

Hintergründe, wissenschaftliche Details und Modellkritik zum Experiment zur Absorption von Wärmestrahlung durch CO₂ aus der Aktivität 5 des Klimakoffers

Dr. Cecilia Scorza¹, Moritz Strähle², Prof. Dr. Harald Lesch³ und Prof. Dr. Bernhard Mayer⁴

Kontakt für Anfragen: c.scorza@lmu.de

1 Astrophysikerin und Koordinatorin für Öffentlichkeitsarbeit und Schulangebote, Fakultät für Physik der LMU

2 Ehem. Abgeordneter Physiklehrer an der Fakultät für Physik der LMU

3 Professor für Astrophysik, Universitäts-Sternwarte, Fakultät für Physik der LMU

4 Professor für Atmosphärenphysik, Fakultät für Physik der LMU

Hintergrundinformation

Der Klimawandel ist die größte Herausforderung im 21. Jahrhundert und damit auch entscheidender Gegenstand des Lebens heutiger Schülerinnen und Schüler (SuS). Laut einer gemeinsamen Veröffentlichung des Deutschen Klimakonsortiums (DKK), der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, des Deutschen Wetterdienst, des Extremwetterkongress Hamburg, der Helmholtz-Klima-Initiative und Klimafakten.de, gibt es fünf Kerninformationen zum Klimawandel: (1) Er ist real, (2) Wir sind die Ursache, (3) Er ist gefährlich, (4) Die Fachleute sind sich einig und (5) Wir können noch etwas tun (<https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/basisfakten.html>). Eine aktuelle Umfrage des Internationalen Zentralinstituts für Jugend- und Bildungsfernsehen ergab, dass 20% der Jugendlichen in Deutschland noch nie etwas vom Klimawandel gehört haben (SZ-Wissen 24.05.2024). Dies spreche dafür, den Kindern und Jugendlichen ein besseres Wissen über den Klimawandel zu vermitteln, meint Studienleiterin Maya Götz: „Wissen hilft gegen Angst, weil die Jugendlichen die Klimakrise dann besser verorten können“.

Das Bildungsprogramm „Der Klimawandel: verstehen und handeln“ der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) fußt auf diesen Gedanken (www.klimawandel-schule.de). Die Prozesse, die zum Klimawandel führen und auch die daraus resultierenden Folgen werden im Rahmen dieses Projektes für MINT-Lehrkräfte aufbereitet und u.a. durch zwölf Experimente und Aktivitäten im LMU-Klimakoffer veranschaulicht.

Ziel der Modellexperimente im Klimakoffer (Aktivität 5) ist es, die seit 1856 bekannte Tatsache zu zeigen, dass CO₂ -eines der atmosphärischen Treibhausgase- Infrarotstrahlung absorbiert. Ein Modellexperiment „erlaubt den experimentell basierten Erkenntnisgewinn über ein Original, welches aus verschiedenen Gründen nicht zugänglich ist. Diese Funktion erfüllen Modellexperimente sowohl in der Fachwissenschaft als auch in Lehr-Lernprozessen. [...] Für den Erkenntnisgewinn ist die Analogiebildung zwischen Modellexperiment und Original bedeutsam“ (<https://www.ruhr-uni-bochum.de/didachem/modellexperimente.htm>). Es gibt in Deutschland eine Vielzahl von Modellexperimenten für die Schule zur Wärmeabsorption durch CO₂, die von reiner Analogie bis zu Messungen mit Thermometern reichen (Siehe Beispiele in der Liste am Ende dieses Dokuments). *Es ist jedoch nicht unsere Absicht, all diese Experimente zu bewerten.*

Ein „Original“ physikalisches Experiment zur direkten Wärmeabsorption durch CO₂ wird als Praktikumsversuch für Physikstudierende an der Universität Köln durchgeführt (<https://teaching.astro.uni-koeln.de/node/8>). Sie untersuchen "den Zusammenhang zwischen einem quantenmechanischen Phänomen – der Absorption von Photonen aus dem Infrarotbereich **in einem** Gas – und den daraus resultierenden makroskopischen Erscheinungen wie z.B. dem Treibhauseffekt". Im Praktikumsversuch ist die Absorptionszelle ein verspiegeltes Glasrohr mit zwei weitgehend IR-durchlässigen Fenstern, zwei Öffnungen für die Gaszufuhr und Entlüftung sowie einer Öffnung für ein Thermometer. Mehr Information zum Praktikumsversuch, finden Sie unter: <https://teaching.astro.uni>

[koeln.de/sites/default/files/praktikum_b/Anleitung_1.1.pdf](https://www.uni-koeln.de/sites/default/files/praktikum_b/Anleitung_1.1.pdf). Während des Versuches, wird die CO_2 Konzentration in der Zelle erhöht, die Transmission von Infrarotstrahlung und spektroskopisch -bei einer Wellenlänge von $4.3\mu\text{m}$ -, die Verbreiterung des Absorptionsbandes gemessen. Letzteres zeigt, dass CO_2 Infrarotstrahlung absorbiert. Bei erhöhter CO_2 -Konzentration, steigt auch die Temperatur T in der Zelle. Bei einer 100% Füllung mit CO_2 , wird die Zelle im Infrarot optisch dick und die gemessene Temperatur erhöht sich um 15°C . Zusammengefasst: Wenn in der Zelle bei zunehmender CO_2 -Konzentration, eine Senkung der IR-Transmission, Erweiterung der CO_2 -Absorptionsbänder und den Einstieg der T gemessen wird, spricht man von Treibhauseffekt.

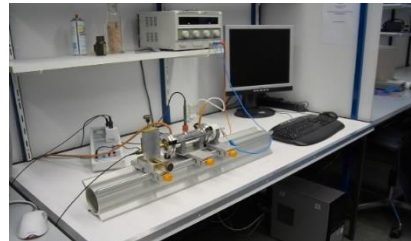
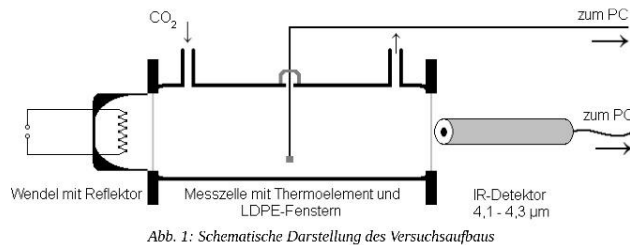


Abb1: Links: schematischer Versuchsaufbau, rechts: Foto des Versuchsaufbaus (Credit: Uni-Köln)

Ein solch anspruchsvolles Experiment mit detaillierter spektroskopischer Analyse kann nicht in der Schule durchgeführt werden, da die Analyse zu komplex ist. Darüber hinaus, haben die Experimente und Aktivitäten unseres LMU-Klimakoffers einen MINT-Charakter und sollen zur fächerübergreifenden Arbeit in der Schule einladen. Der Klimakoffer soll auch für Geographie-Lehrkräfte, und sogar für Religions- und Ethiklehrkräfte sowie Schulpsychologen zugänglich sein. Aus diesem Grund verwenden wir zwei vereinfachte, schulgerechte Experimente - ohne spektroskopische Analyse- im Klimakoffer.

An dieser Stelle betonen wir ausdrücklich: Bei den Modellexperimenten wird weder der atmosphärischen Treibhauseffekt gemessen noch wird die Strahlung der Erdoberfläche simuliert.

1. Modellexperimente der Aktivität 5 des Klimakoffers

Mit Aktivität 5 des Klimakoffers können Lehrkräfte und ihre Schülerinnen und Schüler die Absorption von Strahlungsenergie durch CO_2 auf zwei Wegen experimentell erfahren. Hier sind zwar die CO_2 -Konzentration und Temperaturänderung nicht direkt mit der Erdatmosphäre vergleichbar, aber der zu Grunde liegende Prozess wird damit auf einfache und didaktisch ansprechende Weise veranschaulicht. Um die Durchführbarkeit der Experimente in der Schule zu gewährleisten, zeigen wir (1.1) die Transmission und (1.2) die Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 -Moleküle bei 5 Mikrometern (und nicht zwischen 13 und 16 Mikrometern wie in der realen Atmosphäre). Für den Einsatz im Unterricht wird zudem auf einfache und kostengünstige Mittel zurückgegriffen, u.a. auf einen Pappzylinder, eine Keramiklampe (wie sie in Terrarien verwendet wird) und ein Stabthermometer.

1.1. Durchführung des Modellexperimentes zur Transmission von Wärmestrahlung

Die Transmission von Wärmestrahlung, welche von einer 60W Keramiklampe erzeugt wird und durch einen Zylinder (Pappdose) geht, kann mit einer Wärmebildkamera gemessen werden (s.Abb. 2 rechts). Wird der vorerst mit Raumluft gefüllte Zylinder mit CO_2 geflutet, gelangt weniger Wärmestrahlung vom Keramikstrahler durch die Pappöhre zur Wärmebildkamera. Das Absinken der von der Wärmebildkamera gemessenen Temperatur, durch Verringerung der Transmission, wird als „Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 “ bezeichnet.



Abb2: Transmissionsmessung.

Für weitere Transmissionsexperimente siehe <https://www.youtube.com/watch?v=SeYfl45X1wo> oder <https://www.youtube.com/watch?v=plu5m7IE5Xs>

1.2. Durchführung des Modellexperimentes zur Temperaturerhöhung in der Pappdose

Wissend über das Transmissionsexperimentes, dass Wärmestrahlung in der Pappdose absorbiert wird, fragen viele SuS was sich in der Pappdose nun verändert hat. Dafür wird einem zweiten Modellexperiment, ein Stabthermometer mittig in der Pappdose platziert. Die Dose (Abb. 3.a links) *symbolisiert* einem zylinderförmigen Ausschnitt der Atmosphäre, welche von einem Infrarot-Strahler (rechts, Abb.3a, modellhaft für die Erdoberfläche) bestrahlt wird. Im Fall der luftgefüllten Dose stellt sich nach ca. 25 min eine Gleichgewichtstemperatur ein – der Pappzylinder mitsamt der in ihm enthaltenen Luft gibt pro Zeitabschnitt ebenso viel Energie an die Umgebung ab, wie er aufnimmt, sodass die gemessene Gastemperatur *nicht* weiter ansteigt (s. Abb. 3.b).

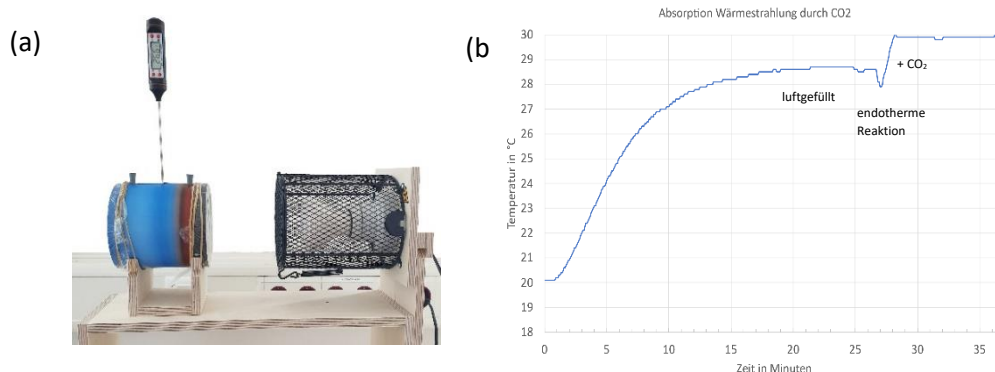


Abb. 3. (a) Die Pappdose links (modellhaft für einen zylinderförmigen Ausschnitt der Atmosphäre) wird von der Wärmelampe rechts bestrahlt. (b) Das Diagramm zeigt Messwerte für die Temperatur innerhalb der Pappdose; vorerst mit Luft gefüllt und nach der Einführung von CO₂.

Der zu Beginn beobachtete Temperaturanstieg von ca. 20°C (Umgebungstemperatur) auf knapp 28,7°C (Gleichgewichtstemperatur im luftgefüllten Fall) ist auf die anfängliche Erwärmung der Pappdose und der darin enthaltenen Luft durch den Infrarot-Keramikstrahler zurückzuführen. Wie im Diagramm zu erkennen ist, nach Zugabe von CO₂ steigt die Temperatur nach einem kurzen Abfall (verursacht durch die Tatsache, dass die Reaktion im Erlenmeyerkolben endotherm und das ausströmende CO₂ kälter als die Luft ist) an, bis sich eine neue Gleichgewichtstemperatur auf höherem Niveau bei ca. 30°C einstellt.

In beiden Modellexperimenten wird CO₂ durch Mischen von Zitronensäure und Natronpulver in Wasser in einem Erlenmeyerkolben erzeugt, welches über einen Schlauch in die Pappdose geleitet wird. Hierfür werden zwei durch Stopfen verschlossene Löcher an der Oberseite der Röhre geöffnet: durch eines der Löcher wird CO₂ zugeführt, durch das zweite Loch kann die Luft entweichen. Die CO₂-Konzentration in der Pappdose wird somit stark erhöht. Nach kurzer Zeit (ca. ein bis zwei Minuten) wird der Schlauch aus der Pappdose entfernt und beide Löcher mit Stopfen wieder verschlossen.

Interpretation der Temperaturerhöhung in der Pappdose

Was passiert in diesem zweiten Experiment? Eine äußere Strahlungsquelle –die Wärmelampe– gibt ihre Strahlungsenergie an die Umgebung ab. Das Ergebnis ist eine Temperaturerhöhung. Im Papprohr mit Luft stellt sich also zunächst ein Gleichgewicht ein: Das Strahlungsgleichgewicht. Erwärmung und Wärmetransport brauchen eine gewisse Zeit (ca. 25 Minuten), bis sie eine Gleichgewichtstemperatur von 28,7 °C erreicht haben. Durch die Einbringung des Kohlendioxidgases wird dieses Gleichgewicht nun verändert. Die Energieaufnahmekapazität des mit Kohlendioxid gefüllten Gasrohres ist höher, als ohne das eingebrachte Kohlendioxidgas. Da dieses eingebrachte Gas zunächst noch eine geringere Temperatur als die Luft im Papprohr hat, kommt es zunächst sogar zu einer Abkühlung, bis auch die CO₂-Moleküle die Temperatur der Umgebung erreicht haben und sich dann aber aufgrund ihrer IR-Absorptionsfähigkeiten mit anschließendem Energietransport die Temperatur im Papprohr erhöht. *Der Grund ist die Absorption der IR-Strahlung durch die CO₂-Moleküle.* Diese Energieaufnahme der Moleküle können wir vorher an der Transmission der IR-Strahlung eindeutig nachweisen. *Es bleibt ein Teil der IR-Strahlung im Gas des Papprohres. Sie kommt nicht mehr vollständig am anderen Ende des*

Rohres an. Dies ist der entscheidende Energieaufnahmeprozess. Das CO₂ nimmt über die Rotation und Vibration der einzelnen Moleküle die in der IR-Strahlung steckende Energie auf, und verteilt sie durch Strahlung und Stöße auf die Umgebung.

Temperatur ist keine mikroskopische Größe, kann also nicht durch einzelne Teilchen beschrieben werden (ein Atom hat keine Temperatur, ein Gas aus Atomen aber sehr wohl). Temperatur ist ein Maß für die mittlere Bewegungsenergie sehr vieler Teilchen, also eine gemittelte Größe. Was wir mit Thermometern messen sind also die mittlere Bewegungsenergie der Teilchen, die die Messsonde treffen. Wie wird die aufgenommene Energie der CO₂-Moleküle zur mittleren Temperatur des Gases im Papprohr? Sie muss sich verteilen. Die Energie der vibrierenden und rotierenden Moleküle wird durch Stöße zwischen den CO₂-Molekülen und dem Luftgemisch verteilt. Das ist der Energietransport der sich anschließend in eine mittlere Bewegungsenergie der Teilchen und damit Temperaturerhöhung übersetzt und messbar wird.

Die Transmissionsmessung im Papprohr zeigt die direkte Energieaufnahme durch die CO₂-Moleküle, die Temperaturmessung im Papprohr, wie diese aufgenommene Energie auf das Medium im Papprohr verteilt wird. *Dieses Experiment zeigt also nicht wie stark CO₂ wirkt, sondern dass es wirkt.*

2. Wissenschaftliche Details und Modellkritik zum Experiment 1.2

2.1. Kontrollexperimente sind in der Physik sehr wichtig. Im Fall unseres Modellexperiments (1.2) verweisen wir auf die wissenschaftliche Arbeit von Stefan Sirtl (2010) der Universität Freiburg (siehe Literaturliste), der ausführliche Kontrollexperimente mit verschiedenen Röhrenmaterialien (Aluminium und Plexiglas), anderen Gasen (N₂O, Argon, etc.) und unterschiedlichen Strahlungsquellen (60W-Strahler, Bunsenbrenner, 500W-Baulampe) durchgeführt hat.

2.2. Die CO₂-Konzentration im der Pappzylinder ist um ein Vielfaches höher als in der Erdatmosphäre. Warum beobachtet man trotzdem „nur“ eine Temperaturdifferenz von gut einem Kelvin?

Während die Wärme in der Atmosphäre langsam durch Konvektion und Emission thermischer Strahlung abgeführt wird, wird die Wärme im Modellversuch schnell durch Wärmeleitung von der Modellatmosphäre zur Wand der Pappröhre und von dort an die Umgebung abgeführt. Aus diesem Grund wird für eine im Experiment mit einfachen Mitteln klar messbare Temperaturdifferenz zwischen den beiden Gleichgewichtstemperaturen eine höhere CO₂-Konzentration benötigt.

Würde man den im Experiment verwendeten Pappzylinder (ca. 20cm) auf die Höhe der Atmosphäre (ca. 10 km) strecken, also um den Faktor $5 \cdot 10^4$, und dabei die absolute Anzahl der CO₂-Moleküle beibehalten, so erhielte man im gestreckten Zylinder eine CO₂-Konzentration, die eine Größenordnung unter der tatsächlichen Konzentration liegt.

2.3. Die Wellenlänge des Intensitätsmaximums der Strahlung des IR-Keramikstrahlers ($T = 600\text{ K}$ bzw. 330°C) kann mit dem Wien'schen Verschiebungsgesetz berechnet werden und liegt bei $\lambda_{\max} = \frac{2897,8\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}}{600\text{ K}} = 4,8\text{ }\mu\text{m}$. Diese Wellenlänge liegt also im Bereich der Absorptionsbande von CO₂ um $4,5\text{ }\mu\text{m}$ (s. Abbildung 4). CO₂-Moleküle können Strahlung in diesen Wellenlängenbereichen absorbieren, in Schwingungsenergie umwandeln und diese als thermische Energie an die Umgebung abgeben. Im Fall der thermischen Strahlung der Erde ist vor allem die $15\text{ }\mu\text{m}$ -Absorptionsbande von CO₂ maßgeblich, was an der prinzipiellen Aussage der Experimente – *CO₂ ist in der Lage, Wärmestrahlung zu absorbieren* – nichts ändert.

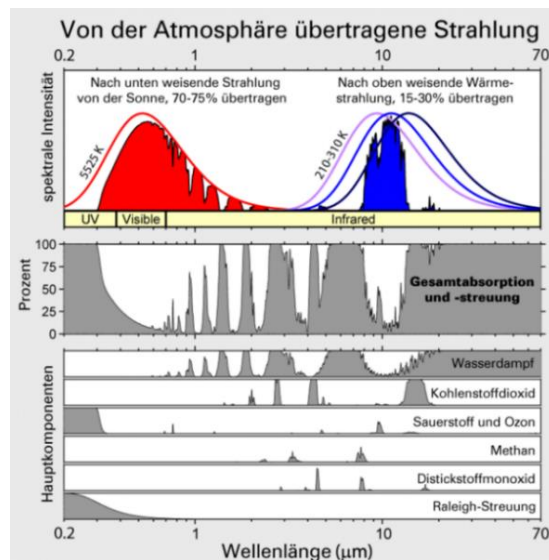


Abb. 4 Absorption von Strahlungsenergie in der Atmosphäre durch verschiedene Gase bei unterschiedlichen Wellenlängen (Quelle: Wikipedia.de).

2.4. Will man die Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 demonstrieren, muss die Wärmequelle eine höhere Temperatur als das absorbierende CO_2 besitzen. Ansonsten würde die Absorption des CO_2 exakt durch die Emission des CO_2 kompensiert (CO_2 und Wärmequelle befinden sich im thermischen Gleichgewicht), und man könnte keinen Effekt beobachten. Ein Schlüsselement beim Treibhauseffekt in der Realität ist, dass die Strahlung einer warmen Quelle (= Erdboden) in der kälteren Atmosphäre absorbiert wird. Die Atmosphäre selbst emittiert weniger Strahlung als der Erdboden (weil sie ja kälter ist), so dass sie in der Bilanz durch Wärmestrahlung Energie aufnimmt (Absorption - Emission > 0). Um diesen Effekt im Labor zu demonstrieren, braucht man also eine wärmere Quelle als den Boden oder die Wand. Was in der Atmosphäre über eine Distanz von 10km passiert (Temperaturunterschied von 60K zwischen Boden und Tropopause), muss man im Labor künstlich erzeugen.

2.5. Neben der Eigenschaft, Wärmestrahlung unterschiedlich stark zu absorbieren, haben auch die thermodynamischen Eigenschaften des Gases im Pappzylinder einen Effekt auf die gemessene Temperaturerhöhung (vgl. Sirtl 2010). So beträgt die Wärmeleitfähigkeit von Luft bei Atmosphärendruck und $T = 300 \text{ K}$ beispielsweise $\lambda_{\text{Luft}} = 0,0262 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$, die Wärmeleitfähigkeit des nicht IR-aktiven Gases Argon $\lambda_{\text{Argon}} = 0,0179 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ und die von CO_2 $\lambda_{\text{CO}_2} = 0,0168 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$. Führt man das Experiment mit einem Zylinder mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Aluminium mit $\lambda_{\text{Aluminium}} = 236 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$) durch, so misst man auch bei der Durchführung mit Argon eine Erwärmung im Pappzylinder, da Argon die thermische Energie in niedrigerem Maße an die relativ kühle, da gut leitende, Innenwand des Zylinders abgibt als Luft. Dieser Effekt kann allerdings deutlich reduziert werden, wenn man ein Zylinder-Material mit relativ geringer Wärmeleitfähigkeit wählt. In der Arbeit von Sirtl wird Plexiglas mit $\lambda_{\text{Plexiglas}} = 0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ verwendet. Im Experiment im Klimakoffer wird eine Pappröhre eingesetzt, deren Wärmeleitfähigkeit in der gleichen Größenordnung liegt. In Abb. 5 ist zu sehen, dass sich die gemessene Gleichgewichtstemperatur im Inneren der Röhre auch nach Zugabe von Argon leicht erhöht, allerdings deutlich weniger ausgeprägt als im Fall von CO_2 .

Ebenso spielt der Energietransport per Konvektion vom Inneren der Röhre zur Außenwand eine Rolle. Dafür sind dann wiederum die spezifische Wärmekapazität sowie die Dichte des jeweiligen Gases maßgeblich. CO_2 kann aufgrund seiner höheren Wärmekapazität pro Volumen mehr Energie durch

Konvektion transportieren was potentiell zu einer Verringerung des beobachteten Temperaturanstieges führt. Für eine quantitative Analyse wären umfangreiche Rechnungen erforderlich.

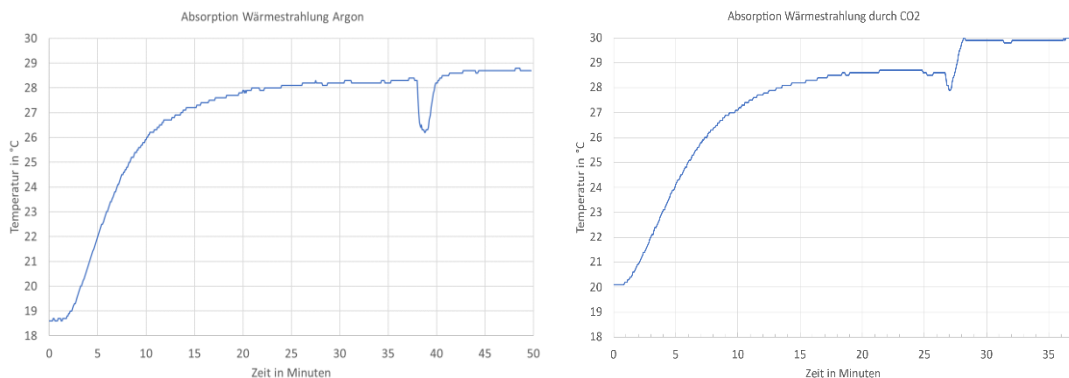


Abb. 5. Messwerte für die Temperatur innerhalb der Pappröhre, (links) vor und nach der Zugabe von Argon (links) und (rechts) vor und nach der Zugabe von CO_2 .

Wie oben bereits erwähnt, soll der beschriebene Versuch die Absorption von IR-Strahlung durch CO_2 und die damit verbundene Temperaturerhöhung illustrieren. Es ist wichtig zu betonen, dass die gemessene Temperaturerhöhung im Inneren der Dose keine quantitativen Rückschlüsse auf den globalen mittleren Temperaturanstieg durch den anthropogenen Klimawandel oder die Treibhauswirksamkeit der verwendeten Gase zulässt. Dies ist aber auch nicht das Ziel des Experiments! Ziel des Experiments ist es, auf qualitativer Ebene zu zeigen, dass CO_2 in der Lage ist Wärmestrahlung zu absorbieren. Um quantitative Aussagen treffen zu können, müsste man u.a. die Wärmeleitungseffekte in der Dose näher charakterisieren, was aber in einem Schulversuch nicht möglich ist.

2.6. Die Stopfen werden während der CO_2 -Zugabe entfernt, sodass das CO_2 nicht unter Druck eingeleitet wird. Wäre das Experiment dauerhaft nach oben hin offen, würde sich eine deutlich höhere Temperaturdifferenz zwischen beiden betrachteten Gleichgewichtstemperaturen einstellen. Dies hängt mit der größeren Dichte von CO_2 , verglichen mit Luft, zusammen: ein Energieverlust durch Konvektion nach außen wäre im Fall größerer CO_2 -Konzentration viel kleiner als im luftgefüllten Fall, da im CO_2 -gefüllten Fall Konvektion nur innerhalb des „ CO_2 -Sees“ stattfinden würde.

2.7. Zur Darstellung des kompletten Treibhauseffektes fehlt noch eine Komponente: die Emission von Wärmestrahlung durch die Atmosphäre in Richtung Weltall und in Richtung Erdoberfläche. Die Atmosphäre wirkt nämlich – zusätzlich zur Sonne – wie eine zweite Strahlungsquelle, die den Erdboden erwärmt. Diese Strahlungsquelle ist umso stärker, je höher die Konzentration an Treibhausgasen und die damit verbundene Absorption von Wärmestrahlung von der Erdoberfläche in der Atmosphäre ist.

2.8. Im Modellexperiment wird das verwendete Stabthermometer in der Röhre sowohl vor wie auch nach der Einführung von CO_2 nicht abgeschirmt. Da es aber kontinuierlich vom Wärmestrahler bestrahlt wird, hat dies keinen Einfluss auf die Aussage des Experiments.

3. Die Wirkung von Treibhausgasen

Die Fähigkeit von Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Wasserdampf (H_2O) Wärmestrahlung zu absorbieren, wurde bereits im frühen 19. Jahrhundert wissenschaftlich nachgewiesen. Mit immer besser werdenden Methoden wurden die Absorptionsquerschnitte sowohl im Labor präzise bestimmt als auch quantenmechanisch genau berechnet. Moleküle können durch eine Änderung ihres quantenmechanischen Zustands Energie aufnehmen. Bei Molekülen geschieht dies durch eine Änderung des Schwingungs- oder Rotationszustands. Die Absorption von Infrarotstrahlung kann allerdings nur dann passieren, wenn sich bei der Schwingung das elektrische Dipolmoment, das als „Hebel“ für die ankommende Strahlung wirkt, ändert. Molekülschwingungen mit dieser Eigenschaft werden als IR-aktiv bezeichnet. Bei der Biegeschwingung des CO_2 -Moleküls wird ein Dipolmoment induziert. In Folge absorbiert CO_2 Infrarotstrahlung und wirkt als Treibhausgas.

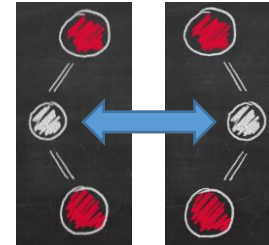


Abb. 6 Biegeschwingung eines CO_2 -Moleküls
(Credits: Prof. Dr. B. Mayer)

3.1 Nachweis der Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 in planetaren Atmosphären

Die Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 spielt in der Infrarotastronomie eine Schlüsselrolle. Spektren von Planeten werden im infraroten Bereich aufgenommen, um über die Absorption von Infrarotstrahlung der Planeten, die chemische Zusammensetzung ihrer Atmosphären zu bestimmen. Die Absorptionsspektren der NASA, ESA, CSA der Planeten Venus und Mars zeigen deutlich, dass ein beträchtlicher Teil der von den Planeten emittierten Wärmestrahlung durch CO_2 absorbiert wird (siehe Abb. 7).

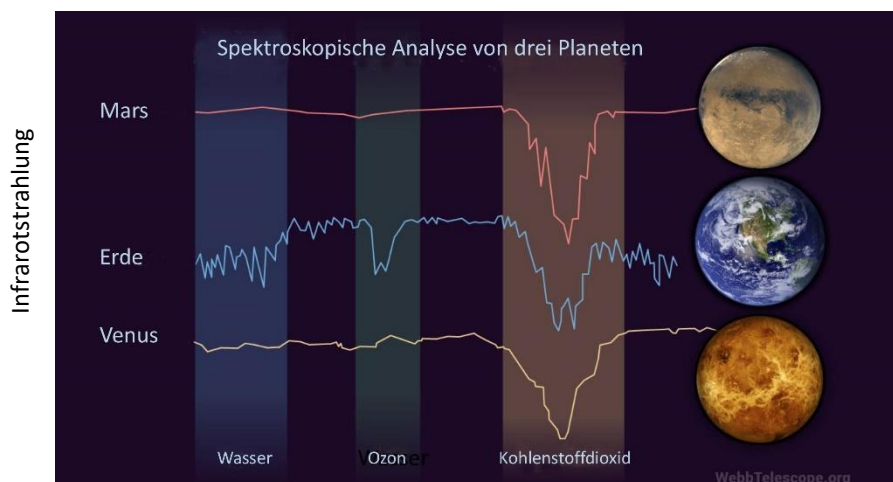


Abb. 7 Absorption von Infrarotstrahlung durch CO_2 durch planetare Atmosphären (Credits: WebbTeleskop.org)

Auf diese Art konnte z.B. die chemische Zusammensetzung und der CO_2 -Gehalt der Atmosphären von Venus und Mars wissenschaftlich nachgewiesen werden. Im Fall der Erde (Graphik in der Mitte) ist die Wärmeabsorption durch Wasserdampf (H_2O), Ozon (O_3) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) zu erkennen. Das Infrarotspektrum der Erde zeigt, dass CO_2 ein starker Treibhauseffekt verursacht.

In Zukunft werden ähnliche Messungen erlauben, die chemische Zusammensetzung von extrasolaren Planeten zu erforschen, um so mögliche Hinweise auf Leben zu finden (siehe Darwin Mission).

FAZIT

Mit wissenschaftlicher und didaktischer Überzeugung können wir bestätigen, dass das Modellexperiment 1.2 der Aktivität 5 des LMU-Klimakoffers zur Strahlungsabsorption durch CO₂, beschrieben auf Seite 3 dieses Dokumenten, eine fundierte Basis hat für den Einsatz in Schulen besitzt.

Obwohl unser Modellexperiment den Zusammenhang zwischen dem Temperaturanstieg in der Pappdose und der Absorption von Wärmestrahlung durch CO₂ nicht spektroskopisch nachweisen kann (was für die Schule zu komplex wäre), stützt sich unsere Interpretation der Messung direkt auf das Ergebnis des anspruchsvollen Laborexperiments der Universität Köln, welches den Zusammenhang zwischen einem quantenmechanischen Phänomen - der Absorption von Photonen im Infrarotbereich in einem Gas - und den daraus resultierenden makroskopischen Phänomenen wie dem Treibhauseffekt untersucht und spektroskopisch nachweist.

Unser Modellexperiment „erlaubt den experimentell basierten Erkenntnisgewinn über ein Original, welches aus verschiedenen Gründen nicht zugänglich ist. Diese Funktion erfüllen Modellexperimente sowohl in der Fachwissenschaft als auch in Lehr-Lernprozessen. [...] Für den Erkenntnisgewinn ist die Analogiebildung zwischen Modellexperiment und Original bedeutsam“.

Die Autorin und Autoren

Quelle- und Literaturliste

Veröffentlichung des Deutschen Klima-Konsortium: (<https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/basisfakten.html>)

Stellungnahmen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zum Klimawandel (21.09.2015) und zur Klimaproblematik (10.09.2007) <https://www.dmg-ev.de/publikationen/stellungnahmen/>

SZ-Wissen vom 24.05.2024: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/umfrage-klimakrise-juendliche-kinder-schule-lux.SFtb6LunEakRFetxFoU797?reduced=true>

Modellexperimente: <https://www.ruhr-uni-bochum.de/didachem/modellexperimente.htm>

Handbuch: Der Klimawandel: Verstehen und Handeln, Scorza et al, Publikation der Physik Fakultät der LMU, https://klimawandel-schule.de/materialien/Handbuch/Handbuch_Klimawandel.pdf

Stefan Sirtl (2010) an der Universität Freiburg, Absorption thermischer Strahlung durch atmosphärische Gase https://docplayer.org/18989667-Absorption-thermischer-strahlung-durch-atmosphaerische-gase.html#google_vignette.

Über didaktische Reduktion: https://www.lehrplanplus.bayern.de/sixcms/media.php/71/LPP-GY-PH_932-Modellversuch%20Treibhausgase.20001.pdf

Climate Change 2013: The Physical Science Basis, IPCC report, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Overview of the Darwin Mission, Kaltenegger et. al, <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/109793/1/kaltenegger2.pdf>

D. R. Feldman, W. D. Collins, P. J. Gero, M. S. Torn, E. J. Mlawer, T. R. Shippert: *Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010*. (PDF) In: *Nature*. 519, Februar 2015, S. 339–343. doi:10.1038/nature14240

John E. Harries et al.: *Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997*. In: *Nature*. Band 410, 2001, S. 355–357, doi:10.1038/35066553.

Historische Fakten und Quellen

Der Treibhauseffekt wurde 1824 von dem französischen Mathematiker und Physiker Joseph Fourier entdeckt, verbunden mit der Annahme, dass die Erdatmosphäre isolierende Eigenschaften besitzt, die einen Teil der einfallenden Wärmestrahlung daran hindert, in den Weltraum reflektiert zu werden. *J. B. J. Fourier: Remarques Générales Sur Les Températures*, in: *Du Globe Terrestre Et Des Espaces Planétaires*. In: *Burgess (Hrsg.): Annales de Chimie et de Physique. Band 27, 1824, S. 136–167*.

Dem britischen Naturforscher John Tyndall gelang es im Jahr 1862 mittels präziser Messungen einige für den Treibhauseffekt verantwortliche Gase wie Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid zu identifizieren.

Im 1896 beschrieb der schwedische Physiker und Chemiker Svante Arrhenius in einer Publikation, den atmosphärischen Treibhauseffekt unter Berücksichtigung der Eis-Albedo-Rückkopplung erstmals quantitativ. Svante Arrhenius: [On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground](#). In: *Philosophical Magazine and Journal of Science*. 41, Nr. 251, April 1896, S. 237–276.

Charles D. Keeling gelang 1958 der erste Nachweis des Anstiegs der atmosphärischen Kohlenstoffdioxid-Konzentration und damit des anthropogenen Treibhauseffekts. Auf Keelings Initiative wurde eine Vielzahl von Messstationen für Kohlenstoffdioxid aufgebaut; eine der bekanntesten befindet sich auf dem Mauna Loa auf Hawaii. [Tagesaktuelle und historische CO₂-Werte \(Mauna-Loa-Observatorium, Hawaii\)](#).

Links zu anderen Modellexperimenten und Laborexperimenten

https://www.ubz-stmk.at/fileadmin/ubz/upload/Downloads/klima/Treibhauseffekt_mit_CO2.pdf

https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/chemie/bs/6bg/6bg2/download/html/treibhauseffekt_lehrerarbeitsblatt.pdf

https://www.lehrplanplus.bayern.de/sixcms/media.php/71/LPP-GY-PH_932-SE%20Modellversuch%20Treibhauseffekt.pdf

https://www.lehrplanplus.bayern.de/sixcms/media.php/71/LPP-GY-PH_932-Modellversuch%20Treibhausgase.20001.pdf

https://didaktik.physik.fu-berlin.de/home/download/TE/Skript_Treibhauseffekt.pdf

https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/EXP/C/C5/C5321_d.pdf

<http://www.schulbiologiezentrum.info/AH%2019.43%20Experimente%20zum%20Treibhauseffekt%2001.07.07.pdf>

<https://www.riecken.de/2009/01/versuch-zum-treibhauseffekt/>

https://igh-heidelberg.com/images/download/4_AnI_Waermestrahlung_1711.pdf

<https://www.facebook.com/ZDFterraX/videos/954805841571222/?mibextid=rS40aB7S9Ucbxw6v>

https://teaching.astro.uni-koeln.de/sites/default/files/praktikum_b/Anleitung_1.1.pdf

http://hharde.de/index_htm_files/Harde-Schnell-THE-m.pdf

https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IEP/Thermophysics_Group/Files/Teachers/D_A_Stattegger_Christoph.pdf

<https://m.youtube.com/watch?v=Jpcu3GDEOQk>

<https://youtu.be/K5yhEvebgog?si=uwcJxBhHqwnutNGT>