze nicht überschreiten wird. Nimmt man das ungünstigste Szenario, dann erreicht man 2100 1000 ppmv. Selbst dann ist die Wirkung der Seiteneffekte sehr moderat und man ist nach wie vor weit von einem supra-logarithmischen Bereich entfernt.

Der supra-logarithmische Bereich, auf den Zhong und Haigh Bezug nehmen, wenn sie sagen, dass die Sättigungs-Theorie widerlegt sei, ist für den anthropogenen Klimawandel vollkommen irrelevant, weil er erst bei 5000 ppmv wirksam wird. Das ist ein Wert, der durch die anthropogene CO<sub>2</sub>-Emission niemals erreicht werden kann und der deswegen für den Kontext, in dem Dr. Strehl argumentiert, nicht ins Spiel gebracht werden darf. Die Behauptung, die Sättigungstheorie sei damit widerlegt, ist demnach eine Fehlinformation.

*At concentrations higher than at present the black curve is essentially horizontal, indicating that the band core is saturate*