

Wissenschaftliche Erläuterung Experiment zur Wärmeabsorption durch CO₂

Dr. Cecilia Scorza¹, Moritz Strähle², Prof. Dr. Bernhard Mayer³ und Prof. Dr. Harald Lesch⁴

Kontakt für Anfragen: c.scorza@lmu.de

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

2 Abgeordneter Physiklehrer an der Fakultät für Physik der LMU

3 Professor für Atmosphärenphysik, Fakultät für Physik der LMU

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

Ziel dieses Experiments des LMU-Klimakoffers ist es zu zeigen, dass CO₂ Infrarotstrahlung absorbiert. Diese Absorption kann man unmittelbar als Temperaturerhöhung sehen. CO₂-Konzentration und Temperaturänderung sind aufgrund der sehr unterschiedlichen Bedingungen zwar nicht direkt mit der Erdatmosphäre vergleichbar, aber der zu Grunde liegende Prozess wird damit auf einfache Weise veranschaulicht.

Beschreibung des Experimentes

Es handelt sich hier um ein Modell-Experiment, das die Absorption von Wärmestrahlung durch CO₂ anschaulich darstellt (Aufbau siehe Abb. 1 a). Ein Infrarot-Keramikstrahler steht modellhaft für ein Stück Erdoberfläche, welches Wärmestrahlung abstrahlt. Die Dose entspricht einem zylinderförmigen Ausschnitt der Atmosphäre, welcher von der Erdoberfläche (im Experiment vom Infrarot-Strahler) bestrahlt wird. Im Fall der luftgefüllten Dose stellt sich nach einiger Zeit eine Gleichgewichtstemperatur ein – die Dose mitsamt der in ihr enthaltenen Luft gibt pro Zeitabschnitt ebenso viel Energie an die Umgebung ab, wie sie aufnimmt, so dass die Temperatur nicht weiter ansteigt (s. Abb 1 b, bis ca. Min. 18).

Durch Mischen von Zitronensäure und Natronpulver in Wasser in einem Erlenmeyerkolben entsteht CO₂, welches über einen Schlauch in die Dose geleitet wird. Hierfür werden zwei durch Stopfen verschlossene Löcher an der Oberseite der Dose geöffnet: durch eines der Löcher wird CO₂ zugeführt, durch das zweite Loch kann die in der Dose enthaltene Luft entweichen. Die CO₂-Konzentration in der

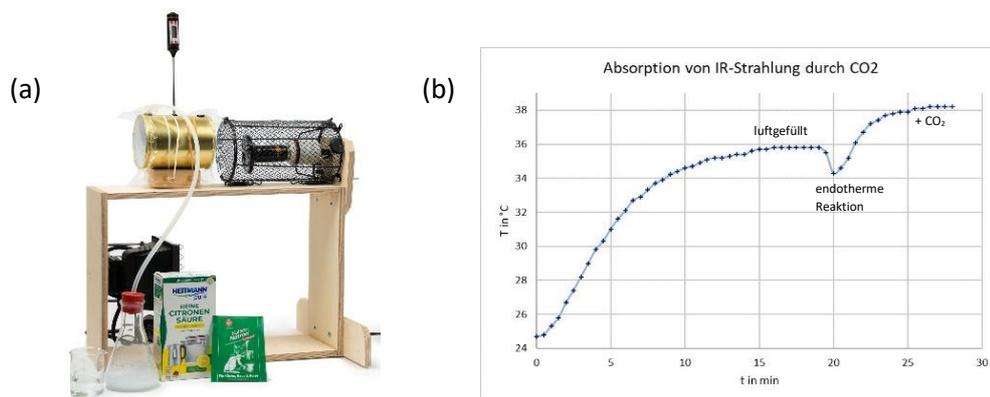


Abb. 1. Die Dose im Experiment (a) entspricht einem zylinderförmigen Ausschnitt der Atmosphäre, welcher von der Erdoberfläche (im Experiment die Wärmelampe) bestrahlt wird. (b) Messungen der Temperatur innerhalb der Dose mit Luft und nach der Einführung von CO₂.

Dose wird somit stark erhöht. Nach kurzer Zeit (ca. ein bis zwei Minuten) wird der Schlauch aus der Dose entfernt und beide Löcher mit Stopfen wieder verschlossen.

Der zu Beginn beobachtete Temperaturanstieg von 25°C (Umgebungstemperatur) auf 36°C (Gleichgewichtstemperatur im luftgefüllten Fall) ist auf die anfängliche Erwärmung der Dose und der darin enthaltenen Luft durch den Infrarot-Keramikstrahler zurückzuführen. Wie im Diagramm zu erkennen ist, steigt die Temperatur nach Zugabe von CO₂ nach einem kurzen Abfall (welcher dadurch begründet werden kann, 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. 38°C einstellt. Daraus kann gefolgert werden, dass CO₂ einen Teil der infraroten Strahlung des Infrarot-Keramikstrahlers absorbiert, was zu einer Erhöhung der Temperatur in der Dose führt. Dieser Effekt sorgt in der Realität für den Treibhauseffekt, den wir aktuell in immer stärkerem Maße auf unserer Erde erleben.

Wissenschaftliche Details und Modellkritik zum Experiment:

- Die CO₂-Konzentration in der Dose ist um ein Vielfaches höher als in der Erdatmosphäre. Warum beobachtet man trotzdem „nur“ eine Temperaturdifferenz von 2 K? 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 Dose 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.
- 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 mit $\lambda_{max} = \frac{2897,8\ \mu\text{m}\cdot\text{K}}{600\ \text{K}} = 5\ \mu\text{m}$. Im Modellversuch tragen die $4\ \mu\text{m}$ -Absorptionsbande und die $15\ \mu\text{m}$ -Absorptionsbanden von CO₂ gleichermaßen bei. Die CO₂-Moleküle können Strahlung in diesen Wellenlängenbereichen absorbieren, in Schwingungsenergie umwandeln und diese als thermische Energie an die Umgebung abgeben – das Gas in der Dose erwärmt sich. Im Fall der thermischen Strahlung der Erde ist vor allem die $15\ \mu\text{m}$ -Absorptionsbande von CO₂ maßgeblich, was an der prinzipiellen Aussage des Experimentes – CO₂ ist in der Lage, Wärmestrahlung zu absorbieren – nichts ändert.
- Will man die Absorption von Wärmestrahlung durch CO₂ demonstrieren, muss die Wärmequelle eine höhere Temperatur als das absorbierende CO₂ besitzen. Ansonsten würde die Absorption des CO₂ exakt durch die Emission des CO₂ kompensiert (CO₂ 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.
- Die Stopfen werden während der CO₂-Zugabe entfernt, sodass das CO₂ nicht unter Druck eingeleitet wird. Wäre das Experiment nach oben hin offen, würde sich eine höhere Temperaturdifferenz zwischen beiden betrachteten Gleichgewichtstemperaturen einstellen. Dies hängt mit der größeren Dichte von CO₂, verglichen mit Luft, zusammen: ein Energieverlust durch Konvektion nach außen wäre im Fall größerer CO₂-Konzentration viel kleiner als im luftgefüllten Fall, da im CO₂-gefüllten Fall Konvektion nur innerhalb des „CO₂-Sees“ stattfinden würde.
- 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.

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.

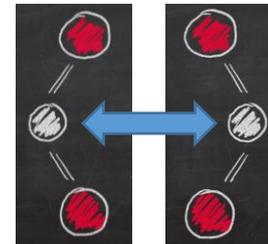
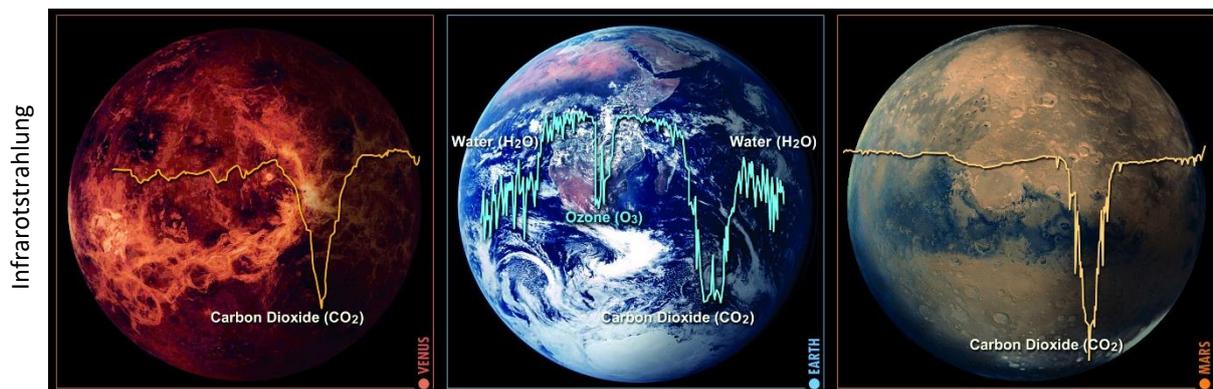


Abb. 2 Biegeschwingung eines CO_2 -Moleküls (Credits: Prof. Dr. B. Mayer)

Nachweis der Wärmeabsorption durch CO_2 in planetaren Atmosphären (Dr. Cecilia Scorza, Astrophysikerin)

Die im Experiment beobachtete Wärmeabsorption durch CO_2 spielt in der Infrarotastronomie eine Schlüsselrolle. Spektren von Planeten werden im infraroten Bereich aufgenommen, um über die Absorption von Infrarotstrahlung *die chemische Zusammensetzung der Atmosphären zu erforschen*.

Die Absorptionsspektren der Planeten Venus und Mars der ESA zeigen deutlich, dass ein beträchtlicher Teil der von den Planeten emittierten Wärmestrahlung durch CO_2 absorbiert wird:



Wellenlänge (Credits: ESA)

Auf diese Art konnte 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.

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).

Quellen:

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

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

Overview of the Darwin Mission, Kaltenecker et. al,
<https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/109793/1/kaltenecker2.pdf>

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

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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1038/35066553).

Historische 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 \(Mauna-Loa-Observatorium, Hawaii\)](#).