Treibhauseffekt einfach erklärt: Warum CO_2 Wärme schluckt und Stickstoff nicht

KLIMAPHYSIK MIT QUANTEN

Ab Mai 1859 untersuchte John Tyndall in London, wie Wärmestrahlung durch Gase dringt. Für die Messungen, die er 1861 veröffentlichte, schickte er sie durch ein vier Fuß, also gut 1,2 Meter langes Messingrohr, das er nacheinander mit verschiedenen Gasen füllte. Sauerstoff, Stickstoff und getrocknete Luft ließen die Strahlung fast ungehindert passieren. Ölbildendes Gas, so hieß damals das Ethylen, schluckte dagegen rund 80 Prozent. Auch Kohlensäure, wie man Kohlendioxid nannte, absorbierte deutlich, und feuchte Laborluft schluckte etwa fünfzehnmal so viel wie getrocknete [1]. Tyndall erkannte, was das für das Klima bedeutet. Nicht die Hauptbestandteile der Luft halten die Erde warm, sondern ein paar Spurengase, allen voran der Wasserdampf [1].

Das ist bis heute der Kern des Treibhauseffekts. Stickstoff und Sauerstoff machen zusammen rund 99 Prozent der trockenen Luft aus, Kohlendioxid nur etwa 0,04 Prozent [2]. Trotzdem ist das CO_2 neben dem Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas, und anders als dieser steuert es das Klima [3]. Warum Stickstoff und Sauerstoff dabei nicht mitspielen, beantwortet die Quantenphysik, und die Antwort passt in eine einzige Bedingung.

Wie warm wäre die Erde ohne Treibhausgase?

Die Erde bekommt ihre Energie fast ausschließlich von der Sonne. Auf jeden Quadratmeter, der senkrecht zur Sonne steht, treffen oberhalb der Atmosphäre rund 1361 Watt, die sogenannte Solarkonstante S. Davon werfen Wolken, Eis und helle Flächen knapp 30 Prozent gleich wieder zurück ins All. Dieser Anteil heißt Albedo α [2]. Weil die Erde eine Kugel ist und sich dreht, verteilt sich die Einstrahlung auf eine viermal so große Fläche, wie sie der Sonne als Scheibe zuwendet.

Damit die Erde sich nicht immer weiter aufheizt, muss sie genauso viel Energie wieder abgeben, und das kann sie nur als Wärmestrahlung. Wie viel ein Körper abstrahlt, hängt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz von der vierten Potenz seiner Temperatur ab. Setzt man Einstrahlung und Abstrahlung gleich, ergibt sich die Temperatur, die die Erde ohne wärmende Lufthülle hätte:

$$(1-\alpha)\cdot\frac{S}{4}=\sigma\cdot T^4 \quad\Rightarrow\quad T\approx 255\,\mathrm{K}\approx -18\,^{\circ}\mathrm{C} \tag{1}$$

Hier ist σ die Stefan-Boltzmann-Konstante [4], und mit einer Albedo von 0,294, wie sie die Erde heute samt Wolken hat, ergeben sich rund 255 Kelvin (eigene Rechnung, die NASA nennt 254 K [2]). Tatsächlich liegt die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche bei etwa 15 °C, also 288 Kelvin [2]. Die Differenz von gut 30 Kelvin ist der natürliche Treibhauseffekt. Ohne ihn wäre die Erde ein Eisball [3], und das ist auch der Grund, warum man ihn nicht pauschal verteufeln sollte. Das Problem ist nicht der Effekt selbst, sondern dass er stärker wird.

Sonnenlicht hinein, Wärmestrahlung hinaus

Entscheidend ist, dass die Erde in einer ganz anderen Farbe strahlt als die Sonne. Jeder warme Körper sendet ein breites Spektrum aus, dessen Maximum umso weiter ins Kurzwellige rückt, je heißer er ist. Max Planck hat dieses Spektrum im Jahr 1900 erklärt, und genau dabei kamen die Quanten in die Physik [5] (die Geschichte dazu steht unter 100 Jahre Quantenmechanik). Eine einfache Folge seines Strahlungsgesetzes ist das Wiensche Verschiebungsgesetz [4]:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \qquad b \approx 2898\ \mu\mathrm{m}\cdot\mathrm{K} \tag{2}$$

Die effektive Temperatur der Sonnenoberfläche beträgt 5772 Kelvin [6], ihr Licht ist am stärksten bei etwa 0,5 Mikrometern, mitten im sichtbaren Bereich. Die Erde mit ihren 288 Kelvin strahlt am stärksten bei rund 10 Mikrometern, im Infraroten, das wir nicht sehen, aber als Wärme spüren. Die beiden Spektren überlappen sich kaum (Abb. 1). Die Atmosphäre lässt das Sonnenlicht größtenteils durch, für die Wärmestrahlung der Erde ist sie dagegen in weiten Teilen undurchsichtig. Nur in einem „Fenster“ zwischen etwa 7,7 und 12,5 Mikrometern kann die Strahlung vom Boden aus bei klarem Himmel direkt ins All entweichen [3].

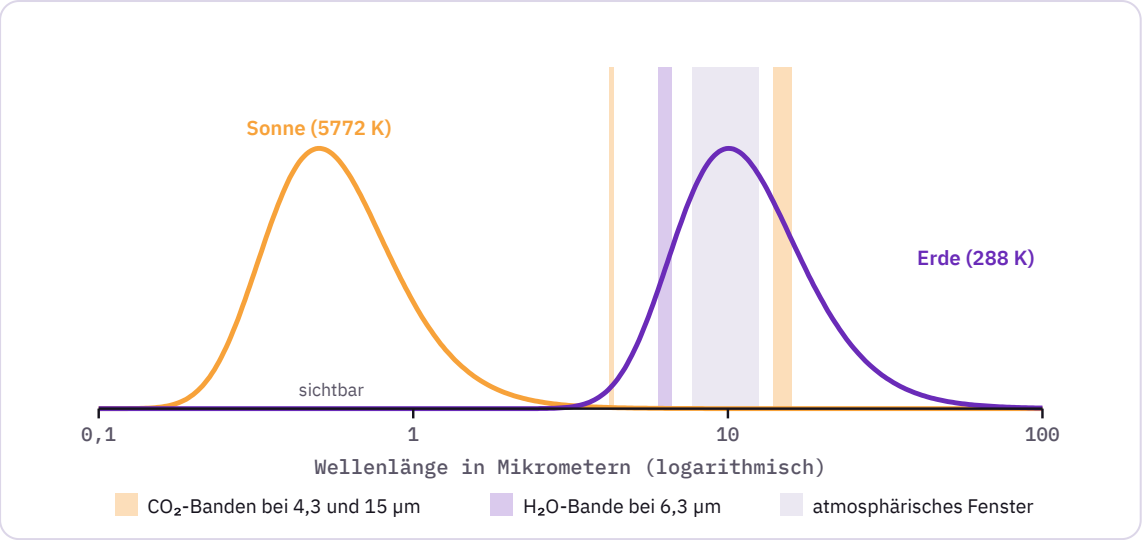

Abb. 1: Form der Strahlungsspektren von Sonne und Erde (spektrale Strahldichte pro Wellenlänge, jeweils auf ihr Maximum normiert) mit einigen Absorptionsbanden von CO_2 und Wasserdampf sowie dem atmosphärischen Fenster, stark vereinfacht. Jenseits von etwa 17 µm absorbiert zusätzlich Wasserdampf durch Rotation. Eigene Berechnung und Darstellung nach dem Planckschen Strahlungsgesetz, Lage der Banden nach [7],[3].

Was die Treibhausgase schlucken, ist nicht verloren. Sie geben die Energie an die umgebende Luft weiter und strahlen ihrerseits Wärme ab, in alle Richtungen, also auch zurück zum Boden. Ins All entweicht die Strahlung in den Absorptionsbanden erst aus großer Höhe, wo die Luft dünn genug ist, und dort ist es kälter als am Boden [3]. Eine kalte Schicht strahlt weniger ab als eine warme, also muss sich das ganze System erwärmen, bis Einstrahlung und Abstrahlung wieder im Gleichgewicht sind. Raymond Pierrehumbert nennt das CO_2 deshalb schlicht eine Dämmschicht für den Planeten [3].

Mit einem Gewächshaus hat das übrigens wenig zu tun, auch wenn es dem Effekt den Namen gab. Der Physiker Robert Wood baute 1909 zwei Kästchen, eines mit Glas abgedeckt, das Wärmestrahlung schluckt, eines mit Steinsalz, das sie durchlässt. Beide wurden in der Sonne praktisch gleich warm [8]. Ein Gewächshaus heizt sich vor allem deshalb auf, weil das Dach die warme Luft am Aufsteigen hindert. Die Atmosphäre hat kein solches Dach.

Warum Stickstoff nicht mitspielt

Infrarotstrahlung wird von Molekülen geschluckt, indem sie sie zum Schwingen bringt. Die Atome eines Moleküls sind durch Bindungen verbunden, die sich wie kleine Federn dehnen und biegen lassen. Quantenmechanisch kann eine solche Schwingung aber nicht jede beliebige Energie haben, sondern nur bestimmte Stufen, die in der einfachsten Näherung gleich weit auseinanderliegen. Mehr dazu, warum Energie in Paketen kommt, erklärt die Seite Was sind Quanten?. Ein Lichtquant kann ein Molekül nur dann eine Stufe höher heben, wenn seine Energie genau zum Abstand passt. Und es braucht noch etwas, eine Art Griff, an dem das elektrische Feld der Strahlung anfassen kann [9]:

$$E_n = h\nu(n + \frac{1}{2}), \quad \Delta n = \pm 1, \quad (\frac{\partial \mu}{\partial q})_0 \neq 0 \tag{3}$$

Die erste Formel beschreibt die Energiestufen einer Schwingung mit der Frequenz ν, die zweite sagt, dass Licht in der Regel nur von einer Stufe zur nächsten führt. Die dritte ist die entscheidende. Sie verlangt, dass sich das elektrische Dipolmoment μ des Moleküls ändert, wenn die Atome entlang der Schwingung q ausgelenkt werden [9]. Ein Dipolmoment entsteht, wenn die Ladung im Molekül ungleich verteilt ist, wenn also ein Ende etwas negativer ist als das andere. Nur an so einer schwankenden Ladungsverteilung kann die elektromagnetische Welle rütteln. Schwingungen, die diese Bedingung erfüllen, nennt man IR-aktiv, die anderen IR-inaktiv.

Damit ist das Rätsel gelöst. Ein Stickstoffmolekül besteht aus zwei gleichen Atomen, die die Elektronen genau gleich stark an sich ziehen. Es hat kein Dipolmoment, und wenn die Bindung sich streckt und staucht, bleibt das so. Die Schwingung existiert, ihre Energie läge mit rund 2330 Wellenzahlen (berechnet aus den Molekülkonstanten) sogar im Infraroten [10], aber Strahlung kann sie nicht anregen. Für Sauerstoff gilt dasselbe [9],[10]. Argon, der dritthäufigste Bestandteil der trockenen Luft, ist ein einzelnes Atom und kann gar nicht schwingen. Ganz durchsichtig sind diese Gase übrigens nicht, bei Zusammenstößen zweier Moleküle entsteht kurzzeitig ein kleines Dipolmoment. Unter irdischen Bedingungen spielt das aber nur eine Nebenrolle [3].

Beim Kohlendioxid ist es komplizierter. Das Molekül ist gerade gebaut, mit dem Kohlenstoff in der Mitte, und hat in Ruhe ebenfalls kein Dipolmoment. Streckt es sich symmetrisch, sodass beide Sauerstoffatome gleichzeitig nach außen gehen, bleibt das so, diese Schwingung ist IR-inaktiv. Biegt sich das Molekül aber, oder schwingt der Kohlenstoff zwischen den Sauerstoffatomen hin und her, verschiebt sich die Ladung, und ein Dipolmoment entsteht (Abb. 2). Die Biegeschwingung liegt bei 667 Wellenzahlen, das entspricht einer Wellenlänge von 15 Mikrometern [7]. Sie liegt damit nahe am Maximum der irdischen Wärmestrahlung, und darin liegt die besondere Bedeutung des CO_2 für das Klima [3].

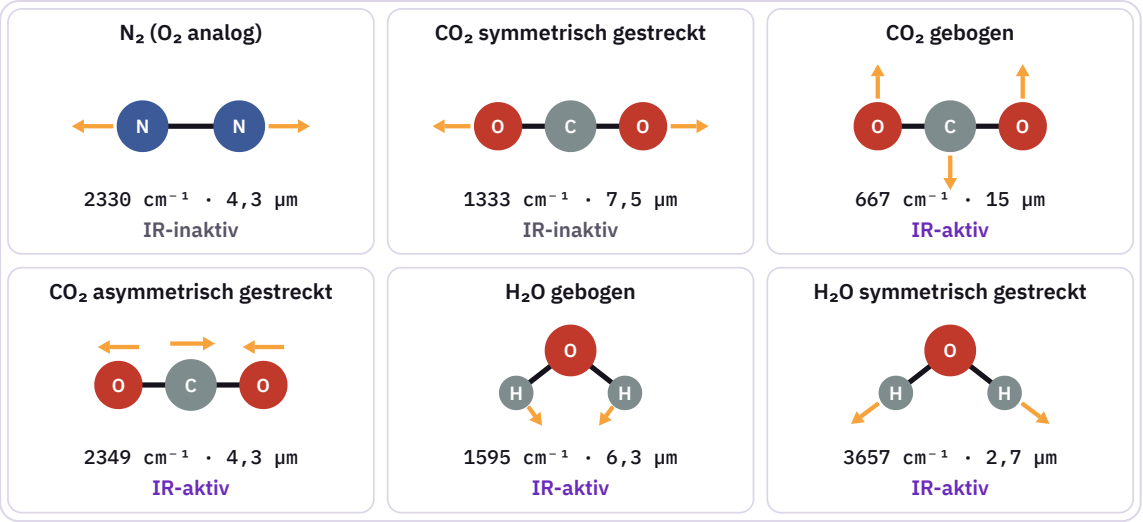

Abb. 2: Einige Schwingungen von Stickstoff, Kohlendioxid und Wasser. Nur wenn sich dabei das Dipolmoment ändert, kann Infrarotstrahlung die Schwingung anregen. Die Biegeschwingung des CO_2 ist doppelt vorhanden, in der Zeichenebene und senkrecht dazu. Für CO_2 ist bei 1333 cm^{-1} der ungestörte Wert angegeben, beobachtet wird ein Doppel bei 1285 und 1388 cm^{-1}; die Sauerstoffschwingung liegt bei rund 1556 cm^{-1}. Frequenzen nach [10],[7], eigene Darstellung.

Wasser ist gewinkelt und hat schon in Ruhe ein Dipolmoment. Alle seine drei Schwingungen sind IR-aktiv [7],[9]. Weil es ein permanentes Dipolmoment hat, kann Strahlung außerdem seine Rotation anregen, und deshalb schluckt Wasserdampf zusätzlich über weite Bereiche des fernen Infrarots [9],[3]. Wasserdampf ist deshalb das stärkste Treibhausgas. Seine Menge in der Atmosphäre hängt aber vor allem von der Temperatur ab: Je wärmer es ist, desto mehr Wasserdampf kann in der Atmosphäre bleiben, bevor er kondensiert. Er verstärkt eine Erwärmung, die das CO_2 anstößt, steuert sie aber nicht selbst [3].

Gas	Anteil an trockener Luft	Treibhausgas?	Warum
Stickstoff N_2	78,08 %	nein	zwei gleiche Atome, kein Dipolmoment
Sauerstoff O_2	20,95 %	nein	zwei gleiche Atome, kein Dipolmoment
Argon Ar	0,93 %	nein	einzelnes Atom, keine Schwingung
Kohlendioxid CO_2	rund 0,04 %	ja	Biege- und asymmetrische Streckschwingung ändern das Dipolmoment

Anteile nach [2]; Wasserdampf ist nicht aufgeführt, weil sein Anteil stark schwankt.

Was der Mensch daran ändert

Schon 1896 rechnete der Schwede Svante Arrhenius aus, wie stark sich die Erde erwärmen würde, wenn sich der CO_2-Gehalt der Luft änderte [11]. Damals war das ein Gedankenspiel. Heute ist es Messung. Vor der Industrialisierung enthielt die Luft rund 280 ppm CO_2, also 280 Moleküle auf eine Million [12]. 2025 waren es im globalen Mittel 425,6 ppm [13]. Schon 2019 lag der Wert nach Einschätzung des Weltklimarats höher als zu irgendeinem Zeitpunkt in mindestens zwei Millionen Jahren [14].

Mehr CO_2 bedeutet nicht, dass die Erde im gleichen Verhältnis wärmer wird. In der Mitte der 15-Mikrometer-Bande ist die Luft schon heute vollständig undurchsichtig. Zusätzliches CO_2 wirkt an den Rändern der Bande, wo die Absorption noch zunimmt, und es verschiebt die Höhe, aus der die Strahlung ins All entkommt, weiter nach oben, wo es kälter ist [3]. Daraus folgt eine logarithmische Abhängigkeit, die man in guter Näherung so schreibt [15]:

$$\Delta F \approx 5{,}35\ \mathrm{W/m^2} \cdot \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \tag{4}$$

ΔF ist der sogenannte Strahlungsantrieb, die zusätzliche Leistung pro Quadratmeter, also Energie pro Sekunde und Quadratmeter, die dem Klimasystem netto zugeführt wird, C die heutige und C_0 die vorindustrielle Konzentration. Jede Verdopplung bringt also denselben Zuwachs, nach dieser Näherungsformel rund 3,7 Watt pro Quadratmeter. Für den Anstieg von 280 auf 425,6 ppm ergeben sich etwa 2,2 Watt pro Quadratmeter (eigene Rechnung

nach Gleichung 4). Wie stark sich die Erde dadurch auf Dauer erwärmt, hängt von Rückkopplungen ab, vor allem durch Wasserdampf, Eis und Wolken [3]. Für eine Verdopplung des CO_2 schätzt der Weltklimarat die Erwärmung im Gleichgewicht auf 3 °C, wahrscheinlich zwischen 2,5 und 4 °C [14].

Gemessen ist die Erwärmung längst. 2025 lag die globale Mitteltemperatur 1,44 °C über dem Durchschnitt der Jahre 1850 bis 1900, und die elf Jahre von 2015 bis 2025 waren die elf wärmsten seit Beginn der Messungen [16]. Dass der Mensch die Erwärmung verursacht hat, ist laut Weltklimarat eindeutig [14]. Tyndall hatte vor über 160 Jahren in seinem Messingrohr den Mechanismus schon gesehen. Was er nicht wissen konnte, ist, warum Stickstoff und Sauerstoff die Wärme durchlassen. Dafür brauchte es die Quantenphysik.

Quellen

1. J. Tyndall: *On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction.* In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 151 (1861), S. 1–36, doi:10.1098/rstl.1861.0001.
2. NASA Goddard Space Flight Center: *Earth Fact Sheet.* nssdc.gsfc.nasa.gov, abgerufen im Oktober 2026.
3. R. T. Pierrehumbert: *Infrared radiation and planetary temperature.* In: Physics Today 64 (2011), Heft 1, S. 33–38, doi:10.1063/1.3541943.
4. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
5. M. Planck: *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum.* In: Annalen der Physik 309 (1901), S. 553–563, doi:10.1002/andp.19013090310.
6. A. Prša u. a.: *Nominal values for selected solar and planetary quantities: IAU 2015 Resolution B3.* In: The Astronomical Journal 152 (2016), 41, doi:10.3847/0004-6256/152/2/41.
7. NIST Computational Chemistry Comparison and Benchmark Database, SRD 101: *Experimentelle Schwingungsfrequenzen von CO_2 und H_2O* (nach G. Herzberg 1945 sowie K. P. Huber, G. Herzberg 1979), cccbdb.nist.gov.
8. R. W. Wood: *Note on the theory of the greenhouse.* In: Philosophical Magazine 17 (1909), S. 319–320, doi:10.1080/14786440208636602.
9. P. Atkins, J. de Paula, J. Keeler: *Atkins' Physical Chemistry.* 11. Auflage, Oxford University Press, Oxford 2018, Focus 11 (Molecular spectroscopy), Topics 11C und 11D.

10. K. P. Huber, G. Herzberg: *Constants of Diatomic Molecules.* Van Nostrand Reinhold, New York 1979, zitiert nach NIST Chemistry WebBook, SRD 69, Einträge Stickstoff und Sauerstoff, webbook.nist.gov.
11. S. Arrhenius: *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground.* In: Philosophical Magazine 41 (1896), S. 237–276, doi:10.1080/14786449608620846.
12. S. K. Gulev u. a.: *Changing State of the Climate System.* In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des IPCC. Cambridge University Press 2021, S. 287–422, doi:10.1017/9781009157896.004.
13. NOAA Global Monitoring Laboratory: *Globally averaged marine surface annual mean CO_2 data*, Datei co2_annmean_gl.txt, gml.noaa.gov, abgerufen im Oktober 2026.
14. IPCC: *Summary for Policymakers.* In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht. Cambridge University Press 2021, S. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
15. G. Myhre, E. J. Highwood, K. P. Shine, F. Stordal: *New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases.* In: Geophysical Research Letters 25 (1998), S. 2715–2718, doi:10.1029/98GL01908.
16. World Meteorological Organization: *WMO confirms 2025 was one of warmest years on record.* Pressemitteilung, 14. Januar 2026, wmo.int.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Treibhauseffekt einfach erklärt: Warum CO_2 Wärme schluckt und Stickstoff nicht.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/treibhauseffekt.html (PDF: https://quanten.de/pdf/treibhauseffekt.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Was sind Quanten? · 100 Jahre Quantenmechanik · Kernspintomographie