

Nachweis des Treibhauseffekts im Labor

Hermann Harde¹, Michael Schnell²

¹Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, ²Ehem. Akademie der Wissenschaften, Berlin

Kurzfassung der Veröffentlichung: Verification of the Greenhouse Effect in the Laboratory

In Science of Climate Change, Vol. 2.1, pp. 1-33, 2022, <https://doi.org/10.53234/SCC202203/10>

Zusammenfassung

Es werden quantitative Labormessungen zur Emission von Treibhausgasen unter vergleichbaren Bedingungen wie in der Atmosphäre vorgestellt und mit Strahlungs-Transfer-Rechnungen verglichen. Die Untersuchungen an Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas erlauben einen eindeutigen Nachweis des atmosphärischen Treibhauseffekts, und gleichzeitig zeigen sie dessen begrenzten Einfluss mit wachsender Konzentration dieser Gase.

1. Einleitung

Fossile Brennstoffe werden für einen Klimanotstand verantwortlich gemacht, verbunden mit katastrophalen Folgen für unseren Planeten, wenn die weltweiten anthropogenen Emissionen nicht unverzüglich gestoppt werden. Grundlage dieser Prophezeiungen ist der atmosphärische Treibhauseffekt (THE). Allerdings werden selbst von vielen Klimawissenschaftlern oder Experten die eigentlichen Zusammenhänge und die Wirkungsweise der Treibhausgase (TH-Gase) oft nicht richtig zugeordnet. Dies führt in populärwissenschaftlichen Darstellungen oder auch der Zusammenfassung für Politiker (siehe z.B. IPCC-Zustandsbericht AR6 [1]) zu teils drastischen Fehlinterpretationen hinsichtlich der Auswirkungen auf unser Klima. Andererseits entsteht durch diese Übertreibungen hieraus oft bei Menschen mit physikalisch-technischem Sachverstand ein deutlicher Zweifel an dem vom Menschen verursachten Klimawandel und insbesondere an der Existenz eines Treibhauseffekts, der sich fast ausschließlich auf theoretische Sachverhalte abstützt.

Hauptgrund dieser Zweifel ist dabei ein fehlender und nachvollziehbarer Nachweis des THE, obwohl es in den letzten 120 Jahren immer wieder Versuche gab, diesen Effekt durch mehr oder weniger einfache Laborversuche zu bestätigen oder zu widerlegen. So gibt es Experimente mit angeblich gemessenen Temperaturerhöhungen durch CO₂ von 10°C oder mehr. Andere Experimente wiederum konnten keine Erwärmung durch TH-Gase bestätigen, oder sie erklären eine beobachtete Temperaturerhöhung durch andere Effekte wie konvektions-, leitungs- oder druckinduzierte Effekte in einer Gassäule. Direkte Messungen in der Atmosphäre sind zu stark von Konvektion, Turbulenz oder Streueffekten beeinflusst, um den relativ geringen Beitrag von Treibhausgasmolekülen zu einer Erwärmung der Luft oder der Erdoberfläche, die Tag-Nacht- und Jahreszeit-Zyklen mit lokalen Schwankungen von 60°C oder mehr unterliegen, zu quantifizieren.

Das Ziel dieser Untersuchungen war es daher, durch Labormessungen und ihren Vergleich mit Rechnungen einen eindeutigen Nachweis des THE zu erbringen, um die oft unphysikalischen Ersatzvorstellungen von Kritikern des THE zu widerlegen, und andererseits den Einfluss von TH-Gasen auf unser Klima zu relativieren.

Der interessierte Leser wird auf den Originalartikel (siehe oben) hingewiesen, der in dem neuen Journal "*Science of Climate Change*" erschienen ist.

2. Einige historische Anmerkungen

Die ersten Modellvorstellungen zum atmosphärischen Treibhauseffekt gehen zurück auf Jean-Baptiste Joseph Fourier in 1824 [2], der den Energiehaushalt der Erde untersuchte, um die Oberflächentemperatur zu erklären. Er nahm an, dass die Atmosphäre ähnlich wie ein Glasfenster wirkt, das für die Sonnenstrahlung transparent ist, aber die vom Boden ausgesandte Infrarotstrahlung (IR) blockiert. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung durch Konvektion oder Wärmeleitung wurde in diesem Modell weitgehend vernachlässigt.

Eines der ersten grundlegenden Experimente zum THE geht auf R. W. Wood (1909) [3] zurück, der zwei Kästen verwendete, die normale Luft enthielten. Eine Box war mit einem für Sonnenlicht transparenten aber IR-Strahlung blockierenden Glasfenster bedeckt, die andere mit einem für IR transparenten NaCl-Fenster. Seine Messungen zeigten eine deutliche Erwärmung des Innenraums, aber keinen oder nur einen vernachlässigbaren Temperaturunterschied zwischen den Boxen. Daraus schlossen Wood und andere Autoren, die seinen Versuch wiederholten (z.B. Allmendinger 2006 [4], Nahle 2011 [5]), dass Infrarotstrahlung, die durch das NaCl-Fenster entweichen kann, nicht oder nur unwesentlich zur Erwärmung beiträgt, während der beobachtete Temperaturanstieg in beiden Kästen - anders als Fouriers Interpretation - ausschließlich durch die Blockade der konvektiven Wärmeübertragung mit der Umgebung erklärt wird und nicht mit irgendeiner Art von zurückgehaltener Strahlung zusammenhängt.

Aber Experimente, die die Temperatur am Boden und an der Decke des Innenraums aufzeichnen, anstatt nur auf eine einzige Temperatur für jede Box zu schauen, messen einen um 5°C größeren Rückgang vom Boden zum Fenster für die Steinsalzbox als für die Glasbox, während der Boden von den Boxen nahezu identische Temperaturen aufweist (V.R. Pratt, 2020 [6]). Diese Ergebnisse werden prinzipiell mit einem etwas anderen Aufbau unter Verwendung einer internen elektrischen Heizung anstelle einer externen Lichtquelle bestätigt (E. Loock, 2008 [7]). Eine solche Anordnung vermeidet Unterschiede in der einfallenden Strahlung, die ansonsten Fenster unterschiedlicher Materialien und Verluste passieren muss. Für den Glaskasten konnte eine höhere Temperatur von 2,5 - 3°C festgestellt werden, und wenn das Glas durch eine polierte Aluminiumfolie ersetzt wird, steigt die Temperatur sogar um weitere $\approx 3^\circ\text{C}$ an.

Während die Wood-Experimente die Frage beantworten können, ob und wie weit eine reduzierte IR-Transmission zur Erwärmung eines abgeschlossenen Behälters bzw. der Troposphäre beitragen kann, geben sie keine Auskunft über die Wechselwirkung von Treibhausgasen mit IR-Strahlung. Somit blieb die Frage, inwieweit solche Gase IR-Strahlung zumindest teilweise zurückhalten können und inwieweit eine einfache Absorption durch TH-Gase oder die stark umstrittene Rückstrahlung zu einer zusätzlichen Erwärmung des Bodens beitragen könnte. Bei solchen Untersuchungen muss ein Behälter mit dem zu untersuchenden Gas gefüllt und mit einer Referenzmessung mit Luft oder einem Edelgas verglichen werden.

Mittlerweile wurden verschiedene Ansätze verfolgt, teils mit externer Bestrahlung oder mit interner Heizung (siehe z. B. Loock [7]), teils durch Messung der Gastemperatur oder der IR-Strahlung in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung (Seim & Olsen 2020 [8]). Aber entweder wurde keine Erwärmung festgestellt oder die beobachtete Temperaturerhöhung konnte bei näherer Betrachtung nicht auf einen IR-Strahlungseffekt zurückgeführt werden.

Andererseits werden leider im Internet immer wieder einige manipulierte Demonstrationen mit scheinbaren Temperaturunterschieden von mehr als 10°C präsentiert, die angeblich die starke Wirkung der Treibhausgase offenbaren (siehe z. B. Ditfurth 1978 [9]). Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass die höhere Temperatur hauptsächlich durch einen Schichtungseffekt, verbunden mit einer erhöhten Isolation, verursacht wird, wenn schwereres CO₂ von unten in den Behälter eingeführt wird (siehe: M. Schnell 2020 [10]). Und wirklich problematisch wird es, wenn der mit ausgezeichnete Friedensnobelpreisträger von 2007 eine Web-basierte Kampagne mit mehreren Werbespots im Fernsehen initiiert, die darauf abzielt, das Bewusstsein für eine Klimakrise anzustacheln und als „Beweis“ ein völlig unrealistisches und nicht reproduzierbares Videoexperiment zur Demonstration des THE

präsentiert (Al Gore's Climate 101 Video Experiment, 2001 [11]), das mittlerweile durch mehrere Überprüfungen widerlegt wurde (Watts 2011 [12], Solheim 2016 [13]). Es ist leider schäbige Propaganda, wenn ein solches manipuliertes Experiment benutzt wird, um weltweit Angst zu verbreiten und unsere Gesellschaft mit der Botschaft zu indoktrinieren, dass wir unsere Erde nur retten können, indem wir alle zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen stoppen. Solche Demonstrationen unterminieren alle ernsthaften Versuche, einen möglichen Einfluss von TH-Gasen auf unser Klima ernsthaft zu diskutieren und zu analysieren. Politische Vorstellungen, Spekulationen oder religiöser Glaube sind keine seriösen Berater für eine erfolgreiche Zukunft; Unser Wissen und unser technischer Fortschritt basieren auf wissenschaftlichen Prinzipien.

Es ist daher höchste Zeit, die endlosen Spekulationen über die katastrophalen Auswirkungen oder die Nichtexistenz eines atmosphärischen THE zu beenden und sich auf zuverlässige Untersuchungen zu konzentrieren, die es ermöglichen, die Größe und den begrenzenden Einfluss von TH-Gasen auf die durch anthropogene Emissionen verursachte globale Erwärmung zu quantifizieren.

In dieser Arbeit wird kurz der theoretische Hintergrund des THE zusammengefasst, und es werden erstmals quantitative Messungen für die TH-Gase CO_2 , CH_4 und N_2O mit einem speziell konzipierten Versuchsaufbau vorgestellt, der von M. Schnell entwickelt wurde und Messungen unter ähnlichen Bedingungen wie in der unteren Troposphäre ermöglicht.

3. Zum Versuchsaufbau

Für unsere Untersuchungen verwenden wir einen Versuchsaufbau, der aus zwei Platten in einem geschlossenen Gehäuse besteht, eine Platte auf 30°C beheizt, die andere auf $-11,4^\circ\text{C}$ gekühlt (Abb. 1). Die Platten haben einen Abstand von 1,11 m zueinander, und der Tank kann mit verschiedenen Gasen gefüllt werden, um die Strahlungsübertragung zwischen den Platten in Gegenwart der TH-Gase zu untersuchen.

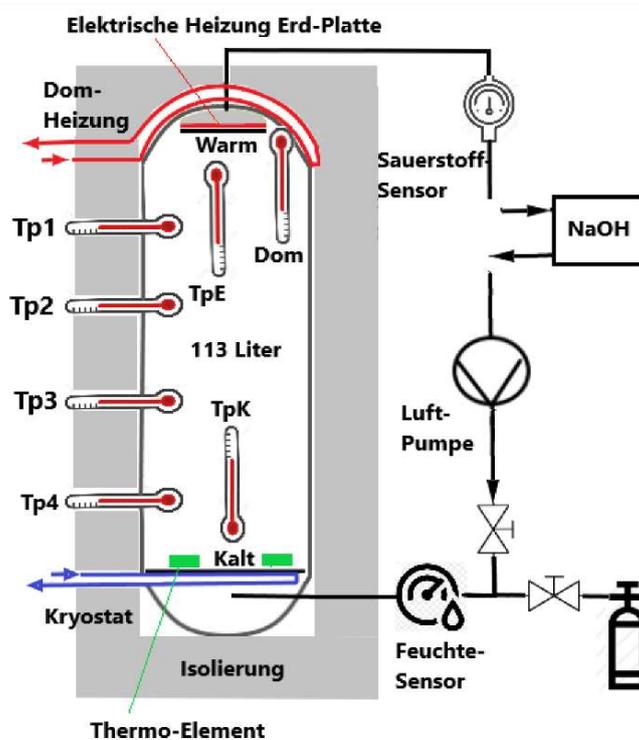


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Apparatur

Im Unterschied zu anderen Experimenten werden keine Lichtquellen vom Sichtbaren bis zum mittleren IR verwendet, sondern nur die von den beiden Platten emittierte und mit den Gasen wechselwirkende Strahlung betrachtet. Damit werden Bedingungen für den Strahlungsaustausch ähnlich dem Erde-Atmosphären-System (EASy) mit der wärmeren Erdoberfläche und der kälteren Atmosphäre

bei Bewölkung simuliert. Der Aufbau vermeidet auch Probleme, die durch einen ungeeigneten Spektralbereich einer externen Quelle verursacht werden, die viel überflüssige Abwärme im Innenraum und in den Fenstern erzeugt, aber nur ungenügend auf die Absorptionsbanden der TH-Gase abgestimmt ist und hierdurch die Messempfindlichkeit wesentlich verringert.

Mit erhöhter Konzentration der TH-Gase verändert sich das Strahlungsgleichgewicht zwischen den Platten und kann empfindlich als weiter ansteigende Temperatur der wärmeren Platte und/oder als weitere Abkühlung der kalten Platte gemessen werden. Hier beschränken wir uns darauf, nur die Temperaturänderung der beheizten Platte als Funktion der TH-Gaskonzentration im Tank aufzuzeichnen, oder alternativ die elektrische Leistung so weit zu reduzieren, dass die Temperatur der Platte auf 30° stabilisiert wird. In Analogie zur Erwärmung der Erdoberfläche durch den atmosphärischen THE bezeichnen wir die wärmere Platte als Erdplatte, die gleichzeitig Quelle und Sensor für IR-Strahlung ist, und die gekühlte Platte als Atmosphärenplatte (Atm-Platte), von der entsprechend der Temperatur breitbandige Hintergrundstrahlung ausgeht.

Alle Energieflüsse, die nicht Teil des Strahlungsaustausches sind, müssen durch geeignete Maßnahmen verhindert oder unterdrückt werden. Die vertikale Installation mit der Erdplatte in der obersten Position gewährleistet dabei eine stabile Gasschichtung und verhindert einen vertikalen Wärmeaustausch durch Konvektion. Wärmeleitung sowohl entlang der Kammerwände als auch durch das Gas kann nicht vollständig verhindert, aber minimiert werden. Die Erdplatte ist daher weitgehend isoliert und befindet sich in einer halbkugelförmigen Hülle (Kuppel) mit nahezu gleicher Temperatur. Die Kuppel hat innen eine polierte Edelstahloberfläche und wird von außen über einen geregelten Wasserkreislauf auf $30,0 \pm 0,1$ °C stabilisiert. Diese Anordnung sorgt dafür, dass in diesem Abschnitt nahezu keine Wärmeleitung stattfindet. Überdies garantiert die beheizte Kuppel eine wichtige Orientierungshilfe für die Auswertung der Experimente.

Da es aber mit der erhöhten Temperatur der Erdplatte dennoch zu kleineren Wärmeleitungsverlusten zu den Tankwänden und der Atmosphärenplatte kommen kann, wird dieser Einfluss durch Kontrollmessungen mit Edelgasen vergleichbarer oder höherer Wärmeleitfähigkeit überprüft. Die Messungen zeigen eindeutig, dass Wärmeleitung keinen nachweisbaren Einfluss auf die Untersuchungen zur Strahlungsausbreitung in TH-Gasen besitzt.

Mit dem TH-Gas in der Apparatur wird dann die Rückstrahlung des Gases als Temperaturanstieg der geschwärzten Erdplatte relativ zur Kuppeltemperatur oder als verringerte elektrische Plattenheizung gemessen.

4. Einige physikalische Grundlagen

4.1 Absorption durch Gase

Im Unterschied zu Stickstoff, Sauerstoff oder den Edelgasen können Treibhausgase im mittleren und langwelligen IR-Spektralbereich Strahlung absorbieren. Dieser Bereich wird vornehmlich durch die Temperatur der Erdoberfläche T_E oder hier durch die Erdplatte als Planck'scher Strahler vorgegeben. Der Spektralbereich erstreckt sich auf einer Wellenlängenskala von ca. 4 μm bis in den cm-Bereich oder in reziproken Wellenlängen (Einheit: Wellenzahlen pro cm) über einen Bereich von 10 bis 2500 cm^{-1} . Das Emissionsspektrum der Erdplatte für 30°C, wie es aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz folgt, ist in Abb. 2 als Blauer Graph wiedergegeben.

Innerhalb dieses Spektralintervalls haben die Haupt-Treibhausgase in der Atmosphäre wie Wasserdampf (H_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Ozon (O_3) zusammen 615.600 Spektrallinien, auf denen eine Absorption der Strahlung erfolgen kann. Als Beispiel der Strahlungswechselwirkung mit einem Gas betrachten wir hier zunächst nur CO_2 , das allein schon 154.500 Linien in diesem Bereich besitzt, viele davon mit nur sehr schwacher Intensität, aber über die langen Absorptionswege in der Atmosphäre tragen auch die zu einer Wechselwirkung mit der Strahlung bei.

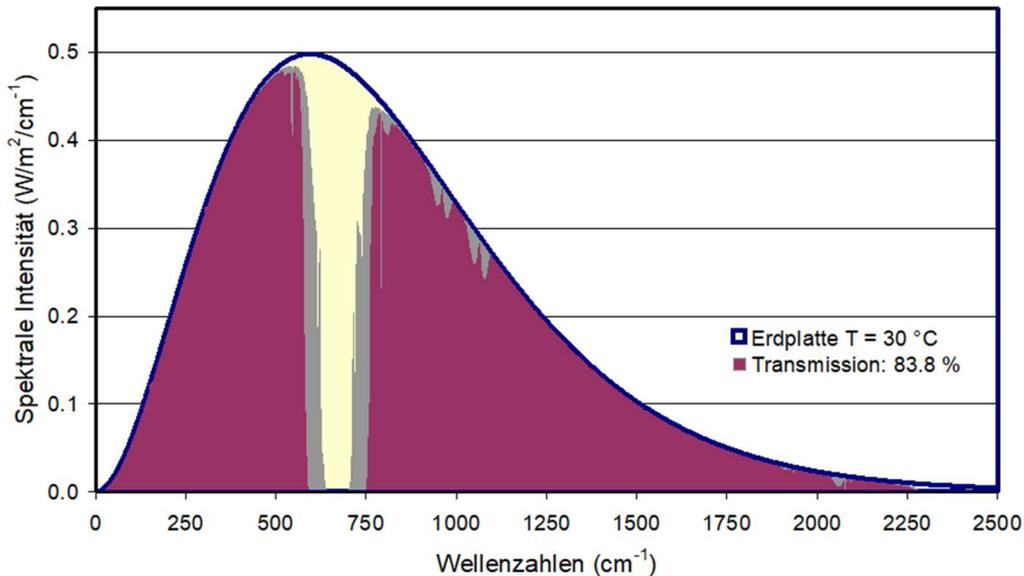


Abb. 2: Abgestrahlte spektrale Intensität der Erdplatte für $T_E = 30^\circ\text{C}$ (Blauer Graph) als Funktion der Wellenzahl. Die Transmission der Strahlung nach Passieren einer Gasschicht von 20% CO_2 in trockener Luft bei einer Temperatur von 20°C und über einen Weg von 111 cm ist Rot-Braun dargestellt.

Die mit Abstand stärkste Absorptionsbande ist um 2.400 cm^{-1} ($4,25\text{ }\mu\text{m}$) zentriert. Aber bei diesen Wellenzahlen ist die emittierte spektrale Intensität der Erdplatte - und ebenso der Erdoberfläche - hundertmal kleiner als bei ihrem Maximum. Diese Absorptionsbande kann also nicht mehr als 0,75% zur Gesamtabsorption beitragen. Die dominierende Wechselwirkung findet auf den ro-vibronischen Übergängen der CO_2 -Biegeschwingung um 670 cm^{-1} ($15\text{ }\mu\text{m}$) statt, obwohl die spektralen Linienintensitäten und damit die jeweiligen Absorptionskoeffizienten etwa 30x kleiner sind als die stärkeren Linien bei 2.400 cm^{-1} . In Abb. 2 ist die spektrale Intensität aufgetragen (berechnet nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz), die eine Gasprobe mit 20% CO_2 in trockener Luft bei einer konstanten Temperatur des Gases von 20°C und über eine Länge von 111 cm durchlässt (Rot-Braun). Während das Gas im Zentrum der Bande vollständig opak ist und die Intensität auf Null abfällt (Gelber Bereich), tragen die halbtransparenten Flügel der Absorptionsbande (Grau) zusammen mit den schwachen Banden um 1.000 cm^{-1} und 2.100 cm^{-1} nur wenig zu einer weiter langsam ansteigenden Absorption mit steigender CO_2 -Konzentration bei (annähernd logarithmischer Anstieg; alle Konzentrationsangaben beziehen sich auf das Volumen, ppmv).

Die Gesamtabsorption durch die Gasprobe beträgt unter diesen Bedingungen 16,2%. In der Atmosphäre mit einer CO_2 -Konzentration von 400 ppm und unter Vernachlässigung der Interferenz mit Wasserdampflinien entspricht dies einer atmosphärischen Schichtdicke von 555 m (bei angenommenem konstantem Druck und konstanter Temperatur). Die so vom Gas absorbierte Strahlungsleistung wird dabei in einem ersten Schritt in eine lokale Erwärmung umgesetzt, dies berücksichtigt jedoch nicht die Eigenemission des Gases, die sich der einfallenden Strahlung überlagert und die beobachtete Strahlungs- und Energiebilanz deutlich verändert.

4.2 Thermische Emission eines Gases

Eine der häufigsten Einwände gegen den THE besteht darin, dass TH-Gasen in der unteren Atmosphäre die Fähigkeit zur Emission abgesprochen wird, während sie gute Emittoren in der Tropopause und Stratosphäre sind. Als Erklärung hierfür wird angeführt, dass in der unteren Troposphäre Stoßprozesse mit Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen jede spontane Emission unterdrücken und die absorbierte Energie nur über Stöße in kinetische Energie und damit in Wärme umgesetzt wird.

Dabei wird leider übersehen, dass sich typische Stoßraten im GHz-Bereich, wie sie in niedrigen Atmosphärenschichten beobachtet werden, in einer Höhe von z.B. 11 km lediglich um einen Faktor 4-5 reduzieren und damit immer noch einige 100 Mio. mal größer sind als die spontane Übergangsrate

eines Moleküls (~ 1 Hz). Wäre dies die ganze Wahrheit, dürfte auch aus der höheren Atmosphäre absolut keine Emission erfolgen.

Zu einer kontinuierlichen Emission auch ohne vorherige Absorption eines IR-Lichtquants kommt es vor allem, weil neben den superelastischen Stößen (stoßinduzierter Übergang von einem höheren in einen tieferen Molekülzustand) ebenso inelastische Stöße stattfinden, die dem Gasgemisch kinetische Energie entziehen und den TH-Gasmolekülen wieder zuführen (Harde 2013 [14], Subsec. 2.3). So werden niedriger liegende Energie-Niveaus bei hinreichender thermischer Energie kontinuierlich wieder angeregt (besetzt), und die spontane Emission tritt weitgehend unabhängig und parallel zu den superelastischen Stößen als thermische Hintergrundstrahlung auf (Harde 2013 [14], Subsec. 2.5). Die Stoßprozesse (adiabatische und diabatische) machen sich vornehmlich nur in einer spektralen Verbreiterung bemerkbar. Mit wachsender Höhe nimmt dabei die abgestrahlte Intensität deutlich ab. Sie ist aufgrund der abnehmenden Dichte der TH-Gase, der geringeren Stoßprozesse und vor allem aufgrund der reduzierten Temperatur in einer Höhe von 11 km für CO_2 z.B. gerade noch 12% der Intensität einer 100 m dicken Gasschicht am Boden.

Eine vollständige und realitätsnahe Beschreibung einer Messung mit der vorgestellten Apparatur setzt daher voraus, dass diese Emission, die im gleichen Spektralbereich wie die Erdplattenstrahlung auftritt und die effektiven Absorptionsverluste deutlich reduzieren kann, mit einbezogen wird. Dies ist bekannt als Strahlungs-Transfer-Rechnung (ST-Rechnung, Schwarzschild Gleichung) in einem Gas unter Berücksichtigung des Gases als Linienstrahler (Harde 2013 [14], Section 4).

Aus diesen Rechnungen folgt insbesondere:

- Für ein TH-Gas, das die gleiche Temperatur wie ein externer Planck'scher Strahler - hier die Erdplatte - besitzt, ist die transmittierte Strahlung gleich der einfallenden Strahlung. Änderungen sind nur zu erwarten, wenn die Temperatur über die Weglänge variiert.
- Dies erklärt bereits, warum es schwierig ist, den THE nachzuweisen, wenn nur die Gastemperatur betrachtet wird. Eine Nettoabsorption und damit Erwärmung des Gases durch einfallende Strahlung findet nur so lange statt, wie die jeweilige spektrale Intensität auf den Molekülübergängen größer ist als die Eigenstrahlung des Gases auf diesen Linien. Wenn sich dies ausgeglichen hat, findet kein weiterer Nettoaustausch statt, und in diesem Sinne wirkt der Strahlungstransfer im Gas ähnlich wie Wärmeleitung und Konvektion, die lokale Temperaturunterschiede ausgleichen.
- Eine größere lokale und globale Erwärmung eines TH-Gases wird insbesondere durch seine eigene Strahlung begrenzt. Dies limitiert die effektive Absorption von einer IR- oder sichtbaren Lichtquelle und erschwert die Unterscheidung dieses Beitrags von der dominierenden Abwärme, die von diesen Quellen freigesetzt wird. All dies wird durch Wärmeleitung und Konvektion in einem typischen Aufbau weiter beeinträchtigt.
- Voraussetzung für die Beobachtung des THE in der Atmosphäre und ebenso im Laborexperiment ist ein Temperaturgradient im Gas, ansonsten sind keine Netto-Veränderungen in der Strahlungsbilanz zu erwarten.

4.3 Vorwärtsstrahlung

Eine Strahlungs-Transfer-Rechnung für die transmittierte Strahlung der Erdplatte ($T_E = 30^\circ\text{C}$) ist in Abb. 3 wiedergegeben.

Die Strahlung durchläuft eine Gasschicht von 20% CO_2 in trockener Luft bei einem Temperaturgefälle (Lapse Rate) von $0,373^\circ\text{C}/\text{cm}$ (von $T_E = 30^\circ\text{C}$ der Erdplatte zu $T_A = -11,4^\circ\text{C}$ der Atm-Platte über 111 cm). Die emittierte Strahlung der Erdplatte ist als blauer Graph auf gelbem Hintergrund dargestellt, die transmittierte spektrale Intensität vor der Atmosphärenplatte in Rot-Braun wiedergegeben, und die schwachen Absorptionsbanden sowie die halbtransparenten Flanken sind in Grau aufgeführt. Die deutlich geringere Absorption mit 5,2 % im Vergleich zu Abb. 2 mit 16,2 % ist

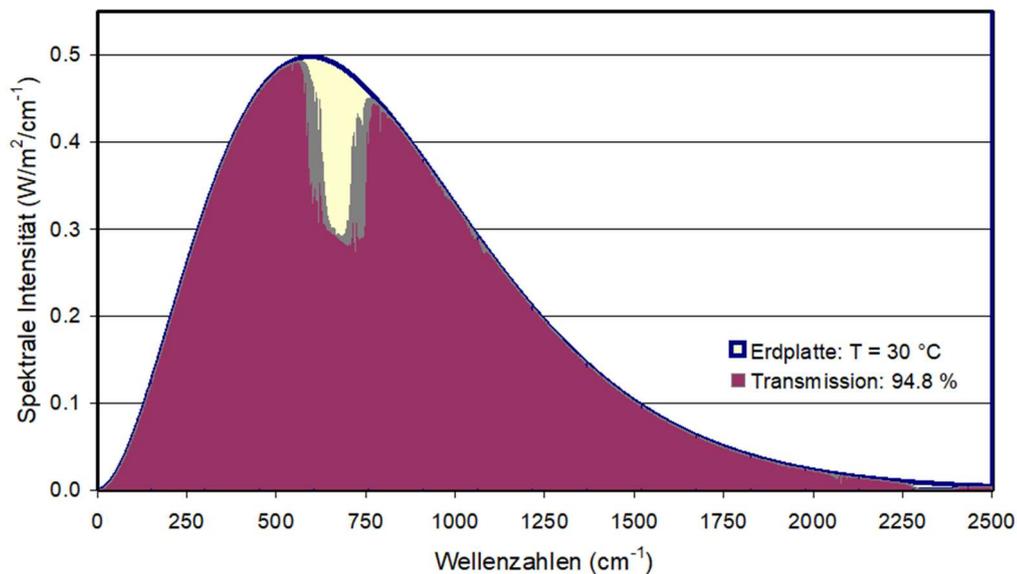


Abb. 3: Strahlungs-Transfer-Rechnung für 20 % CO₂ in trockener Luft über 111 cm bei einem Temperaturgefälle von 0,373 °C/cm. Schwarzkörperstrahlung für $T_E = 30^\circ\text{C}$ (Blau-Gelb), durchgelassene spektrale Intensität (Rot-Braun).

offensichtlich und resultiert aus der Eigenemission des Gases.

Solch eine Rechnung erfolgt in der Form, dass die Absorption und Emission in jeweils dünnen Schichten von $\Delta z = 1 \text{ cm}$ ermittelt wird. Für jede Schicht müssen hierzu die spektralen Änderungen in diesem Fall von mehr als 12.000 Linien mit ihren druck- und temperaturabhängigen Linienbreiten berechnet werden, um schließlich nach 111 Berechnungsschritten die transmittierte Intensität zu erhalten. Der Druck über die Ausbreitungslänge wird in diesem Fall als konstant angenommen und die Gasdichte in einer Schicht gemäß der idealen Gasgleichung zugrunde gelegt.

Abb. 3 gibt Bedingungen wieder, wie sie von Satelliten-Messungen bekannt sind, die die ins All abgegebene Strahlung aufzeichnen und die durch den typischen Trichter um 670 cm^{-1} gekennzeichnet sind. In diesem Spektralbereich wird die einfallende Strahlung vollständig absorbiert (siehe Abb. 2), und die beobachtete Intensität resultiert nur aus der thermischen Emission des Gases bei reduzierten Temperaturen in der Nähe der Atm-Platte. In diesem Fall absorbiert das Gas von der einfallenden Strahlung mit 479 W/m^2 (Integral über die spektrale Intensität) zunächst $73,6 \text{ W/m}^2$ und emittiert wieder $48,5 \text{ W/m}^2$, während im Gasvolumen eine Differenz von $25,1 \text{ W/m}^2$ verbleibt, die zur Erwärmung und/oder Strahlung beiträgt, sofern diese nicht an den Wänden verloren geht.

Der Nachweis der Vorwärts- oder Aufwärtsstrahlung ist eine Möglichkeit, den THE zu verifizieren, der andere Ansatz, den wir hier verfolgen, ist die Messung der Abwärts- oder Rückstrahlung. In Analogie zur terrestrischen Strahlung verstehen wir die Ausbreitung von der Atmosphären- zur Erdplatte als Rückstrahlung (negative z-Richtung), in unserem Experiment von unten nach oben.

4.4 Strahlung der Atmosphärenplatte

In einer vollständigen Strahlungsbilanz ist nicht nur die Wechselwirkung der Erdplattenstrahlung mit dem Gas zu berücksichtigen, sondern auch die von der Atmosphärenplatte emittierte Strahlung, die sich in Anti-z-Richtung durch das Gas auf die wärmere Platte hin ausbreitet.

Auch hier gibt es immer wieder Einwände von THE-Leugnern, die argumentieren, dass die Strahlung eines kühleren Körpers nicht von einem wärmeren Körper absorbiert werden kann, da dies einen Verstoß gegen den 2. Hauptsatz der Thermodynamik darstellen würde. Eine einfache Messung, bei der die Temperatur der Atmosphärenplatte schrittweise erhöht und die Erwärmung der Erdplatte bzw. deren reduzierte Heizleistung gemessen wird, ist ein klarer Beweis für eine falsche Interpretation dieses Gesetzes, das explizit den „gleichzeitigen doppelten Wärmeaustausch durch Strahlung“

(Clausius) einschließt. In einem abgeschlossenen System „erfährt der kältere Körper eine Wärmezunahme auf Kosten des wärmeren Körpers“, der seinerseits eine geringere Abkühlungsrate erfährt. In einem offenen System mit externer Heizung führt die Rückstrahlung des kälteren Körpers klar zu einer höheren Temperatur des wärmeren Körpers als ohne diese Rückstrahlung.

Abb. 4 zeigt eine solche Messung für die Erwärmung bzw. die eingesparte Heizintensität (um die Erdplatte auf $T_E = 30^\circ\text{C}$ zu stabilisieren) als Funktion der Strahlungsintensität der Atmosphärenplatte (Magenta). Der lineare Verlauf bestätigt einen fast ausschließlichen Strahlungstransfer entsprechend dem Stefan-Boltzmann-Gesetz, während Wärmeleitung oder Konvektion weitgehend ausgeschlossen werden können. Ebenso lässt sich aus solch einer Messung direkt der Strahlungsverlust über die Aufweitung und Reflexionsverluste an den Seitenwänden ermitteln. Es ergibt sich ein Transmissionsgrad von $f_A \approx 74\%$. Zum Vergleich ist der Verlauf ohne Verluste dargestellt (Blau). Gleichzeitig liefert die reduzierte Heizleistung bei einer beobachteten Temperaturerhöhung eine Eichung für die Temperatur-Nachweisempfindlichkeit der Erdplatte mit $\lambda_E = 0,083 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}\cdot\text{m}^2$.

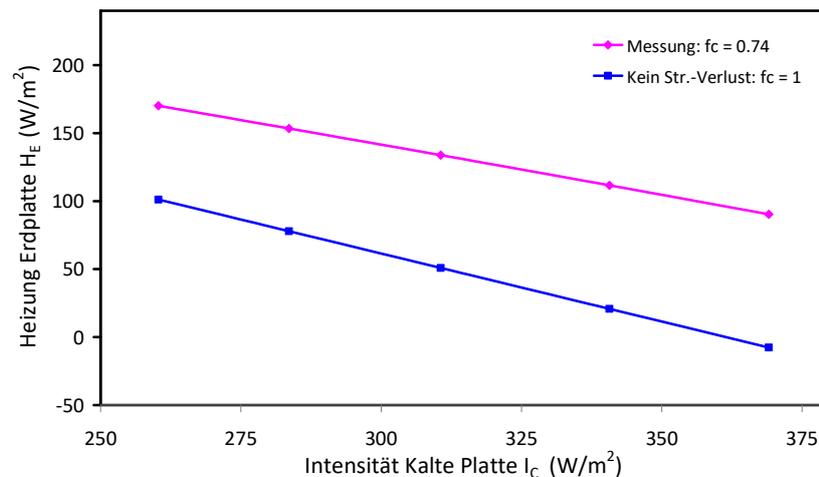


Abb. 4: Gemessene Heizintensität der Erdplatte für eine feste Temperatur $T_E = 30^\circ\text{C}$ als Funktion der Strahlungsintensität I_A der Atmosphärenplatte (Magenta Rhomben). Ebenfalls aufgetragen ist die theoretische Heizintensität für 100%-ge Strahlungsübertragung (Blaue Quadrate).

4.5 Rückstrahlung des Treibhausgases

Um unter diesen Bedingungen den Einfluss eines TH-Gases auf die Ausbreitung der Strahlung von der Atmosphären- zur Erdplatte durch eine Strahlungs-Transfer-Rechnung zu simulieren, wird ausgegangen von der spektralen Intensität der unteren Platte mit $266 \text{ W}/\text{m}^2$ (entsprechend der Temperatur $T_A = -11,4 \text{ }^\circ\text{C}$) und die Ausbreitung durch die Gaswolke berechnet, jetzt für einen Temperaturanstieg von $+0,373 \text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$. Abb. 5 zeigt die spektrale Intensität der Rückstrahlung für 20% CO_2 in Luft über 111 cm ohne transversale Strahlungsverluste (Rot-Braun).

Ebenfalls aufgetragen ist die emittierte spektrale Intensität der Atmosphärenplatte (Blau) und der Erdplatte (Rot-Gelb). Die Eigenstrahlung des Gases in Richtung der wärmeren Erdplatte kann klar als Peak um 670 cm^{-1} (Rot-Braun und Graue Flanken) über dem breiteren Spektrum der Atmosphärenplatte identifiziert werden. Auf den stärkeren Linien in der Bandenmitte erreicht die Gasemission bereits volle Sättigung mit spektralen Intensitäten vergleichbar zu der spektralen Emission der Erdplatte in diesem Spektralbereich.

Relativ zu der Gesamtintensität der Atmosphärenplatte steigt die Rückstrahlung um $24,2 \text{ W}/\text{m}^2$, das sind 9,1% (bezogen auf $266 \text{ W}/\text{m}^2$). Diese größere Rückstrahlung ist nahezu identisch mit den Verlusten in Vorwärtsrichtung, so dass innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit die Gesamtbilanz aus Absorption und Emission des Gases Null ist.

Dies ist ein weiterer wichtiger Aspekt, der gegen die Messung der Gastemperatur zum Nachweis des THE spricht. Andererseits ist es unter den gegebenen Bedingungen und mit der hier vorgestellten

Apparatur sehr wohl möglich und realistisch, die vom Gas durch eine Erwärmung der Erdplatte emittierte Strahlung nachzuweisen.

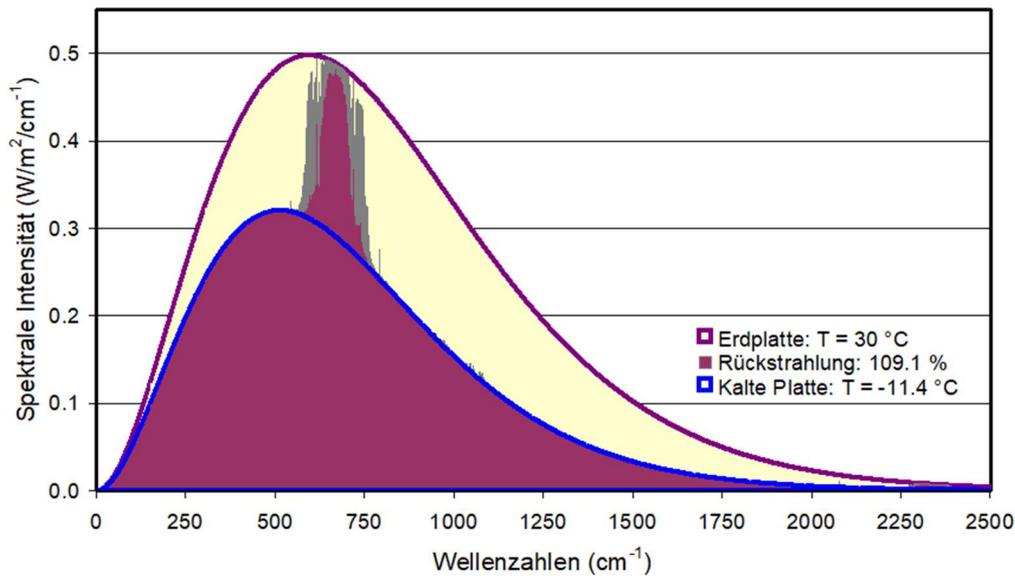


Abb. 5: Strahlungs-Transfer-Rechnung für 20 % CO₂ in Luft über 111 cm für einen Temperaturanstieg von 0,373 °C/cm: Rückstrahlung von Atmosphärenplatte und Gas (Rot-Braun), Strahlung nur von Atmosphärenplatte (Blau) und spektrale Intensität der Erdplatte (Rot-Gelb).

5. Messungen

Es wurden die TH-Gase CO₂, CH₄ und N₂O über einen weiten Bereich mit Konzentrationsänderungen bis zum 16-fachen der Ausgangskonzentration untersucht.

Bei allen Experimenten beträgt die Temperatur der Atmosphärenplatte -11,4°C und wird während eines Experiments nicht verändert. In einer Vorbereitungsphase wird die elektrische Heizung H_E der Erdplatte über die ersten 6 - 8 Stunden so lange geregelt, bis die Temperatur der Erdplatte exakt 30,0°C beträgt. Bevor ein TH-Gas in die Kammer gegeben wird, müssen alle Komponenten des Aufbaus ein thermisches Gleichgewicht erreichen, das kontrolliert wird durch Temperaturmessungen, die während der ersten 60 Minuten vor der Zugabe des Probengases durchgeführt werden. Die Genauigkeit der Temperaturablesung liegt bei $\pm 0,13^\circ\text{C}$, was durch unabhängige Messungen und Mittelung über mehrere Durchläufe weiter gesteigert werden kann.

Nach dem Befüllen der Kammer mit einem TH-Gas wird die eigentliche Messung gestartet, indem die Temperatur der Erdplatte und als weitere Kontrolle auch Temperaturen an verschiedenen Positionen über der Gassäule und an der Atmosphärenplatte aufgezeichnet werden. Dies geschieht ohne Eingriff von außen, bis sich wieder ein Gleichgewicht und eine konstante Temperaturerhöhung ΔT_E der Erdplatte einstellt. Anschließend wird die elektrische Heizung soweit reduziert, bis sich wieder 30°C an der Erdplatte eingestellt haben. Dies erlaubt eine direkte Messung der Rückstrahlung als Differenz der erforderlichen elektrischen Erwärmung ΔH_E der Erdplatte.

Abb. 6 repräsentiert einen typischen Messverlauf, hier für 10% CO₂ über die gesamte Aufnahmezeit. Die verschiedenen Graphen zeigen die gemessenen Temperaturen von der Erdplatte (Rot), der Kuppel (Grün), dem Gas an verschiedenen Positionen über den Strahlungskanal ($T_1 - T_4$) und der Labortemperatur.

Während der Befüllungs- und Umpumpphase des Gases können kleinere Temperaturabweichungen über die Gassäule beobachtet werden, aber wenn dieses Recycling beendet wird, kehren alle Temperaturen außer T_E auf ihre Ausgangsposition zurück. Nach 220 Minuten wird die elektrische Plattenheizung reduziert, bis die Erdplattentemperatur wieder 30°C erreicht.

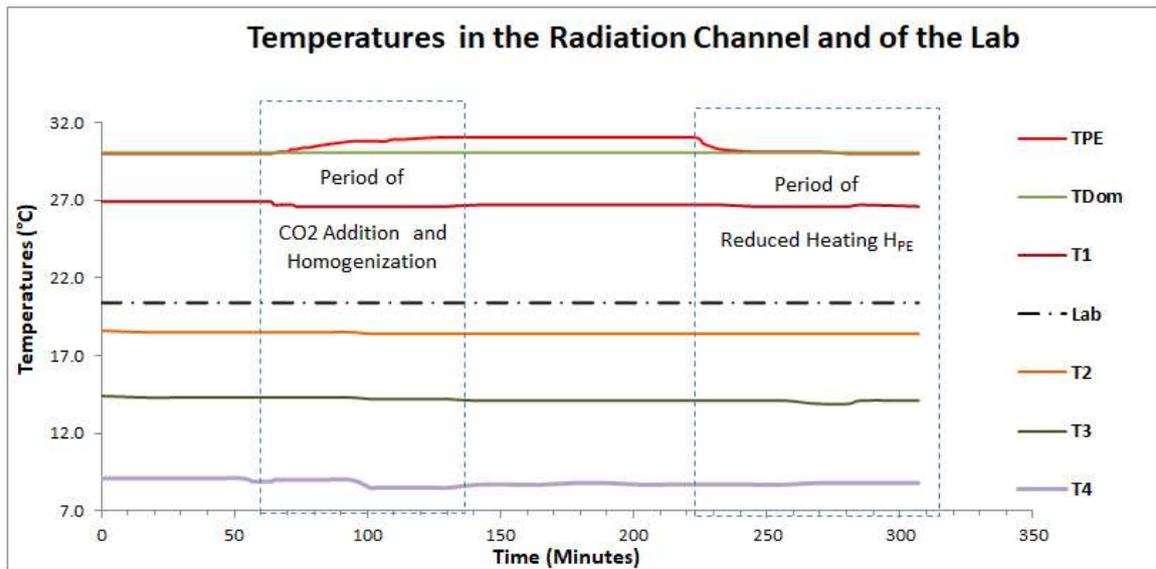


Abb. 6: Typischer Messzyklus, hier für 10 % CO₂ in trockener Luft. Aufgetragen sind die Temperaturen der Erdplatte (Rot), der Kuppel (Grün), der Gastemperatur an 4 Positionen (T₁ - T₄) und der Labortemperatur (Schwarz).

Aus Kontrollmessungen mit verschiedenen Edelgasen zeigt sich, dass Änderungen in der Wärmeleitfähigkeit vernachlässigbar sind und die Änderungen in H_E direkt die vom Gas zusätzlich emittierte Strahlung repräsentiert.

5.1 CO₂-Messung

Um die Strahlungswirkung von CO₂ und damit den Einfluss von CO₂ auf eine mögliche Erwärmung der Erde genauer zu quantifizieren, wurden Messungen mit zunehmender Konzentration über einen größeren Bereich von 1,25% bis zu 20% in trockener Luft durchgeführt. Von einer Messung zur nächsten wird die Konzentration jeweils verdoppelt bis auf das 16-fache der Anfangskonzentration. Alle Messungen stellen den Durchschnitt von 5 unabhängigen Messdurchgängen dar. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abb. 7 zusammengefasst.

Dargestellt ist die gemessene Temperaturerhöhung ΔT_E als Funktion der CO₂-Konzentration (Blaue Rauten) und als direkter Vergleich die berechnete Temperaturänderung $\Delta T_E = \lambda_E f_{CO_2} \Delta I_{CO_2}$ (Magenta Quadrate) mit ΔI_{CO_2} als zusätzliche Abstrahlung des Gases unter Berücksichtigung eines Transmissionsgrads von $f_{CO_2} = 59\%$ und der Nachweisempfindlichkeit der Erdplatte mit $\lambda_E = 0.083 \text{ °C/W}\cdot\text{m}^2$. Ebenfalls ist die berechnete CO₂-Intensitätsänderung ΔI_{CO_2} (Grüne Dreiecke) aufgeführt.

Trotz des kurzen Ausbreitungsweges zeigen die Messungen wie Rechnungen mit steigender CO₂-Konzentration eine deutliche Sättigung. Die Temperaturänderung ΔT_E kann sehr gut durch eine logarithmische Funktion der Form

$$\Delta T_E(C_{CO_2}) = \Delta T_0 + \lambda_E \cdot f_{CO_2} \cdot \Delta F_{2 \times CO_2} \cdot \ln(C_{CO_2} / C_0) / \ln 2 \quad (1)$$

dargestellt werden mit ΔT_0 als Temperaturerhöhung bei der Konzentration C_0 , hier 1,25%, und $\Delta F_{2 \times CO_2}$ als Strahlungsantrieb bei einer jeweiligen Verdopplung der CO₂-Konzentration. Abb. 7a) zeigt einen logarithmischen Fit für $\Delta T_0 = 0,45 \text{ °C}$ und $\Delta F_{2 \times CO_2} = 3,70 \pm 0,05 \text{ W/m}^2$ (Braune Kreuze). und steht auf den ersten Blick in hervorragender Übereinstimmung mit der Literatur (Myhre et al. 1998 [15]), wird hier allerdings unter anderen Bedingungen ermittelt (siehe Diskussion).

Die reduzierte Plattenheizung ΔH_E als unabhängige Messung der CO₂-Rückstrahlung ist in Abb. 7b) aufgetragen (Blaue Rauten). Sie kann direkt mit der berechneten Rückstrahlung $f_{CO_2} \Delta I_{CO_2}$ (Grüne Dreiecke) mit f_{CO_2} als freier Parameter zur Anpassung an die Messungen verglichen werden. Aus diesem Fit leitet sich der Anteil $f_{CO_2} = 0,59$ der Emission des Gases als Volumenstrahler ab.

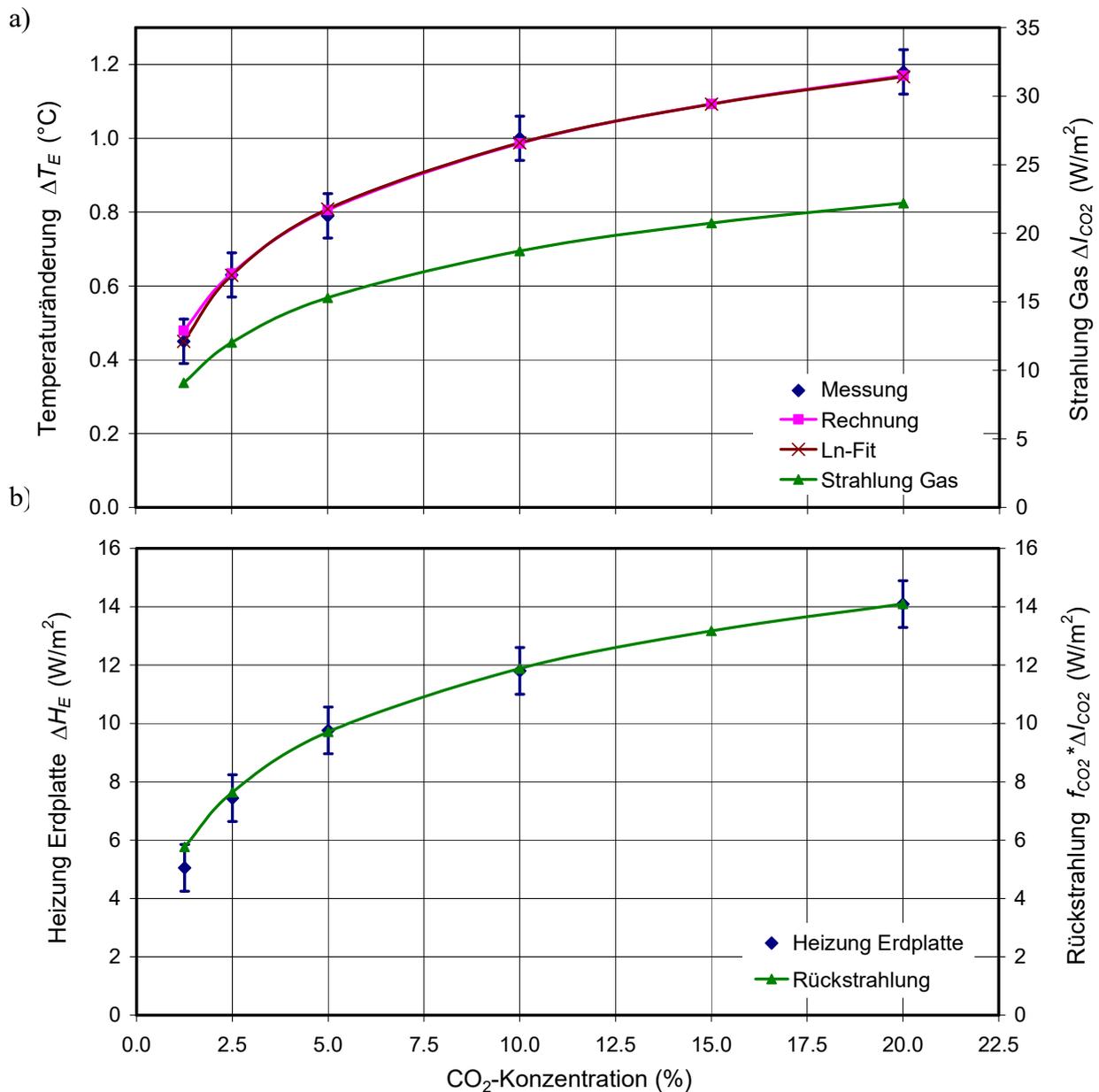


Abb. 7: a) Gemessene Temperaturänderung der Erdplatte als Funktion der CO₂-Konzentration in trockener Luft (Blaue Rauten) und Rechnung (Magenta Quadrate). Überlagert ist ein logarithmischer Fit (Braune Kreuze) und die ST-Rechnung der Rückstrahlung ΔI_{CO_2} . b) Vergleich der gemessenen Plattenheizung ΔH_E (Blaue Rauten) und berechnete Rückstrahlung unter Berücksichtigung der Strahlungsverluste mit $f_{CO_2} \cdot \Delta I_{CO_2}$ für $f_{CO_2} = 0,59$ (Grün).

5.2 Methan-Messung

Die Messungen mit CH₄ als Probegas wurden unter gleichen experimentellen Bedingungen wie für CO₂ durchgeführt und die Konzentration des Gases von 1,25 % bis 10 % variiert. In Abb. 8 ist die gemessene Temperaturänderung ΔT_E der Erdplatte (Blaue Rauten) zusammen mit der entsprechenden Rechnung (Magenta) und einem logarithmischen Fit (Braun) als Funktion der Konzentration wiedergegeben. Die berechnete CH₄-Abstrahlung ΔI_{CH_4} ist ebenfalls aufgeführt (Grüne Dreiecke).

Auch hier zeigt sich bereits eine deutliche Sättigung, die bis auf die Konzentration um 1,25% gut durch eine logarithmische Funktion beschrieben werden kann. Für den CH₄-Strahlungsantrieb ergibt sich hieraus ein Wert von $\Delta F_{2 \times CH_4} = 2,75 \text{ W/m}^2$, der unter sonst vergleichbaren Bedingungen nur 74% von CO₂ beträgt.

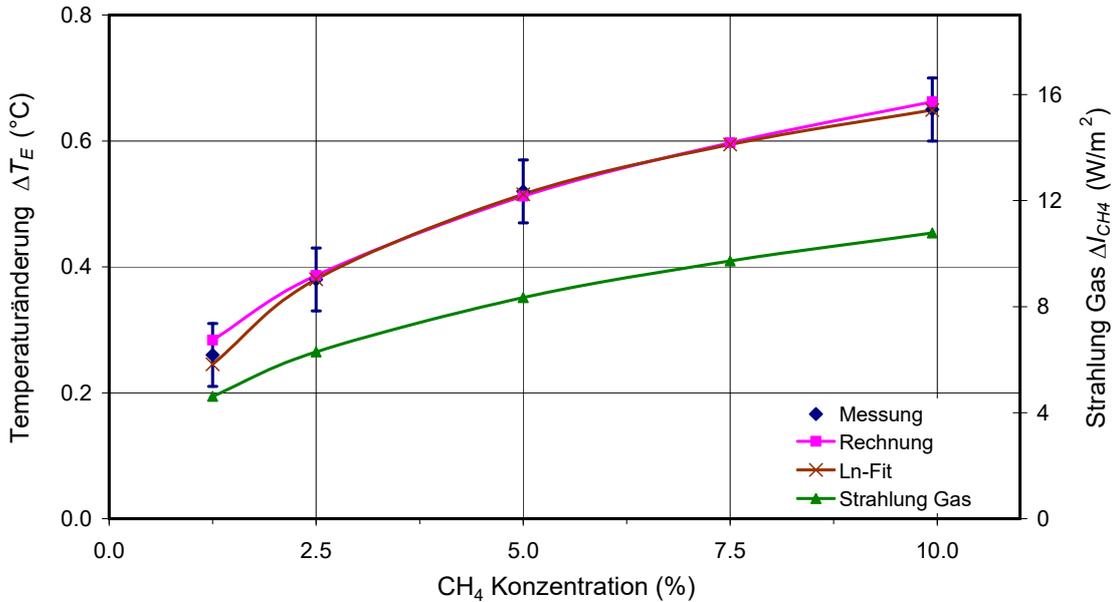


Abb. 8: Gemessene Temperaturänderung der Erdplatte als Funktion der CH₄-Konzentration in trockener Luft (Blaue Rauten) und entsprechende Berechnung (Magenta). Überlagert ist ein logarithmischer Fit (Braun) und die ST-Rechnung der rückgestrahlten Intensität ΔI_{CH_4} (Grün).

5.3 Lachgas

Die Messungen für N₂O wurden mit einer Konzentration zwischen 1.25% und 15% durchgeführt. Abb. 9 zeigt die gemessene Temperaturänderung ΔT_E der Erdplatte mit steigender N₂O-Konzentration (Blaue Rauten) und kann mit der berechneten Temperaturänderung $\Delta T = \lambda_E \cdot f_{N_2O} \cdot \Delta I_{N_2O}$ (Magenta) verglichen werden. Die berechnete N₂O-Abstrahlung ΔI_{N_2O} ist als grüner Graph dargestellt.

Die gemessene Temperatur lässt sich ebenfalls gut durch eine logarithmische Kurve (Braun) anpassen und ergibt einen N₂O-Strahlungsantrieb bei Verdopplung der Konzentration von $\Delta F_{2xN_2O} = 5.0 \text{ W/m}^2$, der unter diesen Bedingungen um 35% größer ausfällt als der Antrieb für CO₂.

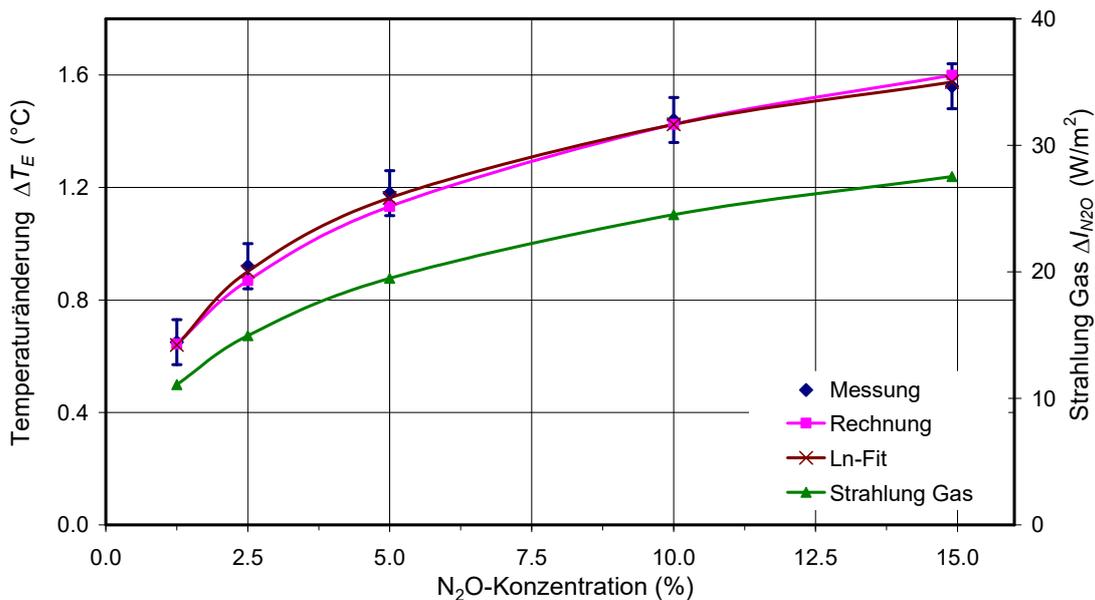


Abb. 9: Gemessene Temperaturänderung der Erdplatte als Funktion der N₂O-Konzentration in trockener Luft (Blaue Rauten) und entsprechende Berechnung (Magenta). Überlagert ist ein logarithmischer Fit (Braun) und die ST-Rechnung der rückgestrahlten Intensität ΔI_{N_2O} (Grün).

6. Diskussion der Ergebnisse

6.1 Unterschiede zur Atmosphäre

Es hat sich gezeigt, dass für den Nachweis des atmosphärischen THE im Labor der vorgestellte Versuchsaufbau gut geeignet ist. Obwohl die Weglänge durch die Atmosphäre etwa um den Faktor 80.000 größer als die Messkammer ist, wird dies durch eine 500x höhere Konzentration für CO_2 , und eine 50.000x höhere CH_4 -Konzentration teilweise kompensiert und für N_2O sogar mit fast 500.000x höherer Konzentration im Vergleich zu den Meeresspiegel-Werten deutlich überkompensiert. Dabei sind nicht so sehr die Absolutwerte relevant, sondern der optische Weg, der mit dem Absorptionskoeffizienten \times Weglänge skaliert.

Andererseits ist der Temperaturgradient (Lapse Rate) über der Troposphäre mit $6,5^\circ\text{C}/\text{km}$ 5.700x kleiner als in unserem Experiment, während die absolute Temperaturdifferenz fast vergleichbar ist.

Am wichtigsten für den Nachweis des THE und der Rückstrahlung von IR-aktiven Gasen ist jedoch deren Emission bei gleichzeitigen Stoßprozessen und dies unter Bedingungen, wie sie in der unteren Troposphäre anzutreffen sind. Die Experimente bestätigen definitiv, dass TH-Gase auf ihren Übergängen strahlen und innerhalb einer optisch dicken Schicht sogar vergleichbar zu einem Schwarzkörperstrahler mit gleicher Temperatur wie das Gas emittieren.

6.2 Einfluss der Hintergrundstrahlung

Unter realen atmosphärischen Bedingungen wird die Rückstrahlung der TH-Gase von der spektral deutlich breiteren Emission von Wolken überlagert, die in erster Näherung als graue Strahler bei der Temperatur T_W und mit einer spektralen Verteilung entsprechend einer Planck-Funktion emittieren, nur mit einem Emissionsgrad < 1 . Dies kann weiter durch Mie-Streuung von Aerosolen oder Nebel überdeckt werden, und zusammen verstärken sie so die beobachtete Rückstrahlung deutlich.

In unserem Experiment werden Wolken und jegliche Rückstreuung durch die Atmosphärenplatte sowie die Wände repräsentiert, deren Strahlung zusätzlich zu der TH-Gas-Emission von der Erdplatte absorbiert wird. Diese Gesamtrückstrahlung ändert sich stark mit der Temperatur der Atmosphärenplatte T_A (s. Strahlung der Atm-Platte, Abb. 4) und simuliert auf diese Weise den Einfluss unterschiedlich hoher Wolken und damit Temperaturen. Aber dies wirkt sich auch auf die Größe des TH-Gas-Beitrags aus, der von der Temperaturdifferenz zwischen den Platten und damit von der 'Lapse Rate' abhängt. Dieser Beitrag verändert sich gerade entgegengesetzt zum Anteil der Atm-Platte. Übertragen auf die Atmosphäre bedeutet dies, dass bei Wolken die Rückstrahlung deutlich größer ist als bei klarem Himmel, der Beitrag der TH-Gase dagegen abnimmt.

6.3 Reproduzierbarkeit und Genauigkeit

Die Reproduzierbarkeit der Messungen hängt stark von den Gleichgewichtsbedingungen des Aufbaus vor dem Befüllen der Messkammer mit dem TH-Gas ab, und dies gilt auch für die weitere Aufzeichnung von Daten. Die Temperaturanzeige ist auf $\pm 0,13^\circ\text{C}$ begrenzt und bestimmt somit wesentlich die Genauigkeit der Messungen. Auch die elektrische Plattenheizung wird durch die Temperaturablesung beeinflusst, da jede Anfangs- und Endaufzeichnung zur Ermittlung der Differenz ΔH_E zwei Temperaturmessungen erfordert. Dies ist der Hauptgrund für kleinere Abweichungen von einem Messdurchlauf zum nächsten. Zusätzliche Störungen gehen auf geringfügige Schwankungen der Raumtemperatur zurück, die innerhalb von $\pm 0,2^\circ\text{C}$ geregelt werden kann.

Den Fehler für eine Einzelmessung der Temperaturänderung ΔT_E und der reduzierten Plattenerwärmung ΔH_E schätzen wir bei den niedrigeren Konzentrationen auf $\pm 20\%$ und bei den höheren Konzentrationen auf etwa $\pm 10\%$ ab. Die Gesamtgenauigkeit wird jedoch durch mehrmaliges Wiederholen der Messungen weiter verbessert. Alle Daten stellen das Mittel aus 5 Durchläufen dar. Dies ermöglicht es, den allgemeinen Trend einer Serie innerhalb von $\pm 5\%$ zu bestimmen.

6.4 Vergleich mit Theorie

Für einen direkten Vergleich der Messungen mit einer Rechnung sind die Temperatursensitivität λ_E und der von der Erdplatte absorbierte Anteil f_G der Gasemission als Volumenstrahler die wichtigsten Parameter. Während λ_E in Abwesenheit eines TH-Gases direkt aus der Steigung des gemessenen Temperaturanstiegs als Funktion der elektrischen Heizung abgeleitet werden kann, erfordert f_G als Verhältnis von $\Delta H_E/\Delta I_G$ eine Messung mit den jeweiligen TH-Gasen. Allerdings kann der emittierte Anteil eines Gases dabei nicht allein aus einer solchen Messung abgeleitet werden, dazu wäre ein bekannter Volumenstrahler als Referenz erforderlich. Auch der absorbierte Anteil der von der Atm-Platte emittierten Strahlung mit $f_A \approx 74\%$ kann dabei nur als erste Orientierung dienen. Stattdessen verwenden wir als Referenz die berechnete Emission des Gases. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich von ΔH_E mit $f_G \cdot \Delta I_G$, wie als Beispiel in Abb. 7b) dargestellt, und aus einer Anpassung der theoretischen Kurve an die gemessenen Daten wird hieraus f_G ermittelt.

Die gute Übereinstimmung für die drei Gase mit den Berechnungen zeigt sich sowohl bei den Temperaturdaten als auch bei der Ermittlung der Heizleistung. Insbesondere die zunehmende Sättigung und die charakteristische Abflachung mit steigender Gaskonzentration wird durch die Berechnungen gut bestätigt und schließt eine erkennbare Beeinflussung durch Wärmeleitung aus. Gleichzeitig demonstrieren diese Messungen den nur geringen weiteren Einfluss auf die globale Erwärmung mit steigenden TH-Gas-Konzentrationen.

Während sich die absolute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Daten erklärt aus der Kalibrierung von f_G über die theoretische Referenz, ist die nahezu exakte Übereinstimmung des abgeleiteten Strahlungsantriebs für CO₂ mit $\Delta F_{2 \times \text{CO}_2} = 3,70 \text{ W/m}^2$ eher eine zufällige Koinzidenz mit der Literatur, da der hier ermittelte Wert unter deutlich anderen Bedingungen abgeleitet wurde.

Ein mit unserer Messung vergleichbares Szenario wäre eine Erd-Oberflächentemperatur von $T_E = 30^\circ\text{C}$, eine dichte Wolkendecke in 5.200 m Höhe, eine CO₂-Konzentration von 42,7 ppm und keine anderen TH-Gase in der Atmosphäre. Die Wolkendecke in dieser Höhe hat dann eine Temperatur von $-11,4^\circ\text{C}$ und strahlt mit 266 W/m^2 (bei Annahme von 100% Emissionsgrad), während die niedrigere CO₂-Konzentration über einen Weg von 5,2 km einen vergleichbaren optischen Weg zum Experiment ($20\% \times 1,11 \text{ m}$) gewährleistet. Eine Simulation unter diesen Bedingungen reproduziert nahezu die Messung mit einer CO₂-induzierten Rückstrahlung von $23,5 \text{ W/m}^2$ und einem Strahlungsantrieb bei Verdopplung der Konzentration von 21,35 ppm auf 42,7 ppm mit $\Delta F_{2 \times \text{CO}_2} = 3,74 \text{ W/m}^2$. Dies beinhaltet bereits eine Korrektur aufgrund des mit der Höhe abnehmenden Drucks und damit eine geringere Druckverbreiterung, die den Strahlungsantrieb um etwa $0,2 \text{ W/m}^2$ reduziert, während der Druck in unserer Messung und Berechnung als konstant angenommen wurde.

Ein deutlich größerer Einfluss auf die Rückstrahlung und den Strahlungsantrieb geht jedoch von anderen TH-Gasen in der Atmosphäre aus, insbesondere von Wasserdampf. Unter den oben genannten Bedingungen und unter der Annahme von nur etwa einem Zehntel der regulären Konzentration von H₂O, CH₄ und N₂O (um das Verhältnis zu CO₂ zu wahren) steigt die Rückstrahlung um 80 W/m^2 an, während der CO₂-induzierte Antrieb um 1 W/m^2 auf $2,71 \text{ W/m}^2$ abnimmt (Abb. 10).

Wird die obige Berechnung mit den tatsächlichen Konzentrationen der TH-Gase (CO₂: 400 ppm; H₂O: 1,46 %; CH₄: 1,8 ppm; N₂O: 0,3 ppm) wiederholt, steigt die Rückstrahlung weiter auf 418 W/m^2 , das entspricht 87,5 % der Erd-Oberflächenemission (478 W/m^2), aber aufgrund der stark überlappenden und gesättigten Absorptionsbanden reduziert sich dabei der Strahlungsantrieb von CO₂ auf $\Delta F_{2 \times \text{CO}_2} = 2,06 \text{ W/m}^2$. Bei einer Bodentemperatur von 16°C sinkt er weiter auf $1,47 \text{ W/m}^2$.

Ein realistischeres Szenario mit einer globalen mittleren Erdtemperatur von 16°C , einer mittleren Bewölkung von 66% und einem Wolkenemissionsgrad von 63% erhöht den Antrieb um $1,06 \text{ W/m}^2$. Wird schließlich der Strahlungsantrieb auf die Obergrenze der Atmosphäre (TOA) bezogen, wie dies bevorzugt in der Literatur angegeben wird, und dabei eine Konzentrationsverdopplung zugrunde gelegt, die ausgeht vom vorindustriellen Wert mit 280 ppm, ergibt sich letztlich ein Wert von $\Delta F_{2 \times \text{CO}_2} = 3,4 \text{ W/m}^2$ (Abb. 10).

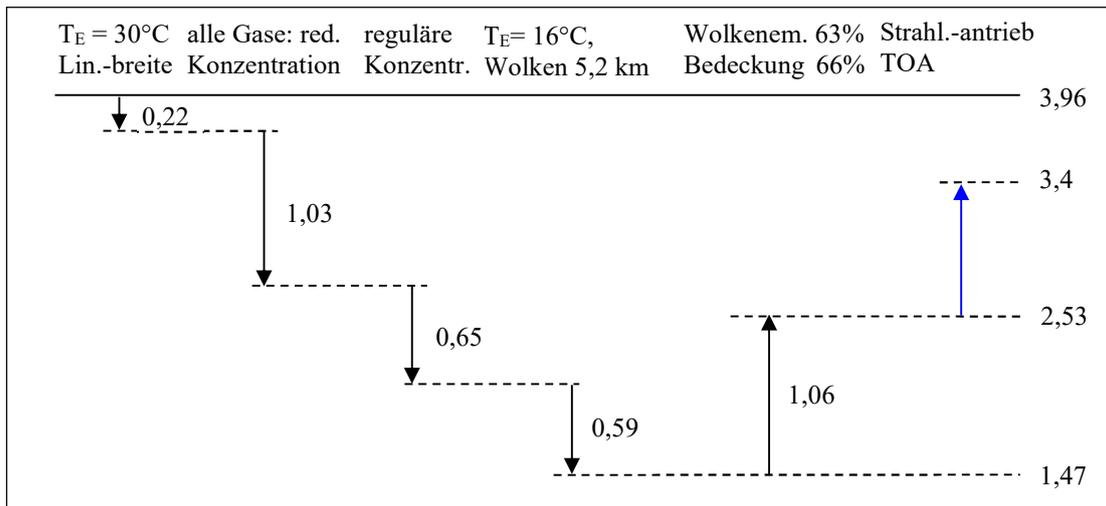


Abb.10: Änderungen des Strahlungsantriebs ΔF_{2xCO_2} in W/m^2 verursacht durch verschiedene Einwirkungen. Schwarze Pfeile zeigen Änderungen in der Rückstrahlung an, der blauer Pfeil den Strahlungsantrieb an der Obergrenze der Atmosphäre (TOA).

Die Fast-Koinzidenz des im Experiment ermittelten Strahlungsantriebs bei so unterschiedlichen Bedingungen zur Atmosphäre muss daher sicher als Zufall gesehen werden. Dennoch ist dies eine wichtige Orientierung, und sowohl die Rückstrahlung durch CO_2 als auch die fast logarithmische Variation des Strahlungsantriebs bei Konzentrationsänderungen, wie sie von den Berechnungen erwartet werden, können durch unsere Messungen gut bestätigt werden. Mit einer Planck-Sensitivität von $\lambda_P = 0,31 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2)$, wie vom IPCC spezifiziert (AR6 [1]) und ohne Rückkopplungen, ergibt sich eine Basis-Gleichgewichts-Klimasensitivität von $ECS_B = \lambda_P \cdot \Delta F_{2xCO_2} \approx 1,05^\circ\text{C}$. Detaillierte eigene Untersuchungen zeigen überdies (Harde 2017 [16]), dass im Unterschied zu den Annahmen des IPCC Wasserdampf nur zu einer marginalen positiven Rückkopplung beiträgt und Evaporation an der Erdoberfläche zu einer deutlichen weiteren Reduzierung der Gleichgewichts-Klimasensitivität auf nur $ECS = 0,7^\circ\text{C}$ führt, im Unterschied zu dem vom IPCC im letzten Sachstandsbericht spezifizierten Wert von 3°C und den Angaben des Coupled-Model-Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) mit $3,78^\circ\text{C}$.

Entsprechende Werte für CH_4 und N_2O können nur indirekt mit der Literatur verglichen werden, da hierfür nur Werte für den ppb-Bereich angegeben werden, bevor Sättigungseffekte auftreten.

6.5 Anmerkung zu CH_4

Das IPCC gibt Methan als ein Gas mit einem besonders großen Erwärmungspotential an. So wird die Strahlungseffizienz von CH_4 mit $3,7 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2/\text{ppb}$ als 25x größer eingestuft als die von CO_2 mit $1,4 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2/\text{ppb}$. Solche Werte werden aus dem sich ändernden Absorptionsvermögen oder Emissionsvermögen der Gase abgeleitet, wenn sich ihre Konzentration um 1 ppb (Anteil pro Milliarden) ändert. Dem liegt allerdings zugrunde, dass zwei Gase unter völlig unterschiedlichen Bedingungen verglichen werden: CH_4 mit einer Konzentration von 1,8 ppm und CO_2 mit einer 200-fach höheren Konzentration, wenn es bereits stark gesättigt ist. Auch die Interferenz mit anderen Treibhausgasen, insbesondere mit Wasserdampf, ist für beide Gase völlig unterschiedlich und wird dabei nicht berücksichtigt. Nur diese sehr unterschiedlichen Bedingungen täuschen eine viel höhere Strahlungseffizienz von Methan vor.

Dagegen sinkt bei einer Konzentration von 400 ppm in der Atmosphäre oder bei 10% im Laborexperiment die Strahlungseffizienz von CH_4 auf etwa 75% des Wertes von CO_2 . Nur aufgrund der unterschiedlichen Sättigung auf ganz verschiedenen Skalen wird für CH_4 ein 25x größeres Treibhauspotential angenommen, während eine realistischere Betrachtung mit jeweils einer Verdopplung der tatsächlichen CH_4 -, N_2O - und CO_2 -Konzentrationen zeigt, dass CH_4 nicht mehr als etwa 2% und N_2O lediglich etwa 1% relativ zu CO_2 zur globalen Erwärmung beiträgt.

7. Schlussbemerkungen

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen erstmals einen eindeutigen Nachweis des atmosphärischen Treibhauseffekts in einem Laborexperiment, das auch quantitative Messungen unter Bedingungen wie in der unteren Troposphäre erlaubt. Wir verwenden einen Versuchsaufbau, bestehend aus zwei Platten in einem geschlossenen Gehäuse, eine Platte in der oberen Position, die auf 30°C erwärmt ist, und eine untere Platte, die auf -11,4°C gekühlt wird. Die Platten haben einen Abstand von 1,11 m zueinander, und der Tank kann mit den zu untersuchenden Gasen gefüllt werden, um die Strahlungsübertragung zwischen den Platten zu untersuchen. Dieser Aufbau eliminiert weitgehend Konvektion oder Wärmeleitung und ermöglicht es, die Emission der TH-Gase als zusätzliche Erwärmung der beheizten Platte durch Rückstrahlung der Gase reproduzierbar zu untersuchen. Es wurden die TH-Gase Kohlendioxid, Methan und Lachgas als Funktion der Gaskonzentration untersucht. Zusätzlich und unabhängig von den Temperaturmessungen wird die Rückstrahlung der TH-Gase direkt als reduzierte elektrische Heizung der oberen Platte erfasst.

Die Messungen zeigen sehr klar, dass entgegen dem oft falsch interpretierten 2. Hauptsatz der Thermodynamik ein wärmerer Körper weiter erwärmt werden kann, indem die Strahlung eines kälteren Körpers, hier die Strahlung der gekühlten Platte und eines TH-Gases, absorbiert wird. Die Messungen werden durch umfangreiche Strahlungs-Transfer-Rechnungen gut bestätigt, die in voller Übereinstimmung mit den aufgezeichneten Temperatur- und elektrischen Heizdaten stehen, dies in absoluten Zahlen und über den gesamten Verlauf als Funktion der Gaskonzentrationen. Eine merkliche Beeinflussung der Energiebilanz durch Wärmeleitung kann durch Kontrollexperimente mit Edelgasen ausgeschlossen werden.

Gleichzeitig offenbaren die theoretischen Untersuchungen die prinzipiellen Schwierigkeiten, den TH-Effekt als steigende Temperatur des Gases zu messen. Eine genauere Untersuchung zeigt, dass solche Versuche lediglich eine Erwärmung durch Absorption von Nah-IR- oder IR-Licht über die Kammerwände zeigen, während nur zu einem geringeren Grad Absorption durch die Gase erfolgt. Solche Experimente übersehen, dass der Treibhauseffekt hauptsächlich das Ergebnis einer Temperaturdifferenz über den Ausbreitungsweg der Strahlung und damit der 'Lapse Rate' in der Atmosphäre ist. Ein verminderter THE bei reduzierter Temperaturdifferenz zwischen den Platten und wie sie etwa durch Wolken in der Atmosphäre erfolgt, lässt sich klar nachweisen.

Aus unseren Messungen und deren Vergleich mit den Berechnungen leiten wir den Strahlungsantrieb der Gase bei Verdoppelung ihrer Konzentration ab. Dies ist ein wichtiges Maß zur Charakterisierung des Emissionsgrades der Gase bei höheren Konzentrationen, wenn bereits eine stärkere Sättigung der Absorptionsbanden beobachtet wird, dient aber auch als relatives Maß bei niedrigeren Konzentrationen. Die gefundenen Strahlungsantriebe stimmen gut mit Literaturwerten überein, sind aber zum Teil auch das Ergebnis einer Kalibrierung des Aufbaus über die Spektralberechnungen. Unabhängig hiervon lässt sich klar eine deutliche Sättigung in Form eines annähernd logarithmischen Temperaturanstieg mit zunehmender Konzentration der Gase nachweisen.

Wasserdampf als das mit Abstand stärkste TH-Gas in der Atmosphäre konnte in unserem Aufbau nicht untersucht werden. Dies würde einige grundlegende Modifikationen erfordern, um ein ähnliches Wasserdampf-Profil wie in der Atmosphäre zu realisieren und insbesondere eine Kondensation an der Kühlplatte zu vermeiden. Es wäre jedoch sehr wünschenswert, auch für dieses TH-Gas quantitative Messungen zusammen mit CO₂ als Gemisch durchzuführen, um die gegenseitige Abhängigkeit dieser Gase in ihren überlappenden Absorptionsspektren zu untersuchen und dadurch zuverlässigere Daten über ihre Wirkung auf unser Klima zu sammeln. Solche Untersuchungen wären sehr hilfreich zur Objektivierung der weiteren Klimadebatte.

Bereits die vorgestellten Messungen und Berechnungen zeigen aber aufgrund der starken Sättigung den nur geringen Einfluss auf die globale Erwärmung bei steigenden TH-Gaskonzentrationen. Überdies ergeben detaillierte eigene Rechnungen unter Berücksichtigung insbesondere der stark negativen Evaporations-Rückkopplung eine insgesamt weitere Absenkung der Gleichgewichts-Klima-

sensitivität auf nur $ECS = 0,7^{\circ}\text{C}$. Dies ist gegenüber dem letzten Klima-Sachstandsbericht des IPCC mit $ECS = 3^{\circ}\text{C}$ weniger als ein viertel und gegenüber dem mittleren Wert von CMIP6 mit $ECS = 3,78^{\circ}\text{C}$ um 5,4x niedriger.

Daher ist es höchste Zeit, unsere Gesellschaft nicht weiter durch manipulierte Experimente, Videos (siehe etwa Ref. 11) oder Berichte einseitig oder sogar falsch zu informieren - nur um Panik zu erzeugen -, sondern sie mit gesicherten Erkenntnissen über die Wirkung und auch den Nutzen von TH-Gasen zu konfrontieren. Dann können Schüler und Erwachsene entscheiden, ob es sich lohnt, auf der Straße weiter für ein stabiles Klima zu demonstrieren, das offensichtlich hauptsächlich durch natürliche Einflüsse gesteuert wird (siehe z.B. Connolly et al. 2021 [17]; Harde 2022 [18]). Auch können sie entscheiden, ob wir wirklich auf einem Planeten leben, der nur gerettet werden kann, indem alle Emissionen aus fossilen Brennstoffen gestoppt werden, dies ohne eine realistische Perspektive für eine sichere und gesunde Zukunft.

Langfristig ist eine wirtschaftliche Umstellung auf neue Formen der Energiegewinnung, gleich welcher Art, unvermeidlich, da die Vorräte an fossilen Energieträgern endlich sind und insbesondere Deutschland seine einseitige Abhängigkeit von solchen Importen zu überdenken hat. Es besteht jedoch keine Notwendigkeit, diesen Prozess aus klimatischen Gründen blind voranzutreiben; andernfalls droht eine De-Industrialisierung, die dann wirklich eine düstere Zukunft für die nächsten Generationen auslösen würde. Es ist daher höchste Zeit, zu einer konsolidierten Klimadiskussion zurückzukehren, die sich auf Fakten konzentriert und auch die Vorteile von TH-Gasen einbezieht.

Referenzen

1. Sixth Assessment Report (AR6) of the 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 [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf
2. J. B. Fourier, 1824: *Remarques Générales Sur Les Températures Du Globe Terrestre Et Des Espaces Planétaires*. In: *Annales de Chimie et de Physique*, Vol. 27, 1824, S. 136–167. https://books.google.co.uk/books?id=1Jg5AAAACAAJ&pg=PA136&hl=pt-BR&source=gbs_selected_pages#v=onepage&q&f=false
3. R. W. Wood, 1909: *Note on the Theory of the Greenhouse*, London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine, Vol. 17, pp. 319-320.
4. T. Allmendinger, 2006: *The thermal behaviour of gases under the influence of infrared-radiation*, Int J Phys Sci 11: 183-205, <https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/E00ABBF60017>
5. N. S. Nahle, 2011: *Repeatability of Professor Robert W. Wood's 1909 experiment on the Theory of the Greenhouse*, Biology Cabinet Online-Academic Resources and Principia Scientific International, Monterrey, N. L. https://principia-scientific.org/publications/Experiment_on_Greenhouse_Effect.pdf
6. V. R. Pratt, 2020: *Wood's 1909 greenhouse experiment, performed more carefully*, <http://clim.stanford.edu/WoodExpt/>
7. E. Loock, 2008: *Der Treibhauseffekt - Messungen an einem Wood'schen Treibhaus*, <https://docplayer.org/30841290-Der-treibhauseffekt-messungen-an-einem-wood-schen-treibhaus-von-ehrenfried-loock-version.html>
8. T. O. Seim, B. T. Olsen, 2020: The Influence of IR Absorption and Backscatter Radiation from CO₂ on Air Temperature during Heating in a Simulated Earth/Atmosphere Experiment, Atmospheric and Climate Sciences, 10, pp. 168-185, <https://doi.org/10.4236/acs.2020.102009>.
9. H. von Dittfurth, 1978: Treibhauseffekt, Studio-Demonstration in der ZDF Fernseh-Serie

"Querschnitte".

10. M. Schnell, 2020: *Die falschen Klimaexperimente*,
<https://www.eike-klima-energie.eu/2020/11/06/die-falschen-klima-experimente/>
11. A. Gore, D. Guggenheim, 2006: *An Inconvenient Truth*, Movie,
<https://www.imdb.com/title/tt0497116/>
12. A. Watts, 2011: *Replicating Al Gore's Climate 101 video experiment shows that his "high school physics" could never work as advertised*,
<https://wattsupwiththat.com/2011/10/18/replicating-al-gores-climate-101-video-experiment-shows-that-his-high-school-physics-could-never-work-as-advertised/?cn-reloaded=1>
13. J.-E. Solheim, 2016: *Start des zweitägigen „Al Gore-Experiments“*, 10. Internationale Klima- und Energie-Konferenz (10. IKEK), EIKE, Berlin,
<https://www.eike-klima-energie.eu/2017/02/04/10-ikek-prof-em-jan-erik-solheim-start-des-zweitaegigen-al-gore-experiments/>
14. H. Harde, 2013: *Radiation and Heat Transfer in the Atmosphere: A Comprehensive Approach on a Molecular Basis*, Intern. Journal of Atmospheric Sciences, vol. 2013, Article ID 503727, 26 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/503727>
15. G. Myhre, E. J. Highwood, K. P. Shine, and F. Stordal, 1998: *New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases,* Geophysical Research Letters, vol. 25, no. 14, pp. 2715–2718.
16. H. Harde, 2017: *Radiation Transfer Calculations and Assessment of Global Warming by CO₂*, International Journal of Atmospheric Sciences, Volume 2017, Article ID 9251034, pp. 1-30,
<https://www.hindawi.com/journals/ijas/2017/9251034/>, <https://doi.org/10.1155/2017/9251034>.
17. R. Connolly, W. Soon, M. Connolly, S. Baliunas, J. Berglund, C. J. Butler, R. G. Cionco, A. G. Elias, V. M. Fedorov, H. Harde, G. W. Henry, D. V. Hoyt, O. Humlum, D. R. Legates, S. Lüning, N. Scafetta, J.-E. Solheim, L. Szarka, H. van Loon, V. M. V. Herrera, R. C. Willson, H. Yan and W. Zhang, 2021: *How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate*, Research in Astronomy and Astrophysics 2021 Vol. 21 No. 6, 131(68pp),
<http://www.raa-journal.org/raa/index.php/raa/article/view/4906>.
18. H. Harde, 2022: *How Much CO₂ and the Sun Contribute to Global Warming: Comparison of Simulated Temperature Trends with Last Century Observations*, Science of Climate Change, Vol. 2.2, pp. 105 - 133, <https://doi.org/10.53234/SCC202206/10>.