



Zur Rolle der Spurengase für die Strahlungsbilanz der Erde – Thermodynamische Betrachtung

Helmut Ullmann (Freital) und Martin Bülow (MLS, Dierhagen)

Veröffentlicht: 1. September 2024

Abstract

The role of trace gases in the storage of heat in the atmosphere and in the exchange of energy between the atmosphere and the outer space is discussed. The molar heat capacities of the greenhouse gases water vapour, carbon dioxide and methane are only slightly higher than those of nitrogen and oxygen. The contribution of trace gases carbon dioxide and methane to heat storage is negligible. Water vapour, with its higher concentration and conversion energies, contributes significantly to heat storage in the atmosphere. Most of the heat in the greenhouse Earth is stored in nitrogen and oxygen, the main components of the atmosphere. The greenhouse gases act as converters of infrared radiation into heat and *vice versa*. They are receivers and transmitters in the exchange of energy with the outer space. The radiation towards space is favoured by decreasing density of the atmosphere and condensation of water vapour at increasing altitude compared to the reflection towards the surface of the earth. Predictions of the development of the climate over a century by extrapolation are critically assessed.

Resümee

Die Rolle der Spurengase für die Speicherung von Wärme in der Atmosphäre und für den Austausch von Energie zwischen Atmosphäre und All wird diskutiert. Die molaren Wärmekapazitäten der Treibhausgase Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Methan sind im Vergleich zu denen von Stickstoff und Sauerstoff nur wenig höher. Der Beitrag der Spurengase Kohlenstoffdioxid und Methan zur Wärmespeicherung ist vernachlässigbar. Wasserdampf mit seiner höheren Konzentration und seinen Umwandlungsenergien trägt wesentlich zur Wärmespeicherung in der Atmosphäre bei. Die meiste Wärme im Treibhaus Erde ist im Stickstoff und Sauerstoff, den Hauptbestandteilen der Atmosphäre, gespeichert. Die Treibhausgase wirken als Wandler von infraroter (IR) Strahlung in Wärme und umgekehrt. Sie sind Empfänger und Sender beim Austausch von Energie mit dem All. Die Abstrahlung in Richtung All wird durch abnehmende Dichte der Atmosphäre und Kondensation des Wasserdampfes mit zunehmender Höhe gegenüber der Rückstrahlung zur Erdoberfläche begünstigt. Voraussagen zur Entwicklung des Klimas über ein Jahrhundert durch Extrapolation werden kritisch bewertet.

Keywords/Schlüsselwörter

Greenhouse gases, carbon dioxide, water vapour, molar heat capacity, radiation balance, heat reflection, energy of translation, energy of swinging, IR absorption/desorption, greenhouse gases as heat-radiation transmitters

Treibhausgase, Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, molekulare Wärmekapazität, Strahlungsbilanz, Wärmerückstrahlung, Translationsenergie, Schwingungsenergie, IR-Absorption/Desorption, Treibhausgase als Wärme-Strahlungs-Wandler

1 Ausgangssituation

Mit der Lufthülle, den Oberflächen der Kontinente, den Meeresströmungen und dem Wasserkreislauf bildet die Erdoberfläche eine Art Thermostat, der – wie in einem Treibhaus – ein für das Leben günstiges Klima bietet. Eine Temperaturdifferenz von etwa $+15^{\circ}\text{C}$ nahe der Erdoberfläche und von -18°C , von Satelliten gemessen, wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Der Treibhauseffekt und die Ursachen seiner Schwankungen sind Gegenstand der Klimaforschung. Wetter und Klima bilden auf Grund zahlreicher bekannter und weiterer unbekannter, sich gegenseitig beeinflussender Faktoren ein chaotisches System, dessen Entwicklung nicht berechenbar ist. Klimavoraussagen über ein Jahrhundert beruhen bisher weitgehend auf empirischen Zusammenhängen aus Beobachtungen, die wiederum an zu kurzen Beobachtungszeiträumen krankten.

Von der elektromagnetischen Strahlung der Sonne mit ultraviolettem (UV), sichtbarem und infrarotem (IR) Anteil gelangt etwa die Hälfte bis zur Erdoberfläche. Dort wird ein Teil von erwärmten Flächen durch Wärmeleitung und Konvektion auf die Atmosphäre übertragen. Ein anderer Teil wird in IR-Strahlung gewandelt und als Erdabstrahlung im IR-Bereich zurückgestrahlt (Leitgeb 1990, S. 196). Die IR-Abstrahlung von der Erde wird in der Atmosphäre von Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid, den sogenannten Treibhaus-(TH) Gasen absorbiert und nach allen Seiten ausgestrahlt. Dieser letzte Prozess wird bisher infolge des Anteils der Rückstrahlung in Richtung Erdoberfläche als der Auslöser eines Wärmestaus in der Atmosphäre angenommen (Smith et al. 2021, S. 16).

1.1 Die CO_2 -T-Korrelation und ihre Unsicherheiten

Nach indirekten Bestimmungsmethoden betragen die globalen Durchschnittstemperaturen T über Zeiträume von Jahrtausenden bis über 20°C und die Kohlenstoffdioxid-Gehalte einige 1000 Vppm. Perioden mit besonders hohen CO_2 -Gehalten und Temperaturen waren Zeiten intensiver Entwicklung neuer Arten von Leben (Parmentola 2021, Rae et al. 2021). Gegenwärtig befinden wir uns eher am unteren Ende der globalen Temperatur- und CO_2 -Skalen; in diesem Bereich hat sich der Mensch entwickelt.

Die gegenwärtige Klimaforschung orientiert sich stark an einem empirischen Zusammenhang zwischen Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre und globaler Durchschnittstemperatur. Die in den letzten Jahrzehnten steigende globale Durchschnittstemperatur wird der gewachsenen Konzentration von CO_2 in der Erdatmosphäre angelastet. Sie erhöhte sich seit der Mitte des 19. Jahrhunderts von 280 Vppm auf heutige 420 Vppm. Im gleichen Zeitraum stieg die globale Temperatur an der Erdoberfläche um ca. 1,2 Grad (WMO 2023, S. 223). Weil dieser Zeitraum mit der industriellen Entwicklung der Menschheit auf Basis der fossilen Energierohstoffe zusammenfällt, wird der Temperaturanstieg dem vom Menschen freigesetzten CO_2 zugeschrieben (IPCC 2023). Der Beginn dieses Zeitraums fällt allerdings auch mit dem Ende der Kleinen Eiszeit zusammen. Die CO_2 -T-Korrelation des vorindustriellen Zeitalters wurde bisher stets von den Betrachtungen ausgeklammert.

Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre wird seit 1958 auf dem Berg Mauna Loa (Hawaii) gemessen, weitab von menschlichen CO_2 -Emissionen, an einem aktiven Vulkan gelegen. Dadurch verursachte Spitzenwerte werden korrigiert, sodass sie mit Messungen anderer CO_2 -Observatorien übereinstimmen. Die CO_2 -Konzentrationen zeigen regionale Abweichungen bis zu ± 25 ppm (Vahrenholt/Lüning 2020, S. 102). Der Anstieg der weltweiten CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre ist zu 96 bis 97% natürlichen Ursprungs. Nur 3 bis 4% lassen sich der Produktion und Energieerzeugung der Menschheit zurechnen (Seifritz 1991, S. 15). Offen bleibt die Frage: Ist der steigende CO_2 -Gehalt der Atmosphäre die Ursache der Temperaturerhöhung, oder veranlasst eine erhöhte Tempera-

tur die Freisetzung von CO₂ aus dem Meerwasser, dessen CO₂-Gehalt weit größer geschätzt wird als der in der Atmosphäre? Messungen der globalen oberflächennahen Durchschnittstemperatur liegen seit 1880 vor. Sie wird mit +15°C auf ein Zehntel-Grad genau angegeben. An der Genauigkeitsangabe gibt es berechtigte Zweifel. So hat sich im Laufe der Zeit die Zahl der Messstationen erhöht. Eine internationale Studie (Soon et al. 2023) zu Messungen auf der Nordhalbkugel der Erde zeigte, dass die Zahl stadtnaher Messstationen zehnmal größer war als die in ländlichen Gebieten. Das ergibt erhöhte Werte für die Durchschnittstemperatur. Die Temperaturdifferenzen in der Atmosphäre reichen im Jahresmittel von +26°C am Äquator bis zu –35°C an den Polen, zeitweise auch kälter. Im „Treibhaus“ herrschen zur selben Jahreszeit regional an verschiedenen Orten und Breitengraden, zu verschiedenen Jahres- und Tageszeiten große Temperaturunterschiede. Meeres- und Luftströmungen können in kurzen Zeiträumen große Temperaturänderungen verursachen. Der vertikale T-Abfall innerhalb der Troposphäre erreicht bis zu ihrem oberen Ende (ca. 8–16 km Höhe) einen Wert von etwa –50°C.

Ein Ausgleich zwischen Sonneneinstrahlung und Erdabstrahlung über Zeiträume von einem oder mehreren Jahren ist unter diesen Bedingungen nicht zu erwarten. Mit temporärem Klimawandel über größere Zeiträume in verschiedenen Regionen, auch solchen mit erheblichen Stressfaktoren für die Ökosphäre, muss wohl gerechnet werden.

1.2 Treibhauspotential und Strahlungsantrieb der Spurengase

Der Wärmestau im Treibhaus Erde wird den TH-Gasen H₂O, CO₂ und weiteren Spurengasen (CH₄, O₃, N₂O u.a.) zugeschrieben, die auf Grund ihrer molekularen Struktur IR-Strahlung in Form von Schwingungen absorbieren. Die größte Wirkung, zwischen 36 und 70% je nach Klimazonen und Lufttemperaturen, geht vom Wasserdampf aus, dessen Konzentration mit 3 bis 6% unter den TH-Gasen am höchsten ist (Rahmstorf 2007). Weil die Freisetzung von Wasserdampf von menschlicher Aktivität unabhängig ist, wird sein Beitrag zum TH-Effekt üblicherweise nicht weiter bewertet.

Die Klimawirksamkeit der übrigen TH-Gase wird nach zwei Größen gewichtet:

- (1.) Das Treibhauspotential, *Global Warming Potential* (GWP), eines Gases ist die Maßzahl für den Beitrag zur Erwärmung der Erdatmosphäre über einen Zeitabschnitt in der Zukunft, in der Regel über 100 Jahre (GWP100) in Relation zur Wirkung der gleichen Menge CO₂ mit GWP=1. Der Anteil an wissenschaftlichen Stoffdaten im GWP-Wert ist gering. Er beruht auf der Auswertung der IR-Absorptionsspektren. Der Wasserdampf, der den Großteil der IR-Strahlung absorbiert, ist nur in geringen Spektralbereichen (Wasserdampffenster) IR-durchlässig. Die TH-Spurengase werden nun nach ihren Spektralanteilen im Wasserstofffenster bewertet. Die Spektralanalyse liefert lediglich eine Aussage über den Mechanismus der Wandlung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Wärme, sagt jedoch nichts über Verweilzeiten von Wärme im Molekül aus.

Wesentlich umfangreicher ist der Anteil auf Erfahrung basierendes Wissens im GWP-Wert, soweit man Entwicklungen in der Zukunft als „Erfahrung“ bezeichnen darf: So etwa, in welcher Menge einzelne Stoffe in Zukunft produziert, in die Umwelt emittiert und durch Umweltschutz reduziert werden, auch welche Verweilzeiten sie infolge chemischen Abbaus in der Atmosphäre haben. Die großen Zahlenwerte der GWP-Werte, wie z.B. für Methan 28, Distickstoffoxid 298 und Schwefelhexafluorid 22 800 (Smith et al. 2021), resultieren aus chemischer Beständigkeit der Verbindungen und ihrer Anreicherung in der Atmosphäre. Die GWP-Werte werden periodisch aktualisiert (*United Nations FCCC* 2014).

(2.) Der Strahlungsantrieb, *Radiation Forcing* (RF in W/m^2), gibt an, wie die Konzentrationszunahme eines Stoffes, von einer vorhandenen Hintergrundkonzentration ausgehend, den Wärmeeintrag erhöht. Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die durch menschliche Aktivitäten veränderte Wirkung der einfallenden Sonnenstrahlung auf die Erwärmung der Erdatmosphäre. Gase verstärken die Wirkung, Aerosole schwächen sie ab. Vom IPCC (IPCC 2019) wurde z.B. im Jahr 2019 der summarische Strahlungsantrieb im Vergleich zum Referenzjahr 1850 angegeben: Nach Abzug kühlender Effekte durch Aerosole beträgt er $2,72 \text{ W}/\text{m}^2$. Die Beiträge der einzelnen Treibhausgase betragen in W/m^2 : CO_2 2,16, CH_4 0,54, O_3 0,47, HCKW 0,41, N_2O 0,21. Die RF-Werte sind empirisch ermittelte Vergleichswerte, die periodisch neu bewertet werden.

Die nach verschiedenen Szenarien über ein Jahrhundert berechneten Klimaprognosen beruhen auf der Basis dieser zwei komplexen, weitgehend empirischen Parameter unter Einbeziehung solarer und planetarer Einflussgrößen.

2 Aufgabenstellung

Die Strahlungsbilanz zwischen Sonne und Erde und damit das Klima werden durch Energiespeicherung in Form von Wärme und durch Energieabgabe in Form von IR-Strahlung bestimmt. Dazwischen liegt die Transformation von IR-Strahlung in Bewegungsenergie der Gasmoleküle (Wärme) und umgekehrt. Hier soll die Rolle drei- und mehratomiger Spurengase für die Energiebilanz zwischen Sonneneinstrahlung und Erdabstrahlung anhand der molaren Wärmekapazitäten bewertet werden. Der Wärmeaustausch wird als dynamischer reversibler Prozess in der Strahlungsbilanz diskutiert.

2.1 Energieströme und Energiespeicher

Von der Solarkonstante, $1361 \text{ kW}/\text{m}^2$ im All in Erdnähe, verbleiben im Mittel von Tag und Nacht $343 \text{ W}/\text{m}^2$ Energiestromdichte an der Erdoberfläche (IPCC 2014, 2019). Die tägliche Sonneneinstrahlung auf die gesamte Erde beträgt $1,06 \times 10^{22}$ Joule. Das sind $0,8\%$ der in der Atmosphäre gespeicherten Energie von $1,26 \times 10^{24}$ Joule, berechnet aus der Masse der Luft in der Atmosphäre und ihrer spezifischen Wärmekapazität. Mehr Wärme kann die Atmosphäre nicht aufnehmen. Die Energieproduktion der Menschheit betrug im Jahr 2022 ca. 6×10^{20} Joule (Statista 2023), d.h. $1,6 \times 10^{18}$ Joule pro Tag, also $1,5 \times 10^{-4} \%$ der täglichen Sonneneinstrahlung (alle Angaben sind Mittelwerte). Der sehr ungleich verteilte Wärmefluss aus dem Erdmantel durch Zerfall radioaktiver Isotope sowie chemische Reaktionswärmen beträgt im Durchschnitt $87 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Pollack et al. 1993) und liegt damit in der Größenordnung menschlicher Energieproduktion.

2.2 Molare Wärmekapazitäten der Gase in der Atmosphäre

Betrachten wir zunächst die Speichermöglichkeiten der Treibhausgase. Die molare Wärmekapazität C_p (Tabellensammlung 2023) gibt an, welche Menge an Wärme von einem Mol eines Gases maximal aufgenommen werden kann.

Die C_p -Werte einatomiger Gase (siehe Tab. 1a) und zweiatomiger Gase (siehe Tab. 1b) sind unabhängig vom Atom- bzw. Molekulargewicht gleich groß, wie bereits in Ullmann und Bülow (2023) sowie Ullmann und Bülow (2024) mitgeteilt worden ist. Einatomige Gase haben für die Absorption von Energie nur Freiheitsgrade der Translation. Im Fall der zweiatomigen Gase O_2 und N_2 mit Doppel- bzw. Dreifachbindungen kommen Freiheitsgrade der Rotation hinzu, wodurch sich die Werte der molaren Wärmekapazitäten um ca. 40% im Vergleich zu jenen der einatomigen Gase erhöhen.

Die Wärmekapazitäten dreiatomiger Gase, der sogenannten TH-Gase, sind um weitere ca. 20 % größer als die der zweiatomigen Gase. Anhand der Beispiele Ethan und Propan ist zu erkennen, dass die Molwärmen mit wachsender Zahl von Bindungen weiter zunehmen. Über die Aktivierung von Valenz- und Deformationsschwingungen der Moleküle (Watts 2014, Czeslik et al. 2010) wird weitere Energie aufgenommen. Nach den Werten der Wärmekapazitäten ist allerdings nicht zu unterscheiden, wie viele der Freiheitsgrade gleichzeitig angeregt sind. Multipliziert mit den geringen Konzentrationen der Spurengase, in Summe weniger als 0,1 Vol.-%, können diese nicht merklich zur Wärmespeicherung in der Atmosphäre beitragen. Nur H₂O in Form von Dampf mit Konzentrationen im Prozentbereich der Atmosphäre und auch auf Grund der Wärmen seiner Phasenumwandlungen leistet einen wesentlichen Beitrag zur Wärmespeicherung.

Tab. 1 Molare Wärmekapazitäten der Gase

a) Einatomige Gase		
Element	Atomgewicht	C _p (J/mol K)
Helium	4	20,76
Neon	20	20,80
Argon	40	20,96
Xenon	131	20,96
b) Zweiatomige Gase		
Verbindung	Molgewicht	C _p (J/mol K)
Wasserstoff H ₂	2	28,72
Stickstoff N ₂	28	29,1
Sauerstoff O ₂	32	29,2
Stickstoffmonoxid NO	30	30,27
Kohlenstoffmonoxid CO	28	29,43
0,78 N ₂ , 0,21 O ₂ , 0,01 Ar	28,96	28,96
c) Drei- und mehratomige Gase		
Verbindung	Molgewicht	C _p (J/mol K)
Wasserdampf H ₂ O	18	33,4
Kohlenstoffdioxid CO ₂	44	37,2
Methan CH ₄	16	35,4
Ammoniak NH ₃	17	35,02
Ethan C ₂ H ₆	30	50,01
Propan C ₃ H ₈	44	73,5

Die Werte (*Tabellensammlung* 2023) wurden bei verschiedenen Temperaturen (0°C, 25°C oder ohne Temperaturangabe) und bei Normaldruck gemessen. Die C_p-Werte steigen mit der Temperatur leicht an; das beeinflusst jedoch nicht die Abstufungen zwischen den Fällen a, b und c.

Die Hauptmenge der Wärme in der Atmosphäre ist in Form kinetischer Energie E_{trans} der Bewegung sämtlicher Gasmoleküle, also überwiegend N_2 und O_2 , in der Atmosphäre gespeichert. Der TH-Effekt von 33 Grad verteilt sich also auf sämtliche Gase der Atmosphäre entsprechend ihren Konzentrationsanteilen.

2.3 Wärmeaustausch mit dem All

Wärme in der Atmosphäre ist kinetische Energie, E_{kin} , der Gasmoleküle. Sie gelangt durch Absorption von IR-Strahlung in TH-Gas-Moleküle, wo sie in Rotations (E_{rot})- und Schwingungsenergie (E_{swing}) gewandelt und durch Stoßmechanismen als Translationsenergie (E_{trans}) sämtlicher Moleküle in der gesamten Atmosphäre verteilt wird.

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{trans}} + E_{\text{rot}} + E_{\text{swing}} \quad [1]$$

In einem gefüllten Gasraum stehen alle Moleküle durch Stöße ständig miteinander in Kontakt, wodurch die Energie in Form einer Gaußschen Glockenkurve verteilt wird. Die thermodynamischen Gesetze erlauben keine permanenten Hotspots unter den Molekülen. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik legt die Richtung des Wärmeflusses von den wärmeren zu den kälteren Molekülen fest.

Die an Gasmoleküle gebundene Energie kann infolge der Schwerkraft, der die Moleküle unterliegen, nicht in das All abgegeben werden. Das kann nur in Form von elektromagnetischer Strahlung (IR-Photonen) erfolgen. Die TH-Gase funktionieren als Wandler:

$$E_{\text{trans}} \leftrightarrow E_{\text{swing}} \leftrightarrow E_{\text{phot}} \quad [2]$$

Die durch absorbierte IR-Photonen angeregte Schwingungsenergie der TH-Gas-Moleküle wird nicht nur als IR-Photon wieder abgegeben, sondern zum Teil über Stöße auch an die Hauptbestandteile der Atmosphäre weitergeleitet. Umgekehrt kann Wärmeenergie der Atmosphäre durch Stöße auch in Schwingungen der TH-Gas-Moleküle und schließlich in IR-Photonen gewandelt werden. Anders hätte die im Stickstoff und Sauerstoff der Atmosphäre gespeicherte Wärme keine Möglichkeit, in das All abzufließen.

Bei der Diskussion der IR-Rückstrahlung zur Erde als Ursache des Wärmestaus wird bisher kein Unterschied in den Strahlungsintensitäten in allen Richtungen gesehen. Mit steigender Höhe nimmt jedoch die Dichte der Atmosphäre nach der barometrischen Höhenformel und damit auch die Anzahl IR-absorbierender CO_2 -Moleküle ab: bis 5 km Höhe etwa auf die Hälfte, bis 10 km auf ein Viertel. Dadurch wird eine „mittlere freie Weglänge“ der IR-Quanten in Richtung All stets größer sein als in Richtung Erdoberfläche. Dieses Verhältnis wird auch bei Verdoppelung der CO_2 -Konzentration erhalten bleiben. Mit zunehmender Höhe und sinkender Temperatur entfällt durch Kondensation auch der Wasserdampf als IR-Absorber. Der Ausgang für die IR-Strahlung in Richtung All bleibt also für die Erdabstrahlung geöffnet.

In den bisherigen Wertungen der TH-Gase werden diese vor allem als Speicher und Rückhalter von Wärme betrachtet. Ihre Funktion als Wandler und Sender von Energie ins All bleibt unerwähnt. Wie der ständige Austausch von Energie nach Gleichung [2] im Einzelnen vor sich geht, wurde bisher nicht untersucht: Wie lang ist eine zwecks Anschaulichkeit formulierbare „mittlere freie Weglänge“ von IR-Photonen bis zum Energieaustausch durch Stoß? Wie ist die Verweildauer der IR-Quanten in den Molekülen bis zur Abgabe der absorbierten Energie als IR-Photon oder als kinetische Energie an andere Moleküle? Bei hoher Dichte der Moleküle wird der Austausch als Translationsenergie dominieren, in größerer Höhe, bei geringer Dichte, wird die Energieabgabe in Form von IR-Photonen dominieren. Ein Überwiegen der Rückstrahlung zur Erde und damit eine Störung des Strahlungsgleichgewichts ist nicht belegbar.

3 Schlussfolgerungen

Die Hauptbestandteile der Atmosphäre, Stickstoff und Sauerstoff, tragen am meisten zur Speicherung von Wärme im Treibhaus Erde bei. Die molaren Wärmekapazitäten der dreiatomigen TH-Gase Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid, wie auch von Methan, sind nur wenig höher im Vergleich zu den Hauptbestandteilen der Atmosphäre. Der Beitrag von Kohlenstoffdioxid und Methan zur Wärmespeicherung ist auf Grund ihrer geringen Konzentration vernachlässigbar. Nur Wasserdampf trägt dank seiner höheren Konzentration und seinen Umwandlungsenergien wesentlich zur Wärmespeicherung in der Atmosphäre bei.

Die TH-Gase wirken mit den Schwingungsfreiheitsgraden ihrer Moleküle als Wandler von IR-Strahlung in Wärme und umgekehrt. Somit wirken sie als Empfänger und Sender beim Austausch von Energie mit dem All. Die Abstrahlung in Richtung All ist gegenüber der Rückstrahlung zur Erdoberfläche durch die abnehmende Dichte der Atmosphäre und die Kondensation des Wasserdampfes mit in der Höhe sinkender Temperatur begünstigt.

Quantitative Kenntnisse zur Wandlung von IR-Photonen in Wärme und umgekehrt, wie der Sättigungsgrad der Molekülschwingungen, die Verweildauer der Energie im Molekül, die Wandlung von Translations- in Schwingungsenergie und die Freisetzung von IR-Photonen durch Stöße, sind noch nicht untersucht worden.

Wetter und Klima sind auf Grund zahlreicher sich gegenseitig beeinflussender Faktoren chaotische Prozesse, die man nicht vorausberechnen kann. Wenn nach Extrapolation weniger Daten wie der Temperatur-CO₂-Abhängigkeit und den empirischen Werten für sowohl Treibhauspotential und Strahlungsantrieb über hundert Jahre Klimakatastrophen und sogenannte Kippunkte vorausgesagt werden, ist die Tür für die Entstehung von Ideologien geöffnet, die zu gewaltigen Transformationen des bisherigen menschlichen Lebens führen können.

Bibliographie

- Czeslik, Claus / Seemann, Heiko / Winter, Roland (2010): *Basiswissen Physikalische Chemie*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, GWV Fachverlage.
- Leitgeb, Norbert (1990): *Strahlen, Wellen, Felder*. Stuttgart, New York: Thieme; München: Deutscher Taschenbuchverlag.
- IPCC (2014): *AR5 Synthesis Report. Climate Change 2014*.
- IPCC (2019): IPCC AR6 WG1, Kapitel 7 Abschnitt 7.4.2.2., 29/04/2019.
- IPCC (2023): *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC [Core Writing Team: Hoesung Lee and José Romero (Eds.)]. Geneva, pp. 1–34; doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.00.
- Parmentola, John (2021): <https://johnparmentola.com/the-coming-of-a-climate-catastrophe/>
- Pollack, Henry N. / Hurter, Suzanne J. / Johnson, Jeffrey R. (1993): „Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set.“ *Reviews of Geophysics* (31/3), 267-280.
- Rae, James W. B. / Zhang, Yi Ge / Liu, Xiaoqing / Foster, Gavin L. / Stoll, Heather M. / Whiteford, Ross D. M. (2021): „Atmospheric CO₂ over the past 66 million years from marine archives.“ *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* (49), 609-641; doi:10.1146/annurev-earth-082420-063026.
- Rahmstorf, Stefan (2007): „Klimawandel – einige Fakten.“ *Aus Politik und Zeitgeschichte APuZ* (47/2007)
- Seifritz, Walter (1991): *Der Treibhauseffekt. Technische Maßnahmen zur CO₂-Entsorgung*. München, Wien: Carl Hanser.

- Smith, Chris / Nicholls, Zebedee R. J. / Armour, Kyle / Collins, William / Forster, Piers / Meinshausen, Malte / Palmer, Matthew D. / Watanabe, Masahiro (2021): „The Earth’s energy budget, climate feedbacks and climate sensitivity.“ Supplementary Material, Table 7.SM.7. In: IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, NY, USA.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf
- Soon, Willie / Connolly, Ronan / Connolly, Michael / Akasofu, Syun-Ichi / Baliunas, Sallie / Berglund, Johan / Bianchini, Antonio / Briggs, William M. / Butler, C. J. / Cionco, Rodolfo Gustavo / Crok, Marcel / Elias, Ana G. / Fedorov, Valery M. / Gervais, François / Harde, Hermann / Henry, Gregory W. / Hoyt, Douglas V. / Humlum, Ole / Legates, David R. / Lupo, Anthony R. / Maruyama, Shigenori / Moore, Patrick / Ogurtsov, Maxim / ÓhAiseadha, Coilín / Oliveira, Marcos J. / Park, Seok-Soon / Qiu, Shican / Quinn, Gerré / Scafetta, Nicola / Solheim, Jan-Erik / Steele, Jim / Szarka, László / Tanaka, Hiroshi L. / Taylor, Mitchell K. / Vahrenholt, Fritz / Velasco Herrera, Víctor M. / Zhang, Weijia (2023): „The detection and attribution of northern hemisphere land surface warming (1850–2018) in terms of human and natural factors: Challenges of inadequate data.“ *Climate* (11/9), 179; <https://doi.org/10.3390/cli11090179>.
- Statista (2023): Energie und Umwelt.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/258294/umfrage/anteil-der-wichtigsten-energiequellen-am-weltweiten-primarenergieverbrauch/>
- Tabellensammlung (2023): Tabellensammlung Chemie/spezifische Wärmekapazitäten/ Temperaturabhängigkeit von Cp bei Gasen/de.wikibooks.org.
- Ullmann, Helmut / Bülow Martin (2023): „Zur Rolle des Kohlenstoffdioxids für das Klima.“ *Leibniz Online* (50), 1-7. doi:10.53201/LEIBNIZ ONLINE 50.
- Ullmann, Helmut / Bülow Martin (2024): „The role of greenhouse gases in radiative equilibrium – Thermodynamic evaluation.“ *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, <https://doi.org/10.1515/zpch-2023-0384>
- United Nations FCCC (2014): Framework Convention on Climate Change. 31. Januar 2014.
- Vahrenholt, Fritz / Lüning, Sebastian (2020): *Unerwünschte Wahrheiten. Was Sie über den Klimawandel wissen sollten*. München: LMV.
- Watts, Anthony (2014): „Methane: The Irrelevant Greenhouse Gas.“ Home/2014/April/11. Methane: The Irrelevant Greenhouse Gas. Watts Up With That?
- WMO (2023): State of the Climate (2023): Dec. 2023.

E-Mail-Adressen der Verfasser: helmut.u@gmx.net, mrtbnblw@gmail.com