

# Zur Physikalischen Chemie des Treibhaus-Effekts

## - ein Beitrag zur Diskussion

Helmut Ullmann<sup>1</sup>\* und Martin Bülow<sup>2</sup>

### Kurzfassung

Wesentliche Aussagen der Klimaforschung zum anthropogenen Treibhauseffekt werden kritisch überprüft. Dies betrifft speziell die Korrelation zwischen zunehmender Konzentration von Kohlenstoffdioxid, CO<sub>2</sub>, in der Erdatmosphäre und globaler Temperatur. Die Austauschmengen von CO<sub>2</sub> zwischen Atmosphäre und Biosphäre sowie den Ozeanen werden betrachtet. Die Energiebilanzen von Sonneneinstrahlung, Wärme in der Atmosphäre und menschlicher Energieproduktion werden dabei bewertet. Die offizielle Debatte betrifft auch Verbindungen zwischen der Geschichte des Klimas und der modernen Klimaforschung wie auch Auswirkungen des Klimaschutzes auf die Umwelt.

**Schlüsselwörter:** Treibhausgase, Wärmespeicher, IR-Transmitter und -Sender, Strahlungsausgleich, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen, Klimaschutz und Umweltschutz

**Keywords:** Greenhouse gases, heat capacity, IR-transmitters and -emitters, radiation balance, energy and CO<sub>2</sub> balances, climate and environment protection

### Einleitung

Die Voraussagen der Klimaforschung zum Klimawandel beruhen auf der beobachteten Korrelation steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Erdatmosphäre mit gleichzeitigem Anstieg einer „globalen“ Temperatur. Diese Beobachtung fällt mit dem Beginn der Nutzung fossiler Energieträger zusammen. Daraus schließt die Klimaforschung, die steigende Emission von CO<sub>2</sub> aus der Industriegesellschaft wäre für den Temperaturanstieg in der Erdatmosphäre verantwortlich. Durch Extrapolation dieses Zusammenhangs bis zum Ende des laufenden Jahrhunderts wäre ein lebensbedrohlicher Klimawandel voraussehbar. Die moderne Klimaforschung (Ramstorf 2007) hat großen Einfluss auf politische Entscheidungen, die in Wirtschaft und Leben eingreifen. Das sollte zu einer besonders kritischen Analyse verpflichten. In unseren Arbeiten (Ullmann/ Bülow 2024, Ullmann/ Bülow 2025, Ullmann/ Bülow 2025a) werden Argumente diskutiert, die gegen einen vom Menschen verursachten Klimawandel sprechen. Diese Argumente sollen hier durch weitere Überlegungen vertieft werden, um die begonnene Diskussion (Quapp 2025) fortzusetzen.

## 1. Physikalisch-chemische Eigenschaften des Kohlenstoffdioxids

**Wärmespeicherung:** Wärme ist die in der Atmosphäre gespeicherte Bewegungsenergie  $E_{kin}$  der Gasmoleküle. Jedes Molekül speichert die Wärme entsprechend seinen zur Energieaufnahme bereiten Freiheitsgraden der Translations-, Rotations- und Schwingungsenergie:

$$E_{kin} = E_{trans} + E_{rot} + E_{swing}. \quad (1)$$

Die Werte der spezifischen molaren Wärmekapazitäten der Gase in der Atmosphäre ((Ullmann/ Bülow 2023, (Ullmann und Bülow 2024) bestätigen die folgenden Feststellungen: Die

---

<sup>1</sup> [helmut.u@gmx.net](mailto:helmut.u@gmx.net), \* Corresponding author

<sup>2</sup> [mrtblw@gmail.com](mailto:mrtblw@gmail.com)

dreiatomigen Gase, CO<sub>2</sub> sowie weitere Treibhausgase, TH-Gase, im Spurenbereich, haben zwar eine um ca. 20% größere molare Wärmekapazität als die zweiatomigen Hauptbestandteile der Atmosphäre, Stickstoff und Sauerstoff, sie leisten jedoch auf Grund ihrer geringen Konzentration keinen nennenswerten Beitrag zur Wärmespeicherung in der Atmosphäre. Wasserdampf im Konzentrationsbereich von einigen Prozent zusammen mit seinen Phasenumwandlungen ist Hauptträger der Wärmespeicherung in der Atmosphäre. Durch Wolkenbildung, Ausregnen oder Schneefall wird die Konzentration des gasförmigen Wassers in der Atmosphäre reduziert, hinterlässt aber seine Umwandlungswärme in der Atmosphäre. Damit leistet der Wasserkreislauf unzweifelhaft den weitaus größten Beitrag zu Wetter und Klima.

**Treibhausgase als Energiewandler:** Von den Gasen der Atmosphäre besitzen nur die TH-Gase Bindungsstärken, die in Resonanz mit der Energie der IR-Photonen treten und diese als Schwingungsenergie aufnehmen können. Das betrifft die Sonneneinstrahlung ebenso wie die IR-Rückstrahlung von der Erdoberfläche. Die Schwingungsenergie kann als Translationsenergie an alle Gasmoleküle der Atmosphäre übertragen oder wieder als IR-Photon nach allen Richtungen abgestrahlt werden:

$$E_{trans} \leftrightarrow E_{swing} \leftrightarrow E_{phot}. \quad (2)$$

In der Klimaforschung wird die Rolle der TH-Gase als Wandler für den Eintrag von Sonnenstrahlung als Wärme in die Atmosphäre sowie für den Rückhalt der IR-Rückstrahlung der Erdoberfläche betont. Die TH-Gase sind ebenso unersetzlich als Transmitter von an die Gasmoleküle gebundener Wärme der Erdatmosphäre in IR-Strahlung zur Bilanzierung im Strahlungsausgleich mit dem All (Ullmann/ Bülow 2024a).

Eine Streitfrage ist dabei, ob sich Ein- und Austrag von Energie die Waage halten und welche Rolle die Konzentrationszunahme der TH-Gase für diesen Transfer spielt. Ein Argument gegen die Annahme, die Erdrückstrahlung könne nicht den Ausgang zum All erreichen, ist die Abnahme der Konzentration des CO<sub>2</sub> mit zunehmender Höhe nach der Barometrischen Höhenformel. Zusätzlich sinkt die Konzentration des Wasserdampfs durch Kondensation. Dadurch nimmt die „mittlere freie Weglänge“ der IR-Photonen mit der Höhe zu.

**Absorption elektromagnetischer Strahlung in Gasen:** Für die Absorption von elektromagnetischer Strahlung durch absorbierende Gasmoleküle wird die Gültigkeit eines logarithmischen Zusammenhangs analog dem Lambert-Beer-Gesetz angenommen. Die Intensität der Einstrahlung  $I_0$  zur Intensität der transmittierten Strahlung  $I_1$  sinkt annähernd logarithmisch mit zunehmender Schichtdicke  $d$  oder mit steigender Konzentration  $c$ . Der absorbierte Teil der Intensität ist ein Maß für die generierte Wärme und damit auch für den Temperaturanstieg im Gasraum:

$$\log(I_0/I_1) = \varepsilon \cdot c \cdot d. \quad (3)$$

$\varepsilon$  = Extinktionskoeffizient,  $c$  = molare Konzentration,  $d$  = Schichtdicke.

Gleichung (3) gilt für einfallende Sonnenstrahlung wie für Erdrückstrahlung. Wellenlängen mit hoher Absorption - großer Wert von  $I_0/I_1$  - werden bereits durch eine geringere Schichtdicke weitgehend absorbiert, tragen also viel Wärme ein. Wellenlängen geringer Absorption - kleiner Wert von  $I_0/I_1$  - bedeuten einen geringeren Wärmeeintrag. Sie durchdringen eine größere Schicht. Mit steigender Konzentration erhöht sich der Energieeintrag, jedoch nur im logarithmischen Maß. Gleiches gilt dann auch für den Temperaturanstieg. Nach der Barometri-

schen Höhenformel steigt mit zunehmender Höhe die Durchlässigkeit der Atmosphäre für das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Strahlung.

## 2. Bilanzen von CO<sub>2</sub> und Energie an der Erdoberfläche

**CO<sub>2</sub>-Emissionen und Austauschprozesse:** CO<sub>2</sub> wird zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und lebender wie absterbender Biosphäre ausgetauscht. Dazu kommen anthropogene Emissionen. Die umfangreichen Untersuchungen und Modelle von Friedlingstein (Friedlingstein et al. 2019) zeigen die Schwierigkeiten, die Beiträge der einzelnen Quellen und Senken zu quantifizieren. Sämtliche Mengen variieren, wie die Ernteerträge, von Jahr zu Jahr. Tabelle 1 enthält Angaben gemäß (Resplandy et al. 2018) für das Jahr 2021 (IPCC 2021).

**Tabelle 1.** Vergleich der Austauschmengen von CO<sub>2</sub>  
(1 Tonne C entspricht 3.67 Tonnen CO<sub>2</sub>).

| Emission und Austausch von CO <sub>2</sub> | in t C/a                 |
|--|--------------------------|
| Atmosphäre → Biosphäre                     | -142 x 10 <sup>9</sup>   |
| Biosphäre → Atmosphäre                     | 137 x 10 <sup>9</sup>    |
| Atmosphäre → Ozeane                        | - 80 x 10 <sup>9</sup>   |
| Ozeane → Atmosphäre                        | 78 x 10 <sup>9</sup>     |
| Anthropogene Emissionen                    | 11 x 10 <sup>9</sup>     |
| Emissionen aus Vulkanen                    | >0,1 x 10 <sup>9</sup>   |
| CO <sub>2</sub> -Inventare der Sphären     | in t C                   |
| Hydrosphäre (Resplandy et al. (2018))      | 37 000 x 10 <sup>9</sup> |
| Atmosphäre, (Ullmann/ Bülow (2025)**)      | < 120 x 10 <sup>9</sup>  |

\*\* at 480 Vppm

Die Ozeane mit ihrem riesigen Inventar an CO<sub>2</sub> spielen eine wichtige Rolle für den Austausch, sind doch ca. 70% der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt. Für den Ausgleich zwischen dem Partialdruck des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre und der Sättigungslöslichkeit in der Oberflächenschicht des Meeres spielen Vermischungsprozesse der Luft mit der bewegten Wasseroberfläche eine Rolle. Der Austausch des CO<sub>2</sub> mit tieferen Wasserschichten bedarf langer Zeiten. Der Transport des CO<sub>2</sub> in den Ozeanen ist mit dem Wärmetransport gekoppelt. In der Arbeit (Resplandy et al. 2018) wird auf die Schwierigkeiten der Modellierung dieser Transportprozesse hingewiesen.

Der Beitrag der Vulkane schwankt stark und wird vermutlich zu niedrig geschätzt. Die sichersten Daten der CO<sub>2</sub>-Emission erhält man für die anthropogenen Beiträge aus Energieerzeugung, Zementproduktion und Landgewinnung.

Die Größenordnungen der Austauschprozesse und ihre Fehlerquellen liefern nach unserer Ansicht keinen sicheren Beleg, dass das anthropogene CO<sub>2</sub> dauerhaft einen nennenswerten Überschuss in der Atmosphäre aufbaue. Die Konzentration des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre befindet sich, langfristig gesehen, auf einem historisch niedrigen Niveau (Hönisch et al. 2023) und nicht auf dem Wachstumsoptimum der Pflanzenwelt.

**Strahlungsgleichgewicht und Klima:** Strahlungsgleichgewicht bedeutet, dass die Größen der Wärmeflüsse aus dem All und zurück ausgeglichen sind. In Tabelle 2 werden die Energieflüsse verschiedener Quellen miteinander verglichen. Der menschliche Beitrag ist um vier Größenordnungen geringer als der solare und vergleichbar mit dem Energiefluss aus dem Erdinneren durch Radioaktivität und Reaktionswärme.

**Tabelle 2.** Vergleich natürlicher und anthropogener Energieflüsse.

| <u>Energiefluss</u>                            | <u>Joule</u>          | <u>Quelle</u>   |
|--|-----------------------|-----------------|
| Tägliche Sonneneinstrahlung                    | $1,06 \times 10^{22}$ | (IPCC 2021)     |
| Energieumsatz der Menschheit, 2022, täglich    | $1,6 \times 10^{18}$  | (Statista 2024) |
| <u>Täglicher Wärmefluss aus dem Erdinneren</u> | $3,8 \times 10^{18}$  | (Pollack 1993)  |
| <u>In der Atmosphäre gespeicherte Energie</u>  | $1,26 \times 10^{24}$ | (Ullmann 2025)  |

Die Bilanz zwischen Sonneneinstrahlung und Erdatstrahlung wird als sogenanntes Fließgleichgewicht aufgefasst. Ein Ausgleich innerhalb von Tagen oder Jahren ist nicht zu erwarten. Dazu gibt es zu viele periodische Ereignisse (Sonnenaktivität, Wolkenbildung, Polverschiebungen, Meeresströmungen u.a.m.) oder zufällige Ereignisse (Vulkanismus, Teilchenstrahlung) sowie andere. Klimaänderungen über längere Zeiträume in begrenzten Regionen, einschließlich solcher mit erheblichen Stressfaktoren für die Ökosphäre, sind deshalb zu erwarten. Auf Grund der großen Zahl von Einflüssen spricht man beim Klima von einem chaotischen Prozess, der nicht vorausberechnet bzw. extrapoliert werden kann.

### 3. Moderne Klimaforschung und Geschichte des Klimas

**Die CO<sub>2</sub>-T- Korrelation:** Die empirisch bestimmte CO<sub>2</sub>-T-Korrelation und die Festlegung von CO<sub>2</sub> als treibende Kraft sind aus Sicht der exakten Naturwissenschaften zunächst eine Annahme. Auf dieser Annahme basieren die Extrapolationen zum anthropogenen Klimawandel. Die Begründung eines kausalen Zusammenhangs mit Resultaten der exakten Naturwissenschaften steht aus.

Die Definition der Größe „globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche“ und Angaben von Messstandards, etwa Verteilung der Messstellen, werden vermisst. Im physikalischen Sinne ist die Angabe eines globalen T-Durchschnitts mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  Grad fraglich, berücksichtigt man die riesigen regionalen und temporären T-Differenzen auf dem Planeten. Der zeitliche Verlauf der Temperaturen der Festlandoberfläche und der Meeresoberfläche von 1880 bis 2020 zeigt einen schnelleren Anstieg der Atmosphärentemperatur und verzögerte Einstellungen von Temperaturen der Meeresoberfläche (Parmentola 2021).

**Geschichte des Klimas:** Die moderne Klimaforschung bezieht sich auf 200 Jahre der Vergangenheit und hundert Jahre in die Zukunft. Würde man den Betrachtungszeitraum um ein- bis zweihundert Jahre weiter zurück verlängern, so wäre das Ende der Kleinen Eiszeit einzubeziehen und ein T-Anstieg damit zu erklären.

Die Analyse von Eisbohrkernen aus der Antarktis (Petit et al. 1999) und von Grönland (Dansgaard et al. 1992) lieferten Ergebnisse von Temperaturen und Gasanalysen über 800 000 bzw. 500 000 Jahre zurück. Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten mit einer Periode von ca. Hunderttausend Jahren wurden beobachtet. Sie werden mit wechselnden Gravitationskräften als Regelmechanismen erklärt, die die Exzentrizität der Erdumlaufbahn und Neigung der Erdachse verändern. Nehmen wir an, diese Regelmechanismen nach Milanković (Petrovic 2009) setzte sich fort, so durchliefe das Klima vor ca. 8000 Jahren den Höhepunkt der gegenwärtigen Warmzeit. Wir befänden uns, länger gesehen, auf dem Weg in die nächste Eiszeit. Ausrutscher von der Durchschnittskurve nach oben und unten, T-Abweichungen um mehrere Grad über Jahrzehnte bis Jahrhunderte, wurden analysiert, zum Beispiel die Kleine Eiszeit im Mittelalter, sie sind also keine Seltenheit.

Die T- und CO<sub>2</sub>-Kurven lieferten analoge Verläufe über die Jahrhunderttausende. Interessant ist die Beobachtung, dass die CO<sub>2</sub>-Peaks um mehrere Jahrhunderte nach den T-Peaks

auftreten (Petit et al. 1999). Könnte die verzögerte Einstellung des Lösungsgleichgewichts des CO<sub>2</sub> zwischen Meer und Atmosphäre der Grund sein? Die Regelmechanismen der Vergangenheit wirken auch in der Gegenwart weiter. So könnte auch gegenwärtig die Temperatur die treibende Kraft für das Klima sein. Solche Gesichtspunkte spielen in der öffentlichen Klimadebatte keine Rolle.

#### 4. Klimaschutz versus Umweltschutz

Folgen der modernen Klimaforschung sind Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Geringe Flächenleistungsdichte und wechselnde Verfügbarkeit belasten den Ausbau von Wind- und Sonnenenergie-Anlagen. Das erfordert neben dem Bau der Anlagen ein weit verzweigtes Leitungssystem zum Einsammeln des Stromes und ein neues, „smartes“, Verteilungsnetz für schnelle Eingriffe bei Schwankungen in der Versorgung. Bei Ausfall der erneuerbaren Energiequellen werden backup-Kraftwerke benötigt. Stromspeicher in nennenswertem Umfang werden auch in Zukunft nicht verfügbar sein. Erneuerbare Energien sollten dezentral für den lokalen Verbrauch, nicht aber als Hauptenergieträger eines Industriestaates genutzt werden.

Erneuerbare Energien einschließlich der Zusatzinvestitionen haben einen hohen Flächenbedarf. Hoher Rohstoffverbrauch (IEA2026) an Beton für Windkonverter, Kupfer für das Leitungsnetz, Lithium, Silber, Kobalt, Nickel und Seltene Erden für Batterien verursachen Umweltschäden. „Grünen Bergbau“ gibt es nicht. Dazu kommen Artenverluste. Diese Folgeerscheinungen werden in der Bewertung der Energiequellen meist heruntergerechnet.

Noch abwegiger sind Versuche, die Konzentration des CO<sub>2</sub> durch Auffangen aus Abgasen oder Anreicherung aus Luft zu senken und in ein Endlager zu verbringen (CCS) oder das abgetrennte CO<sub>2</sub> zusammen mit „Grünem“ Wasserstoff für die Synthese neuer Kohlenwasserstoff-Verbindungen (CCU) zu nutzen. Diese Verfahren sind mit hohem Energieverlust und damit Entropiezuwachs verbunden (Ullmann/ Bülow 2025, Wessling 2025). Aufwendungen gegen einen nicht zu vermeidenden Klimawandel sollten besser für den Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor den Folgen des natürlichen Klimawandels eingesetzt werden.

### Zusammenfassung

Die beobachtete Abhängigkeit zwischen CO<sub>2</sub>-Gehalt und globalem Temperaturanstieg in der Erdatmosphäre seit Beginn der Industriellen Revolution ist bisher nicht als kausaler Zusammenhang bestätigt. Die höchste Wirkung für das Klima unter den Treibhausgasen hat der Wasserdampf. Die Klimadiskussion konzentriert sich jedoch auf das menschengemachte CO<sub>2</sub>. Die Wärme im „Treibhaus Erde“ wird durch alle Gasbestandteile entsprechend ihrer molaren Wärmekapazitäten und Konzentrationen in der Atmosphäre gespeichert, befindet sich also zum größten Teil in ihren Hauptbestandteilen Stickstoff und Sauerstoff. Treibhausgase werden als Transmitter und Sender zwischen Wärmeenergie und Photonenenergie angesehen, ohne die der Prozess des Energieaustauschs zwischen der Erdatmosphäre und dem All in beiden Richtungen nicht ablaufen kann.

Der Austausch von CO<sub>2</sub> zwischen Atmosphäre und Pflanzenwelt sowie Ozeanen ist vielfach größer als anthropogene Emissionen. Ozeane und Pflanzenwelt können zeitweise auch CO<sub>2</sub>-Quelle sein. Zusammen mit dem riesigen Inventar an CO<sub>2</sub> in Atmosphäre und Ozeanen kann ein Ausgleich der anthropogenen Emissionen angenommen werden.

Die menschliche Energieproduktion ist um vier Größenordnungen kleiner als die Energie der täglichen Sonneneinstrahlung. Das „Treibhaus“ Erdatmosphäre ist ein offenes System. Es

besteht ein Fließgleichgewicht, welches die Ursache für den Klimawandel ist. Die fehlende Verbindung zur Klimageschichte ist ein Mangel der modernen Klimaforschung.

Abtrennung und Endlagerung von CO<sub>2</sub> (CCS) sowie Umsetzung von CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff zu Synthesegas (CCU) sind energetisch mit großen Entropieanstiegen verbunden und deshalb im Rahmen von Klimaschutzprojekten abzulehnen. Klimaschutz steht häufig im Widerspruch zum Umweltschutz.

## Danksagung

Helmut Ullmann und Martin Bülow danken ihren Ehefrauen Erika Ullmann bzw. Heidrun M. Bülow für ihre Geduld und ständige Unterstützung während der Arbeit am Manuskript in schwierigen Zeiten.

## References

- Dansgaard, W., Clausen, H.B., Gundestrup, N. et al. (1992): *A New Greenland Deep Ice Core*, Science **218**, 1273-1277.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O’Sullivan, M., et al. (2019): *Global Carbon Budget Earth Syst. Sci. Data* **11** (4), 1783-1838.
- Hönisch, Bärbel et al. (2023): *Toward a Cenozoic history of atmospheric CO<sub>2</sub>*, Science **382**, Issue 6675, 1-27.
- IEA (2026): *Global Critical Minerals Outlook*, IEA Ministreals Meeting.
- IPCC (2021): *AR6, Sixth Assessment Report/Working Group 1*, 9 August 2021, p. 700.
- Parmentola, J. (2021): [johnparmentola.com/the-coming-of-a-climate-catastrophe/?\\_se=ay50YWVnZGVyQHQtb25saW5l&utm\\_campaign=2021-09-18\\_CO2\\_UN\\_says\\_only\\_15\\_deg\\_more\\_past\\_climate\\_change&utm\\_medium=email&utm\\_source=sendinblue](https://johnparmentola.com/the-coming-of-a-climate-catastrophe/?_se=ay50YWVnZGVyQHQtb25saW5l&utm_campaign=2021-09-18_CO2_UN_says_only_15_deg_more_past_climate_change&utm_medium=email&utm_source=sendinblue).
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., et al. (1999): *Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core Antarctica*, Nature **399** 429-436.
- Petrovic, A. (2009): *Revolution and Insolation How Milutin Milanković has assembled the puzzle of the climate*, Scientific Technical Review, Band **LIX**, Nr. 1.
- Pollack, H.N., Hurter, S.J., Johnson, J.R. (1993): *Heat flow from the Earth’s interior, Analysis of the global data set*, Reviews of Geophysics. **31** Nr. 3, 267-280. DOI:10.1029/93rg01249.
- Quapp, W. (2025): To “The role of greenhouse gases in radiative equilibrium–hermodynamic evaluation” and ”Zur Physikalischen Chemie des Treibhaus-Effekts“ by H. Ullmann and M. Bülow (Rebuttal), Preprint pdf: [download](#), DOI: 10.13140/RG.2.2.25356.17287.
- Rahmstorf S. (2007): *Klimaandel – einige Fakten*. Bundeszentrale für politische Bildung, Bonn, , 7-13. ApuZ 47, Beilage zu Das Parlament.
- Resplandy, L., Keeling, R. F., Rödenbeck, C., Stephens, B.B., Khatiwala, S., Rodgers, K.B., Long, M.C., Bopp, L., Tans, P.P. (2018): *Revision of global carbon fluxes based on a reassessment of oceanic and riverine carbon transport*: Nature Geoscience **11**, Nr. 7, 504-509.
- Statista (2024): *Energie und Umwelt. Anteil der wichtigsten Energiequellen am weltweiten Primärenergieverbrauch von 2021 bis 2023*, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/258294/umfrage/anteil-der-wichtigsten-energiequellen-am-weltweiten-primaeernergieverbrauch/>
- Trenberth, K.E., Fasullo, J. T., Kiehl, J. (2009): *Earth's Global Energy Budget*, Bulletin of the American Meteorological Society, **90** Nr. 3, 311–324, doi: 10.1175/2008BAMS2634.1.

- Ullmann H. und Bülow M. (2023): *Zur Rolle des Kohlenstoffdioxids für das Klima (On the role of carbon dioxide for the climate)*, Leibniz Online, Nr. **50**, 1-8.  
DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE50.
- Ullmann H. und Bülow M. (2024): *Zur Rolle der Spurengase für die Strahlungsbilanz der Erde* Leibniz Online Nr. **53**, 1-8. DOI:10.53201/LEIBNIZ ONLINE.
- Ullmann H. and Bülow M. (2024a): *The role of greenhouse gases in radiative equilibrium - thermodynamic evaluation*. Z. Phys. Chem. **238** (12), 1-9.
- Ullmann H. und Bülow M. (2025): *Zur Physikalischen Chemie des Treibhaus-Effekts*. Z. Phys. Chem. **239** (11-12), 1–12.
- Ullmann H. and Bülow M. (2025a): *On the role of trace gases in the earth's radiation balance-thermodynamic treatment*. Therm. Sci. Eng. **8** (2), 10,356. D10.24294/tse10356.
- Wessling B. (2025): *Thermodynamische Analyse der CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Speicherung. Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit*. Phys. In unserer Zeit **56** (2), 2–9.

Dierhagen und Freital am 23. Februar 2026