

Treibhauseffekt

Versuchsziele

- Verständnis der physikalischen Grundlagen des Treibhauseffektes
- Vergleich der Treibhauswirkung verschiedener Gase anhand ihrer Absorptionseigenschaften
- Verständnis der quantenchemischen Grundlagen der IR-Absorption

Grundlagen

Der Treibhauseffekt wurde 1824 von Joseph Fourier entdeckt. Er erkannte, dass die Erde wärmer war, als sie anhand der damals bekannten Strahlungsgesetze sein müsste. Er führte dies auf die Beobachtung zurück, dass die Erdatmosphäre gut durchlässig für sichtbares Licht, aber schlecht durchlässig für Infrarotstrahlung ist. Dies führe seiner Ansicht nach dazu, dass die Wärme bodennah festgehalten wird. Schon er wies auf einen möglichen Einfluss des Menschen auf das Erdklima hin. 1862 identifizierte dann John Tyndall die für den Treibhauseffekt hauptsächlich verantwortlichen Gase Wasserdampf und CO_2 . Erste quantitative Berechnungen zur Treibhauswirkung von CO_2 wurden 1896 von Svante Arrhenius durchgeführt. Die globale Erwärmung durch CO_2 -Ausstoß des Menschen wurde von Arrhenius noch nicht als Problem gesehen. Stattdessen erhoffte er sich bessere klimatische Verhältnisse und höhere Ernten.

1958 begann Charles D. Keeling die systematische Erforschung des anthropogenen Treibhauseffektes. Durch ihn wurden zahlreiche Messstationen für Kohlendioxid in der Atmosphäre eingerichtet. Die Keeling-Kurve gibt den Verlauf der CO_2 -Konzentration seit 1958 an. Keeling erbrachte den Nachweis, dass sich die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre durch menschliche Aktivität erhöht.

Die negativen Folgen einer möglichen, durch Treibhausgasemission verursachten globalen Erwärmung wurden erst im Laufe der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erkannt. Im Jahre 1988 wurde von den vereinten Nationen das IPCC

(International Panel on Climate Change) gegründet mit dem Ziel, die Forschungsergebnisse aller führenden Klimaforscher weltweit als Empfehlungen für die Politik zusammenzufassen. Inzwischen wird es vom IPCC als äußerst wahrscheinlich angesehen, dass der menschliche Einfluss der Hauptgrund für die seit Mitte des 20. Jahrhunderts beobachtete globale Erwärmung ist. Negative Konsequenzen der globalen Erwärmung, die vom IPCC prognostiziert werden, sind Rückgang von Eismengen insbesondere in der Arktis, ein Anstieg des Meeresspiegels, Änderungen des globalen Wasserkreislaufes und damit verbunden die Zunahme extremer Wetterereignisse wie Starkregen oder Dürren.

Die Wirkung des Treibhauseffektes auf die mittlere Temperatur der Erdoberfläche lässt sich mit dem Gleichgewicht zwischen eingestrahelter und abgestrahlter Strahlungsleistung erklären. Feststoffe und Flüssigkeiten mit einer Temperatur von mehr als 0 Kelvin senden Wärmestrahlung aus, deren Spektrum allein abhängig von ihrer Temperatur ist. Das Spektrum gleicht einer verzerrten Gaußschen Glockenkurve, deren Maximum sich mit steigender Temperatur zu kurzen Wellenlängen verschiebt (Planckverteilung). Die von einem Körper ausgesandte Strahlung wird also mit steigender Temperatur energiereicher.

Die Sonne hat eine Temperatur von etwa 5.777 K. Ihr Strahlungsmaximum entspricht dem für uns sichtbaren Licht. Die auf einen Körper einwirkende Strahlungsleistung pro Fläche sinkt quadratisch mit größer werdendem Abstand zur Sonne. Auf die kugelförmige Erde trifft durchschnittlich eine Strah-



Abb. 1: Versuchsaufbau.

lungsleistungsdichte von 342 W/m^2 . Hiervon wird ein Teil von Wolken, Aerosolen und der Erdoberfläche selbst reflektiert. Der Großteil der einfallenden UV- und Infrarotstrahlung wird bereits in der oberen Atmosphäre von der Ozonschicht und von Wasserdampf absorbiert und wieder emittiert. Für sichtbares Licht hingegen ist die Atmosphäre weitestgehend durchlässig (atmosphärisches Fenster). Es gelangt ungehindert zur Erdoberfläche und erwärmt diese. Ohne den Treibhauseffekt würde eine Strahlungsleistungsdichte von netto etwa 205 W/m^2 von der Erde absorbiert werden.

Absorption elektromagnetischer Strahlung führt zu Erwärmung des absorbierenden Körpers. Im Sinne des Strahlungsgleichgewichtes erwärmt sich der Körper so lange, bis die absorbierte Strahlungsleistung der vom Körper emittierten Strahlungsleistung entspricht. Ohne Berücksichtigung des Treibhauseffektes hätte die Erde eine Temperatur von $-28 \text{ }^\circ\text{C}$ (245 K). Nach der Planckverteilung liegt das Strahlungsmaximum eines Körpers dieser Temperatur im infraroten Bereich. Die von der Erde ausgehende Strahlung ist also IR-Licht.



Treibhausgase haben wie das Dach eines Treibhauses die Eigenschaft, bei bestimmten Wellenlängen Infrarotstrahlung zu absorbieren und wieder zu emittieren. Die Emission von Strahlung erfolgt in alle Raumrichtungen, sodass ein großer Teil der IR-Strahlung wieder in Richtung Erdoberfläche zurückgestrahlt wird (atmosphärische Gegenstrahlung). Dieser Teil der Strahlung erwärmt die Erde zusätzlich, sodass sich das Strahlungsgleichgewicht verschiebt. Unter Berücksichtigung des Treibhauseffektes ergibt sich eine mittlere Temperatur der Erdoberfläche von etwa $+15 \text{ }^\circ\text{C}$.




Eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre hat nach diesem Modell eine Erhöhung der mittleren Oberflächentemperatur zur Folge.

Im hier vorgestellten Versuch werden die IR-Absorptionseigenschaften für verschiedene Gase bestimmt, um anhand dessen ihre Treibhauswirkung abzuschätzen. Der Versuch soll als Modellversuch dazu beitragen, zu verstehen, warum Treibhausgase Infrarotstrahlung absorbieren.

Gefährdungsbeurteilung

Je nachdem, welche Gase man untersuchen möchte, sind entsprechende Gefahren- und Sicherheitshinweise zu beachten. Im Folgenden sind die H- und P-Sätze für die Gase in der hier durchgeführten Beispielmessung dargestellt.

Argon	
 <p>Signalwort: Achtung</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.</p>
Kohlenstoffdioxid	
 <p>Signalwort: Achtung</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.</p>

Ethan	
 <p>Signalwort: Gefahr</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H220: Extrem entzündbares Gas.</p> <p>H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen und anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.</p> <p>P377: Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.</p> <p>P381: Alle Zündquellen entfernen, wenn gefahrlos möglich.</p> <p>P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.</p>
Isobutan	
 <p>Signalwort: Gefahr</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H220: Extrem entzündbares Gas.</p> <p>H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen und anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.</p> <p>P377: Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.</p> <p>P381: Alle Zündquellen entfernen, wenn gefahrlos möglich.</p> <p>P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.</p>
Sauerstoff	
 <p>Signalwort: Achtung</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H270: Kann Brand verursachen oder verstärken; Oxidationsmittel.</p> <p>H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P244: Druckminderer frei von Fett und Öl halten.</p> <p>P220: Von brennbaren Materialien entfernt aufbewahren.</p> <p>P370+P376: Bei Brand: Undichtigkeit beseitigen, wenn gefahrlos möglich.</p> <p>P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.</p>

Geräte und Chemikalien

1 IR-Gas-Experimentierkit	666 2652
1 Pocket-CASSY	524 018
1 CASSY Lab 2	524 220
1 μ V-Box.....	524 040
1 DC Netzgerät 2 x 0...16 V/2 x 0...5 A	521 535
2 Experimentierkabel 19 A, 50 cm, r/b, Paar	500 45
2 Schnabelklemmen, blank, Satz 6.....	501 861
1 Thermosäule nach Moll	557 36
1 Vakuum-Handpumpe.....	375 58
1 Feinregulierungsventil zu Minicandosen.....	660 980
1 PVC-Schlauch 6 mm \varnothing , 1 m.....	604 500
1 Silikonschlauch 5 mm \varnothing , 1 m	604 431
1 Silikonschlauch 4 mm \varnothing , 1 m	667 197
1 Schlauchverbinder PP, 4 ... 8/8 ... 12 mm	604 520
1 Minican-Druckgasdose Argon.....	661 0010
1 Minican-Druckgasdose Ethan.....	660 988
1 Minican-Druckgasdose Isobutan.....	661 0011
1 Minican-Druckgasdose Kohlenstoffdioxid	660 999
1 Minican-Druckgasdose Sauerstoff	660 998
Zusätzlich erforderlich:	
1 Lineal	
1 USB- Kabel	
1 PC mit Windows XP oder höher	

Versuchsaufbau und -vorbereitung

Die Halteklemmen werden in die dafür vorgesehenen Löcher in das Tablett eingesteckt (siehe Abb. 1).

Mit Hilfe der beiliegenden Gummibänder werden beide Öffnungen der Küvette mit PE-Folie verschlossen. Die schwarzen Verschlusskappen werden auf die Gaseinleitöffnungen gesteckt und eine GL-Verschlusskappe auf die Schrauböffnung geschraubt.

Die Küvette wird in die mittleren beiden Halteklemmen eingesteckt. Die Glühwendel wird unter Verwendung des Hitzeschutzes aus Glasgewebeband dahinter montiert. In die Halteklemme vor der Küvette wird die Thermosäule nach Moll eingesteckt.

Die Schutzkappe der Thermosäule wird zum Messen abgenommen, da diese einen großen Teil der Infrarotstrahlung absorbiert.

Das Netzteil wird rechts von der Messapparatur aufgestellt und an den Strom angeschlossen.

Mit zwei Experimentierkabeln und zwei Schnabelklemmen aus Metall wird die Glühwendel an den Plus- und an den Minuspol des linken Ausgangs des Netzgerätes angeschlossen. Durch Drücken beider Einstellungsknöpfe wird der rechte Ausgang hinzu geschaltet. Der Stromstärkereglер wird auf Maximum gedreht und dann eine konstante Spannung von 2 V eingestellt.

Plus- (rot) und Minuspol (schwarz) der Thermosäule werden mit Experimentierkabeln an die Mikrovoltbox angeschlossen. Die Mikrovoltbox wird in das Pocket-CASSY eingesteckt und das Pocket-CASSY über ein USB-Kabel mit dem Computer verbunden. CASSY Lab 2 wird gestartet.

Die Schläuche für das Einleiten der Gase und die Benutzung der Vakuumpumpe werden auf die benötigte Länge gekürzt. Für das Einleiten der Gase wird der Schlauch mit 4 mm Innendurchmesser verwendet. Der Schlauch mit 6 mm Innendurchmesser wird über einen Schlauchverbinder mit einem Schlauch mit 5 mm Innendurchmesser verbunden und an der Vakuumpumpe angebracht.

Versuchsdurchführung

Die Messung wird gestartet. Es wird gewartet, bis sich ein konstanter Wert eingestellt hat. Dies kann 10 – 15 Minuten dauern, da sich die Glühwendel noch eine Weile aufheizt und somit die von ihr ausgehende Strahlungsleistung steigt. Das Feinregulierungsventil wird auf die CO₂-Minican-Dose geschraubt und das Ventil mit einem Schlauch mit 4 mm Durchmesser vorsichtig an die Gaseinleitöffnung angeschlossen. Die Verschlusskappe der zweiten Öffnung wird entfernt.

Sobald sich eine konstante Messspannung eingestellt hat, wird ca. 1 Minute bei mäßigem Gasdruck CO₂ eingeleitet. Danach wird das Ventil geschlossen und die Verschlusskappe vorsichtig wieder aufgesetzt. Der Start der Messung kann durch Einfügen einer senkrechten Linie in CASSY Lab (Rechtsklick → + Markierung setzen → | Senkrechte Linie) markiert werden (siehe Abb. 2).

Der Schlauch wird nach der Messung nicht abgenommen. Stattdessen wird das Ventil von der Minican-Dose abgeschraubt und auf die nächste Dose aufgeschraubt. Für jedes folgende Gas geht man genau so vor wie bei CO₂. Es empfiehlt sich, abwechselnd ein Treibhausgas und ein Nicht-Treibhausgas zu untersuchen, damit der Unterschied deutlicher zu sehen ist. Der Übersicht halber können die Namen der eingeleiteten Gase ebenfalls in CASSY Lab (Rechtsklick → + Markierung setzen → ABC Text) eingefügt werden (siehe Abb. 2).

Am Ende der Messung sollte mit der Vakuum-Handpumpe wieder Luft eingefüllt und ein zweiter Vergleichswert aufgenommen werden, da die Messung leichten Schwankungen unterliegen kann.

Beobachtung

Je nach dem, welches Gas eingeleitet wurde, wird an der Thermosäule nach Moll eine unterschiedliche Strahlungsleistung registriert (siehe Abb. 2).

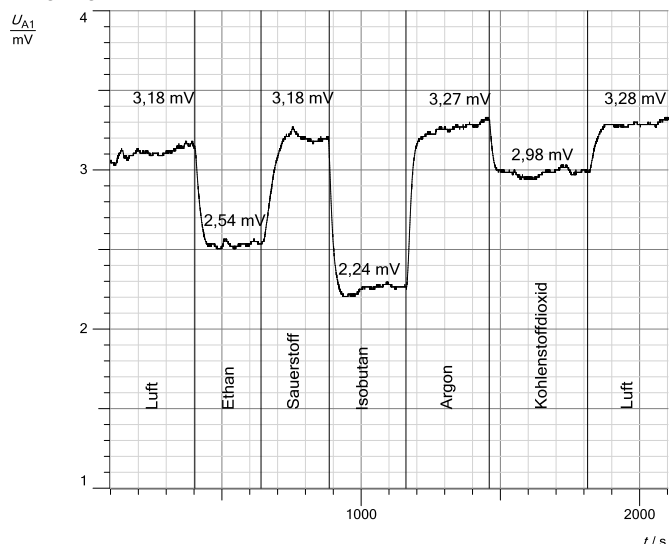


Abb. 2: Beispielmessung verschiedener Gase.

Auswertung

Die Thermosäule nach Moll misst die Strahlungsleistung der einfallenden Strahlung. Ihr Messbereich liegt zwischen 0,15 μ m und 15 μ m. Der polierte Metalltrichter der Thermosäule lenkt die einfallende Infrarotstrahlung auf die geschwärzte Scheibe im Zentrum des Trichters. Diese steht in Kontakt mit den Messlötstellen von 16 in Reihe geschalteten Thermoelementen. Die einfallende Strahlung erhitzt die geschwärzte Scheibe bis zum Gleichgewichtszustand. Dadurch

entsteht ein Temperaturgefälle zwischen den gegenüberliegenden Messlötstellen der Thermoelemente. Nach dem Seebeck-Effekt wird so eine Thermospannung bewirkt, die proportional zur einfallenden Strahlungsleistung ist. Eine einfallende Strahlungsleistung von 1 mW ergibt eine Messspannung von 0,16 mV. Mittels Dreisatz lassen sich aus den gemessenen Spannungen die dazugehörigen Strahlungsleistungen berechnen (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Strahlungsleistungen zu den gemessenen Spannungen.

Gas	Messspannung	Strahlungsleistung
Luft 1	3,18 mV	19,9 mW
Ethan	2,54 mV	15,9 mW
Sauerstoff	3,18 mV	19,9 mW
Isobutan	2,24 mV	14,0 mW
Argon	3,27 mV	20,4 mW
Kohlenstoffdioxid	2,98 mV	18,6 mW
Luft 2	3,28 mV	20,5 mW

Im obigen Messbeispiel wurde die Luft zur Kontrolle zweimal gemessen (siehe Abb. 2). Der zweite Messwert liegt um 0,1 mV höher als der erste. Gründe hierfür können eine Zunahme der Strahlungsintensität der Strahlungsquelle sein, eine Abnahme der Raumtemperatur oder eine minimale Verschiebung des Winkels der Thermosäule. Um diese Abweichung zu berücksichtigen wurde in allen Berechnungen der Mittelwert von Anfangs- und Endwert eingesetzt.

$$\begin{aligned} \text{Strahlungsleistung Luft Mittel} &= \\ &= \frac{19,9 \text{ mW} + 20,5 \text{ mW}}{2} = 20,2 \text{ mW} \end{aligned}$$

Aus den Werten in Tabelle 1 lässt sich die prozentuale Abnahme der Strahlungsleistung relativ zu Luft berechnen.

Beispiel: Luft und Ethan

$$\begin{aligned} \frac{\text{Strahlungsleistung Ethan}}{\text{Strahlungsleistung Luft (Mittel)}} &= \frac{15,9 \text{ mW}}{20,2 \text{ mW}} \cdot 100 \% = 78,7 \% \\ 78,7 \% - 100 \% &= -21,3 \% \end{aligned}$$

Beim Einleiten von Ethan sank damit die gemessene Strahlungsleistung um 21,3 %. Die prozentualen Änderungen der durchgehenden Strahlungsleistung der verschiedenen Gase sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Prozentuale Abnahme der Strahlungsleistung

Gas	Abnahme der Strahlungsleistung
Ethan	-21,3 %
Sauerstoff	-1,49 %
Isobutan	-30,7%
Argon	+0,99 %
Kohlenstoffdioxid	-7,92 %

Versuchsergebnis

Die Beobachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Edelgase wie Argon und homoatomar aufgebaute zweiatomische Gase wie Sauerstoff zeigen relativ zu Luft keine Verminderung der Strahlungsleistung.
2. Je komplexer mehratomige Gase aufgebaut sind und aus je mehr Atomen sie bestehen, desto stärker verringert sich die

gemessene Strahlungsleistung (Kohlenstoffdioxid < Ethan < Isobutan).

Absorptionseigenschaften von Molekülen lassen sich mit der Quantentheorie erklären. Die Energien der Bewegungszustände von Molekülen sind gequantelt. Das bedeutet, dass der Wechsel zwischen verschiedenen Rotations- und Schwingungszuständen von Molekülen nur unter Aufnahme oder Abgabe diskreter Energiepakete erfolgen kann, die einem Vielfachen des Planckschen Wirkungsquantums h entsprechen. Die Energie für die Anregung eines Rotations- oder Schwingungszustandes kann ein Molekül durch Aufnahme von Lichtquanten erhalten, deren Energie genau der Energiedifferenz zwischen zwei Energiezuständen entspricht. Besonders die Energien der Schwingungszustände von Molekülen entsprechen der von Lichtquanten, deren Wellenlänge im u.a. Infrarotbereich liegt.

Für die Anregung von Schwingungszuständen gilt, dass nur solche Schwingungszustände IR-aktiv sind, bei denen sich das Dipolmoment des Moleküls ändert. Edelgase und zweiatomige homoatomare Moleküle wie N_2 oder O_2 absorbieren kein IR-Licht, da sie kein permanentes Dipolmoment aufweisen und es keine Schwingungszustände gibt, bei denen sich das Dipolmoment ändert. In unserem Messbeispiel zeigen Sauerstoff und das Edelgas Argon in Übereinstimmung mit der Theorie keine stärkere Absorption als Luft.

Je komplexer ein Molekül aufgebaut ist, desto mehr Schwingungszustände existieren, bei denen sich das Dipolmoment ändert. Komplexe Moleküle, die aus vielen Atomen aufgebaut sind, absorbieren deshalb mehr Infrarotstrahlung und sind stärkere Treibhausgase als Moleküle, die aus nur wenigen Molekülen bestehen.

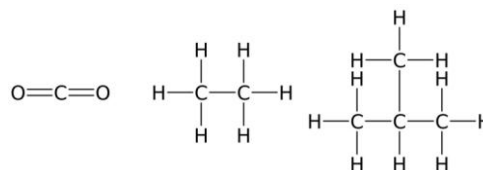


Abb. 3: Untersuchte Stoffe. Von links nach rechts: CO_2 , Ethan und Isobutan.

Von den drei Molekülen, die in unserem Messbeispiel eine Absorption im Infrarotbereich zeigen, ist CO_2 , das aus nur drei Atomen besteht, am wenigsten komplex gebaut (siehe Abb. 3). In Übereinstimmung mit der Theorie zeigt es auch die geringste Abnahme der Strahlungsleistung, da es im Vergleich zu den komplexer gebauten Molekülen Ethan und Isobutan weniger IR-aktive Schwingungszustände aufweist.

Ethan ist aus 8 Atomen aufgebaut. Es zeigt eine höhere Abnahme der Strahlungsleistung als Kohlenstoffdioxid, aber eine geringere Abnahme der Strahlungsintensität als Isobutan, das aus 14 Atomen aufgebaut ist. Auch dieses Ergebnis stimmt mit der Theorie überein.

Obwohl CO_2 nicht das stärkste Treibhausgas ist, ist es für den anthropogenen Treibhauseffekt das wichtigste, da es bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entsteht. Jährlich werden durch die Menschheit ca. 32 Gigatonnen CO_2 in die Atmosphäre ausgestoßen, mit steigender Tendenz.

Reinigung und Entsorgung

Leere Minicandosen können im Hausmüll entsorgt werden, wenn zuvor sichergestellt ist, dass sie vollständig leer sind. Hierzu kann man sie bei geöffnetem Ventil ausgasen lassen. Vor der Entsorgung Gefahrstoffetikett entfernen.