

Absorption von Wärmestrahlung durch CO₂

Ein einfaches Experiment zum direkten Nachweis der Absorption

Bekanntermaßen beruht der Klimawandel darauf, dass die von der Erde in Richtung des Weltraumes emittierte Wärmestrahlung durch das in der Atmosphäre enthaltene Kohlenstoffdioxid absorbiert wird. Die Wärmestrahlung kann somit nicht in den Weltraum entweichen, sondern führt zur Aufheizung der Atmosphäre und indirekt der Erde. Die Absorption von Wärmestrahlung durch CO₂ stellt den relevanten Primärschritt des Treibhauseffektes dar. Während die Absorption von elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren Spektralbereich intuitiv und experimentell leicht erfasst werden kann, ist dies für die unsichtbare Wärmestrahlung mit Wellenlängen im Mikrometerbereich weit weniger der Fall. Wir haben dazu, aufbauend auf [2], ein in der Schule kostengünstig zu realisierendes Experiment konzipiert, mit dem direkt die Absorption der Wärmestrahlung durch CO₂ und andere Klimagase gemessen werden kann.

Fachlicher Hintergrund

Das lineare CO₂-Molekül besitzt drei Normalschwingungen: eine *symmetrische* und *antisymmetrische Streckschwingung* in der Molekülachse sowie eine zweifach entartete *Biegeschwingung* (s. **Abb. 1**).

Bei der Absorption von Wärme- oder Infrarot-Strahlung werden Schwingungen des CO₂-Moleküls durch Aufnahme von Energie aus der Strahlung angeregt. Da die symmetrische Streckschwingung keine Änderung des elektrostatischen Dipols des CO₂-Moleküls bedingt, kann diese nicht durch Wärmestrahlung angeregt werden. Sie ist somit „infrarot-inaktiv“ (nicht IR-aktiv).

Anders verhält es sich mit der asymmetrischen Streckschwingung bei einer Wellenlänge von 4,26 μm (2349 cm⁻¹) und der zweifach entarteten Biegeschwingung bei einer Wellenlänge von 15 μm (667 cm⁻¹). Letztere Schwingung trägt effektiv stark zum Treibhauseffekt bei, da ihre Absorptionsbanden gut mit dem Emissionsspektrum der Erdoberfläche überlappt. Dies wird näherungsweise durch das Spektrum eines schwarzen Körpers mit einem Intensitätsmaximum bei 10 μm und einer nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz ($\lambda_{\max} \cdot T = 2880 \mu\text{m K}$) [1] resultierenden Temperatur von 288 K (15 °C) beschrieben [2]. Der Überlapp mit der asymmetrischen Streckschwingung ist dementsprechend sehr gering. Der Vollständigkeit halber sei bemerkt, dass an alle Schwingungsübergänge des CO₂-Moleküls auch Rotationsübergänge an koppeln, wodurch die Absorptionsbanden spektral verbreitert werden.

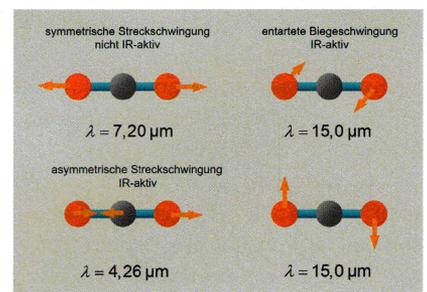
Messung der Absorption durch CO₂

Selbstverständlich kann man die Absorptionsbanden von CO₂ mit kommerziellen Spektrometern für den Infrarot-Strahlungsbereich detailliert als Funktion der Wellenlänge untersuchen. Solche Spektrometer stehen allerdings an Schulen nicht zur Verfügung. Daher haben wir einen einfachen Aufbau konzipiert, der auf dem Prinzip eines Bolometers beruht: Wir erzeugen mittels einer glühenden Wendel breitbandig Wärmestrahlung und weisen die hinter dem Probenvolumen reduzierte Intensität nach. Dabei stimmen wir das Experiment auf die asymmetrische

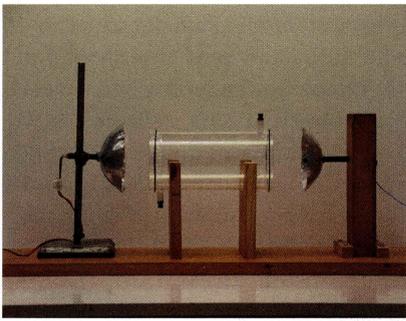
Streckschwingung des CO₂-Moleküls (4,26 μm) ab, auch wenn diese wenig zum Treibhauseffekt beiträgt.

Der Grund dafür ist, dass sich gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz Wärmestrahlung bei 4,26 μm effektiv mittels einer Glühwendel erzeugen lässt. Diese Wellenlänge entspricht nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz dem Maximum des Spektrums eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur von $T_{4,26 \mu\text{m}} = 676 \text{ K}$. Für die eigentlich klimarelevante Biegeschwingung (15 μm) skaliert die Temperatur eines entsprechenden thermischen Strahlers zu kleineren Werten und liegt unterhalb der Umgebungstemperatur. Die entsprechende Wärmestrahlung kann daher nicht gegen die thermische Untergrundstrahlung separiert werden.

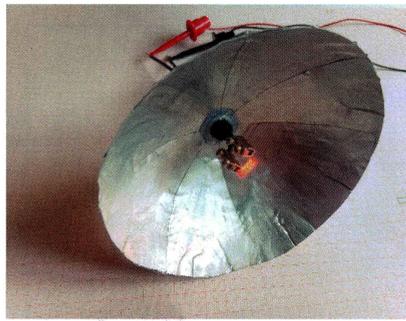
Im Vorfeld haben wir auch Experimente mit Wärmebildkameras durchgeführt. Diese Experimente waren jedoch nicht erfolgreich, da die uns zur Verfügung stehenden Kameras im Langwellenbereich von 7,5–14 μm empfindlich sind und somit eine Wärmestrahlung bei



1 | Darstellung der drei Normalschwingungen des CO₂ sowie der zugehörigen Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung, die diese Schwingungen anregen könnten. Dabei ist zu beachten, dass die symmetrische Streckschwingung wegen ihrer Symmetrie nicht an die Wärmestrahlung ankoppelt.



2 | Übersicht zum experimentellen Aufbau. Die Strahlungsquelle steht links, der Detektor rechts.



3a | Details der Strahlungsquelle



3b | Details des Detektors

4,26 μm nicht detektieren können. Möglich ist jedoch eine direkte Sichtbarmachung der Absorption von IR-Strahlung durch CO_2 über Wärmebildkameras mit einer Empfindlichkeit im Mittelwellenbereich und unter Verwendung von entsprechenden Infrarotfiltern [3].

Experimenteller Aufbau

Abbildung 2 zeigt den experimentellen Aufbau, der sich bei entsprechender Vorbereitung innerhalb weniger Stunden herstellen lässt. Er besteht aus zwei einander gegenüber angeordneten Hohlspiegeln aus stärkerer Aluminiumfolie. Die Spiegelkalotten haben einen Öffnungsdurchmesser von 12 cm; der Radius der Kugelkalotte beträgt ca. 6 cm. Der relevante Strahlenverlauf erfolgt über die zwei Spiegelflächen zwischen den beiden Brennpunkten bei $R/2$.

Im Brennpunkt des ersten Spiegels wird Wärmestrahlung mittels einer rotglühenden Wendel (ca. 600 °C/873 K) erzeugt (s. Abb. 3a). Die gegenüber $T_{4,26 \mu\text{m}} = 676 \text{ K}$ etwas höher gewählte Temperatur führt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz zu einer deutlich höheren und vorteilhaften Strahlungsemission der Glühwendel.

Die Glühwendel ist aus Kanthal®-Draht, einer Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung, gebogen (0,2 mm \varnothing , ca. 14 Windungen). Sie wird mit zwei Lüsterklemmen (mit entfernter Kunststoffummantelung) an zwei isolierten Kupferdrähten (0,5 mm) fixiert. Ersatzweise lässt sich auch eine Kugelschreiberfeder als Glühwendel verwenden.

Im Brennpunkt des zweiten Spiegels befindet sich ein Thermometer (s. Abb. 3b). Wir benutzen zur Temperaturmessung ein Thermoelement (Chromel/

Alumel), das wir mit einem kommerziellen Thermoelementverstärker auslesen. Alternativ kann man auch die Spitze eines Alkoholthermometers im Brennpunkt montieren. Für die effektive Absorption der Wärmestrahlung ist eine Fahne aus schwarzem Isolierband (Fläche ca. 1 cm²) auf dem Thermoelement angebracht. Diese Fahne stellt das eigentliche Bolometer dar. Die an ihr gemessene Temperatur ist näherungsweise proportional zu der von der Fahne absorbierten Strahlungsleistung.

Sowohl beim Detektor als auch bei der Strahlungsquelle wurde ein Kunststoffrohr (Hülle eines Filzstifts) zur Halterung und Zuführung mit Heißkleber eingeklebt. Das Thermoelement wie auch die Zuleitungen zur Glühwendel lassen sich im Kunststoffrohr verschieben. Dadurch können die jeweiligen Positionen im Hohlspiegel auf eine maximale Temperatur am Detektor justiert werden.

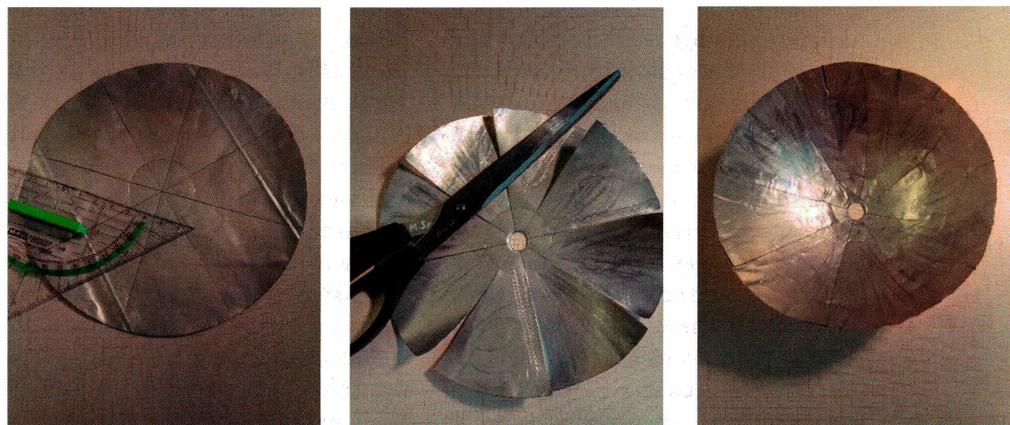
Die Hohlspiegel sind aus der Aluminiumfolie einer Grillschale hergestellt. Man schneidet dazu einen Kreis aus,

den man dann radial ca. achtmal einschneidet, auf einer Kugel vorformt und mit Klebeband auf der Rückseite in der Form fixiert (s. Details in Abb. 4). Hierbei lohnt sich eine möglichst genaue Modellierung der Kugelfläche.

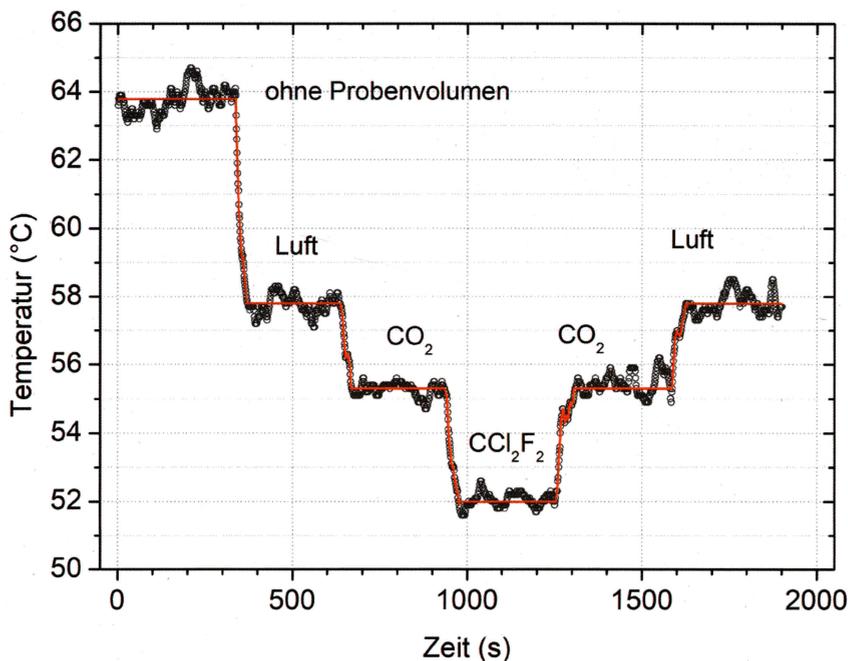
Das Probenvolumen ist ein Plexiglasrohr mit einem Durchmesser von 12 cm und einer Länge von ca. 30 cm. Links und rechts ist es mit einer Membran aus üblicher Haushaltsfrischhaltefolie verschlossen. Diese ist auf den Rohrenden mit Gummiringen fixiert. Zur einfachen Einleitung oder zum Tausch der Proben-gase sind zwei seitliche Stutzen in das Probenrohr eingeklebt.

Die transparenten Rohre für die Herstellung der Probenvolumina kann man auch aus 2-l-PET-Flaschen heraus schneiden. Selbstverständlich sind auch nicht transparente Materialien für die Rohre möglich; diese vermitteln jedoch weniger eindrucksvoll die optische Transparenz der Gase.

Wir haben uns mehrere Probenvolumina hergestellt und mit verschiedenen Gasen (Luft, CO_2 und Frigen) ge-



4 | Details der Herstellung der Hohlspiegel für die Strahlungsquelle und den Detektor



5 | Temperaturkurven am Detektor für Probenvolumina mit unterschiedlichen Gasen (Luft, CO₂, Frigen (CCl₂F₂)). Die Messpunkte wurden im Abstand von einer Sekunde aufgenommen. Die rote Linie stellt einen gleitenden Mittelwert dar. Die Kurve zeigt, dass reproduzierbar gleiche Temperaturen erreicht werden.

füllt. Dies erlaubt es, durch leichtes Austauschen die unterschiedliche Absorptionswirkung der Gase wirkungsvoll zu zeigen.

Messergebnisse

Nach Einspeisung eines Stroms durch die Glühwendel (ca. 10 V, 1,3 A) misst man nach kurzer Zeit eine konstante Temperatur von 64 ± 1 °C am Detektor (s. Abb. 5). Wir erreichen also einen Anstieg gegenüber Raumtemperatur (23 °C) von ca. 40 K. Diesen Temperaturanstieg kann man durch die Ausrichtung der Spiegel zueinander und die Positionierung der Glühwendel sowie des Thermoelements optimieren.

Verzichtet man in der gleichen Anordnung auf einen der Hohlspiegel (um den Detektor oder das Filament), so wird lediglich ein Temperaturanstieg von 4 K am Detektor erreicht. Entfernte man beide Spiegel, so konnte kein Temperaturanstieg mehr registriert werden. Die Hohlspiegel führen also sehr effektiv zu einer erhöhten Kopplung der Strahlungsquelle und des Detektors und sind unbedingt erforderlich.

Das Einsetzen eines mit Luft befüllten Probenvolumens senkt die Temperatur am Detektor zunächst auf 54 °C ($\Delta T = -10$ K), was auf die Strahlungs-

absorption an den Folienfenstern zurückzuführen ist. Ein mit CO₂ gefülltes Probenvolumen senkt die Temperatur am Detektor eindeutig und reproduzierbar um weitere 3 K.

Aus dem Versuchsaufbau ergibt sich damit direkt, dass die geringere Strahlungsleistung am Detektor durch eine vom CO₂ absorbierte Strahlung bedingt sein muss. Der ΔT -Effekt erscheint quantitativ zunächst als klein. Nur ca. 10 % der Strahlungsleistung werden durch das CO₂ absorbiert. Man muss dabei aber berücksichtigen, dass die Absorptionsbande von CO₂ Wärmestrahlung nur in einem sehr kleinen Wellenlängenbereich des gesamten breiten Emissionsspektrums mit der Charakteristik einer Schwarzkörperstrahlung absorbiert.

In Abbildung 5 zeigen wir zudem, wie die Absorption bei Verwendung des die Ozonschicht schädigenden und deshalb heute verbotenen Gases Frigen (CCl₂F₂) noch weiter gesteigert wird. Frigen sollte daher für dieses Experiment in der Schule nicht eingesetzt werden. Hier bietet sich eher die Verwendung von Gasen aus Spraydosen, z.B. Propan und Butan) an. Allerdings sollte man hier Sicherheitsmaßnahmen hinsichtlich der möglichen Entzündung oder Verpuffung durch die Glühwendel treffen.

Insgesamt erwies sich der experimentelle Aufbau als sehr zuverlässig, und die Temperaturänderung beim Tausch der Probenvolumina stellt sich in wenigen Sekunden ein (s. Abb. 5). Jedoch muss man Sorge dafür tragen, dass die Temperaturmessung nicht durch thermische Luftströmung oder auch variierende Einstrahlung von Körperwärme verfälscht wird.

Erfahrungen und Ausblick

Das Experiment wurde im Rahmen der Schülerrallye 2020 an der Universität Bonn konzipiert und von Schülerinnen und Schülern im Alter von 14 bis 17 Jahren durchgeführt. Dabei haben wir den Jugendlichen auch die Aufgabe gestellt, entsprechende Probenvolumina von Gasen mithilfe der gemessenen Temperaturabsenkung anhand tabellierter Kennwerte zu identifizieren.

Neben dem direkten Nachweis der Absorption von Wärmestrahlung durch verschiedene Gase (z. B. Propan und Butan als Treibgase in Spraydosen und CO₂ aus einer Gaspatrone für die Herstellung von Mineralwasser) bietet der Versuch auch die Möglichkeit, die Strahlungsemission zu untersuchen. Dazu variiert man die Temperatur der Glühwendel durch Veränderung des Heizstroms. Interessant ist es zu prüfen, bei welcher Temperatur die Apparatur den größten ΔT -Effekt zeigt.

Literatur

- [1] Bergmann, L.; Schaefer, C.: Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 3. Berlin: de Gruyter, 1998.
- [2] Sirtl, S.: Absorption thermischer Strahlung durch atmosphärische Gase. Wissenschaftliche Arbeit für das Staatsexamen im Fach Physik. Universität Freiburg, 2010, <https://docplayer.org/18989667-Absorption-thermischer-strahlung-durch-atmosphaerische-gase.html>.
- [3] Vollmer, M.; Möllmann, K. P.: CO₂-Nachweis mit Infrarotkameras. Auf der Spur von Kohlendioxid. In: Physik in unserer Zeit 43 (2012), Nr. 185. – <https://doi.org/10.1002/piuz.201201306> [24.11.2021].

Martin Specht und Moritz Sokolowski