

Versuche zum Treibhauseffekt

Absorption von Wärmestrahlung durch Glas und durch verschiedene Gase

Verfasser: Dr. Helmut Hoverath, Thelengasse 73,
53859 Niederkassel

Es werden anschauliche und einfach durchzuführende Experimente beschrieben, die eine fundierte Diskussion der Ursachen des Treibhauseffektes im Unterricht ermöglichen.

1 Einleitung

Der anthropogene Treibhauseffekt und die damit verbundene Diskussion um den Gebrauch einzelner Energieformen sind seit einigen Jahren nicht mehr aus den Schlagzeilen der Presse wegzudenken. Wissenschaftliche Untersuchungen und Klimamodellrechnungen [1] prognostizieren für das kommende Jahrhundert tiefgreifende klimatische Veränderungen auf der Erde, wenn die Menschheit die Rohstoffe der Erde weiterhin in dem Maße ausbeutet und die Energienutzung nicht deutlich umstellt [2, 3]. Viele politische Gruppierungen und Verbände schlagen unterschiedliche – ja meist sogar widersprechende – Handlungsstrategien vor, um den drohenden Klimaveränderungen Einhalt zu gebieten. Es ist deshalb notwendig, den Schülern – besonders in der Oberstufe – die nötigen Grundvoraussetzungen, naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten und fächerübergreifenden Zusammenhänge zu vermitteln, damit sie die Problematik eigenständig und differenziert einschätzen und verantwortungsvoll handeln können [4–6].

Der zentrale Begriff, mit dessen Hilfe eine mögliche globale Erwärmung der Erde beschrieben werden kann, ist der des Treibhauseffektes. Dieser erinnert zunächst an ein Gewächshaus, bei dem die Glaswände und -dächer verhindern, daß die vom Boden ausgesandte Wärmestrahlung aus dem Gewächshaus entweicht und somit zu einem großen Teil in ihm »eingefangen« bleibt.

Vom physikalischen Standpunkt aus gesehen passiert das kurzwellige Sonnenlicht die Glasflächen ungehindert und erwärmt den Boden des Gewächshauses. Dieser erwärmte Boden sendet seinerseits – gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz – elektromagnetische Energiestrahlung aus, die jedoch im Gegensatz zum einfallenden Sonnenlicht bedeutend langwelliger ist. Diese langwellige Wärmestrahlung wird dagegen vom Glas absorbiert und anschließend isotrop emittiert. Damit wird ein Teil der aus dem Treibhaus gerichteten Wärmestrahlung wieder in seinen Innenraum »zurückgerichtet« [7].

Ein sehr grober Detektor für Wärmestrahlung sind die vielen Temperaturrezeptoren der menschlichen Haut. Unterschiedlich warme Gegenstände können auf Grund ihrer unterschiedlich intensiven Wärme-

strahlung gespürt werden (z. B. eine leuchtende Glühbirne, das Lagerfeuer, ...).

Ein Meßgerät für Wärmestrahlung ist z. B. die Thermosäule nach MOLL (z. B. Leybold 55736); sie befindet sich in den meisten Physiksammlungen der Schulen. Das physikalische Meßprinzip der Säule beruht auf dem Seebeckeffekt (Thermoelektrische Spannung). Die Wärmestrahlung erwärmt eine geschwärzte Lötstelle von zwei unterschiedlichen Metallen, während die andere Lötstelle zwischen den beiden Metallen auf nahezu gleicher Temperatur gehalten wird. Auf Grund der unterschiedlichen Temperaturen der beiden Lötstellen baut sich zwischen diesen eine Thermospannung (eine Art Kontaktspannung) auf, die mit einem empfindlichen Voltmeter gemessen werden kann. Bereits die Wärmestrahlung einer Hand kann mit dieser Thermosäule deutlich nachgewiesen werden.

2 Handversuche: Treibhauseffekt mit Feststoffen

Für einen sehr einfachen Versuch – weitere finden sich in [8] –, der den Treibhauseffekt qualitativ dokumentiert, werden nur ein Haushaltsbügeleisen, eine etwa 2 mm dicke Glas- oder Plexiglasscheibe und die Thermosäule mit empfindlichem Voltmeter benötigt (Abb. 1) [9]. Um die Wärmeabstrahlung des Bügeleisens zu intensivieren, wird ein Teil der Heizoberfläche z. B. mit einer Kerzenflamme berührt. (In einem kleinen Vorversuch kann mit der Thermosäule gezeigt werden, daß durch eine Schwärzung der Heizoberfläche die Wärmeabstrahlung mehr als verdoppelt wird).

Zunächst wird die Thermosäule etwa 4 cm vor das auf maximale Temperatur eingeschaltete Bügeleisen gestellt. Dabei ist darauf zu achten, daß keine heiße Luft vom Bügeleisen direkt in die Thermosäule gelangen kann, da sonst primär der Wärmeenergie transport durch Konvektion nachgewiesen wird.

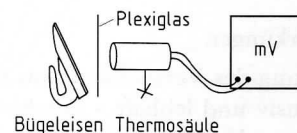


Abb. 1: Versuchsaufbau zur qualitativen Demonstration des Treibhauseffektes mit einer Plexiglasscheibe

Während der ersten Beobachtungsphase ist die periodische Ein- und Ausschaltsequenz des Temperaturfühlers im Bügeleisen deutlich hörbar und mit einer zeitlichen Verzögerung auch mit Hilfe der Thermosäule nachweisbar (s. Abb. 2: B).

Anschließend wird eine Glas- oder Plexiglasscheibe vor die Thermosäule gestellt (Abb. 2: C). Augenblicklich fällt die Thermospannung auf Null zurück. Erst nach etwa einer halben Minute steigt die Spannung wieder sehr langsam an. Sogar ein Entfernen des Bügeleisens (Abb. 2: D) bedeutet keine unmittelbare Absenkung der Thermospannung, sondern sie steigt zunächst noch leicht an und fällt anschließend langsam ab. Ein Wenden der Plexiglasscheibe verändert die Thermospannung auch nicht (Abb. 2: E).

Die Erklärung für diese Beobachtung liegt auf der Hand: Die Glas- bzw. Plexiglasscheibe läßt zwar die kurzwelligen elektromagnetischen Lichtwellen durch (die Scheibe ist durchsichtig), die relativ langwelligen elektromagnetischen Wärmestrahlen können hingegen die Scheibe nicht passieren. Sie werden vom Glas (Plexiglas) absorbiert. Damit ist die Scheibe undurchlässig für Wärmestrahlung. (Plexiglas® absorbiert jede Wärmestrahlung mit $\lambda > 2,6 \mu\text{m}$) [13]. Durch die Absorption der Wärmestrahlung erwärmt sich die Scheibe zunehmend und strahlt ihrerseits Wärmestrahlung ab, die von der Thermosäule registriert wird.

Dieser einfache Versuch läßt sich mit seinen qualitativen Ergebnissen direkt auf die Erdatmosphäre übertragen. Das Bügeleisen symbolisiert die von den Sonnenstrahlen erwärmte Erdoberfläche und die dünne Glas- bzw. Plexiglasscheibe die treibhauswirksamen Spurengase in der Erdatmosphäre.

In den Klassenstufen 10 bis 13 haben diese Handversuche lebhaftes Interesse, rege Diskussionen und bei einigen sogar stauende Faszination ausgelöst. Wichtige Begriffe der Wärmelehre konnten anhand dieser sehr überschaubaren Versuchsabschnitte erarbeitet werden.

3 Versuch: Treibhauseffekt mit Gasen

Ist diese Übertragung von der massiven Glas- bzw. Plexiglasscheibe auf die Spurengase in der Erdatmosphäre überhaupt zulässig? Der folgende Versuch soll darlegen, daß die Gase Sauerstoff und Stickstoff ein anderes Absorptionsverhalten für Wärmestrahlung zeigen als Kohlenstoffdioxid oder Luft, die man ausatmet.

3.1 Vorbemerkungen

Die Planung des Versuchsaufbaus kann mit den Schülern intensiv und lebhaft – ausgehend von dem vorangegangenen Versuch – erarbeitet werden. Einzelne Komponenten können dann als Hausaufgabe gebaut bzw. besorgt werden. Dabei sollte bei der Ver-

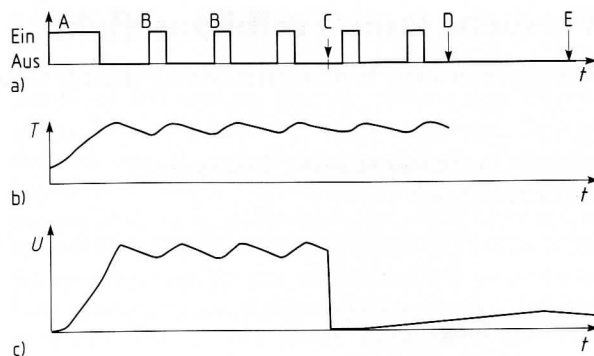


Abb. 2: a) Automatische Aus- und Einschaltsequenz des Bügeleisens.
 b) Schwankungen der Temperatur des Bügeleisens.
 c) Von der Thermosäule registrierte Wärmestrahlung.
 (A: Einschalten des Bügeleisens; B: Automatisches Einschalten nach Abkühlung; C: Einschieben einer Plexiglasscheibe zwischen Thermosäule und Bügeleisen; D: Entfernen der Wärmequelle; E: Wenden der Plexiglasscheibe)

suchsplanung die Schwierigkeit erörtert werden, daß ein Wärmeenergietransport durch Konvektion bei der Meßwerterfassung ausgeschlossen wird. Um diesen Meßfehler zu vermeiden, muß die Quelle für Wärmestrahlung oberhalb des Detektors für Wärmestrahlung angeordnet werden.

3.2 Material und Methode

Zwischen Wärmestrahlungsquelle und Detektor wird ein etwa 0,7 bis 1 m langes Aluminiumrohr mit einem Durchmesser von 10 cm (erhältlich in Bau- oder Eisenwarenhandlungen) gestellt (Abb. 3) [10, 11]. In dieses Rohr wird wenige Zentimeter vom unteren Ende eine Öffnung gebohrt, in die zur einfacheren Befüllung mit unterschiedlichen Gasen z. B. ein Autoventil ohne Ventileinsatz geklemmt wird. Unterhalb dieser Öffnung wird eine etwa 0,5 mm dünne, berußte Aluminiumscheibe auf einem Holzsockel – um Wärmeleitungen zu vermeiden – lose aufgelegt und an ihrer Unterseite mit einem empfindlichen Temperaturfühler wärmeleitend verbunden. Dabei hat sich der universell verwendbare Temperaturadapter TA1 aus dem Conrad-Elektronik-Sortiment bewährt, der an jedes Voltmeter (Digital- oder Demonstrationsmultimeter) angeschlossen werden kann. Jedoch auch jedes andere Temperaturmeßgerät mit einem Temperaturfühler, der eine geringe Wärmekapazität aufweist, ist geeignet. Auf das obere Ende des Rohres wird ein Glasgefäß (z. B. ein Becherglas oder eine gläserne Kaffeekanne), das ebenfalls auf der äußeren Unterseite berußt ist, mit 60 bis 70 °C warmem Wasser gestellt. Das Rohr sollte besonders nach unten gasdicht sein, damit das von der unteren seitlichen Öffnung einströmende Gas das im Rohr befindliche Gas nach oben verdrängt. Die obere Rohroffnung ist beim Befüllen mit einem Gas durch

einen abnehmbaren Deckel (Platte) verschlossen, der ein Loch mit einem Durchmesser von rd. 0,5 cm aufweist.

Mit diesem Versuchsaufbau können Meßsequenzen für verschiedene Gassorten aufgenommen werden (Abb. 4). Die Temperaturwerte werden anschließend in ihrer zeitlichen Entwicklung graphisch dargestellt. Je nach der Absorption der Wärmestrahlung durch die eingefüllte Gassorte wird die Aluminiumscheibe - und damit der Temperaturfühler - mehr oder weniger schnell erwärmt. Entsprechend dem ersten Versuch ist bei größerer Absorption des eingefüllten Gases die Erwärmung langsamer.

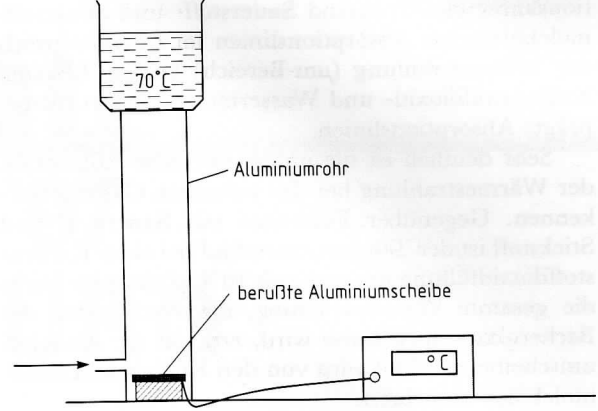


Abb. 3: Versuchsaufbau zur Demonstration des Treibhauseffekts mit verschiedenen Gasen

3.3 Messungen und Meßwerte

Für die Vorbereitung dieses Versuches muß der Temperaturfühler zuverlässig mit dem dünnen Aluminiumplättchen (z. B. mit Hilfe einer Wärmeleitpaste) verbunden sein. Zunächst wird aus einer Gasflasche etwa ein bis zwei Minuten lang ein schwacher Sauerstoffstrom durch die Ventilöffnung von unten in das Rohr geleitet. An dem Loch im Deckel kann mit Hilfe eines glimmenden Spans die Befüllung beobachtet werden. Jedoch sollte die Sauerstoffzufuhr erst etwa eine halbe Minute nach dem ersten Aufflammen des Spans abgestellt werden, damit eine möglichst vollständige Befüllung des Rohres gewährleistet ist.

Da sich das Gas bei der Expansion aus der Gasflasche abkühlt, muß mit der Messung so lange gewartet werden, bis sich ein Temperaturgleichgewicht zwischen dem Gas und der Rohrwand eingestellt hat. Dies ist an einer zeitlich konstanten Temperaturanzeige zu erkennen und dauert erfahrungsgemäß etwa vier bis acht Minuten. In der Zwischenzeit kann Wasser in einem Glasgefäß (z. B. Becherglas) auf 60 bis 70°C erwärmt werden.

Hat sich ein Temperaturgleichgewicht eingestellt, so wird der Deckel vom Rohr entfernt, das warme Becherglas auf das Rohr gestellt und eine Stoppuhr gestartet. Im Abstand von fünf Sekunden werden die Temperaturwerte notiert. Nach etwa dreiviertel bis eineinhalb Minuten wird das Becherglas entfernt, der Deckel wieder aufgesetzt und die Temperaturwerte noch weitere dreiviertel bis eineinhalb Minuten registriert.

Diese Prozedur wird für einige andere Gase (z. B. Stickstoff, Kohlenstoffdioxid, Zimmerluft und Ausatemluft) ebenfalls durchgeführt. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der an der Aluminiumscheibe in Abhängigkeit von den eingefüllten Gasen gemessenen Temperaturen.

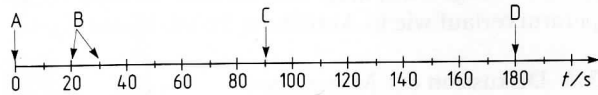


Abb. 4: Meßsequenz für ein Gas nach Erreichen des Temperaturgleichgewichts (A: Entfernung des Deckels, Aufsetzen der Wärmequelle; B: Messen des Widerstands bzw. der Temperatur im Zehn-Sekunden-Takt; C: Entfernung der Wärmequelle, Auflegen des Deckels; D: Versuchsende)

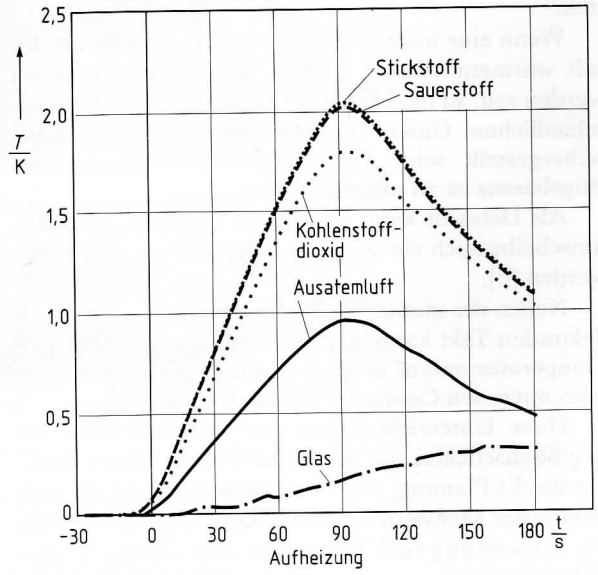


Abb. 5: Absorption der Wärmestrahlung bei verschiedenen Gasen (Je steiler der Kurvenverlauf desto geringer die Absorption)

3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Absorptionseigenschaften bei Gasmolekülen beruhen auf ihrer resonanten Vibrations- oder Rota-

tionsanregung. Während Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle keine Absorptionslinien im Energiebereich der Wärmestrahlung (μm -Bereich) zeigen, besitzen Kohlenstoffdioxid- und Wassermoleküle dort ausgeprägte Absorptionslinien.

Sehr deutlich ist die unterschiedliche Absorption der Wärmestrahlung bei den einzelnen Gasen zu erkennen. Gegenüber Füllungen mit Sauerstoff und Stickstoff ist der Temperaturverlauf bei einer Kohlenstoffdioxidfüllung um mehr als 10% abgesenkt: Nicht die gesamte Wärmestrahlung, die vom Boden des Becherglases ausgesandt wird, erreicht die Aluminiumscheibe, ein Teil wird von den Kohlenstoffdioxidmolekülen absorbiert.

Noch wesentlich signifikanter ist die Temperaturkurve bei Ausatemluft abgesenkt. Dieser ausgeprägte Effekt ist auf den zusätzlich zum Kohlenstoffdioxid enthaltenen Wasserdampf zurückzuführen.

Bei einer dünnen Glasplatte, die etwa zwei Zentimeter oberhalb der Aluminiumscheibe im Strahlengang befestigt wird, zeigt sich derselbe zeitliche Temperaturverlauf wie in Abbildung 2 c (ab Punkt C).

3.5 Diskussion der Materialien

Die Länge des Rohres ist notwendig, um genügend viele Kohlenstoffdioxidmoleküle für die Absorption zur Verfügung zu haben. Die besten Versuchsergebnisse wurden mit Aluminiumrohren beliebiger Wandstärke erzielt, bei denen die silbrigen Rohrwände die Wärmestrahlung nach unten reflektieren. Bei dunkel- oder schwarzwandigen Rohren wird die Wärmestrahlung von der Rohrwand absorbiert (s. o.) und der erwartete Effekt bleibt aus. Auf die Gasdichtigkeit nach unten muß besonderer Wert gelegt werden.

Wenn eine andere Wärmestrahlungsquelle als das mit warmem Wasser gefüllte Becherglas verwendet werden soll, so muß bei jeder Messung mit den unterschiedlichen Gasen dieselbe absolute Temperatur sichergestellt sein. Die Temperaturkonstanz eines Bügeleisens ist zu ungenau.

Als Detektor kann anstatt der berußten Aluminiumscheibe auch ein schwarzer Pappkarton verwendet werden [6].

Neben der manuellen Meßwerterfassung im Fünf-Sekunden-Takt kann zusätzlich ein x/y -Schreiber den Temperaturverlauf graphisch aufnehmen, oder aber man nutzt den Computer zur Meßwerterfassung.

Diese Unterrichtseinheit zur Demonstration des Treibhauseffektes mit unterschiedlichen Gasen benötigt für die Planung, den Versuchsaufbau und die Aufnahme der Meßwerte etwa eine Doppelstunde und für die Auswertung und Diskussion eine weitere Unterrichtsstunde.

Will man demgegenüber nur einen qualitativen Einblick in die Absorption von Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Gasen geben, kann statt des beschriebenen Wärmestrahlungsdetektors die Thermosäule aus dem ersten Versuch verwendet werden. Bei dieser Abwandlung des Versuchsaufbaus kann jedoch kein zeitlicher Temperaturverlauf sondern »nur« ein relatives Maß für die Absorption der Wärmestrahlung aufgenommen werden, da die Änderung der Thermospannung so schnell geht und sie deshalb zeitlich nicht aufgelöst werden kann.

Bedanken möchte ich mich für die freundliche Unterstützung von Herrn Dr. S. HOPPENAU (Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg) und für die konstruktiven Gespräche mit Herrn Dr. CHR. LUKNER (BMU), Herrn StD H. GÖHLER und nicht zuletzt bei Herrn Prof. Dr. K. HEINLOTH.

Literatur

- [1] S. HOPPENAU: Klimamodellierung und Klimaprognose. - PdN-Ph 43 (1994) 8-11
- [2] S. HOPPENAU: Energie im globalen Treibhaus; Teil 1 und 2. - MNU 45 (1992) 458-465; MNU 46 (1993) 13-20
- [3] Enquete Kommission: »Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre des 11. Deutschen Bundestages« (Hg.): (Zwischenbericht): Schutz der Erdatmosphäre - Eine internationale Herausforderung. - Zur Sache 5/88, 2. Auflage, Bonn 1989
- [4] H. HEISE: Das CO₂-Problem und der »Glashauseffekt« aus physikalischer Sicht. - MNU 37 (1984) 347-354
- [5] B. HUH: Das CO₂-Problem im fächerverbindenden Unterricht. - PdN-Ph 43 (1994) 33-34
- [6a] I. PARCHMANN - B. KAMINSKI - W. JANSEN: Die Wärmeabsorption von Gasen - Voraussetzungen für den Treibhauseffekt. - CHEMKON 1 (1995) 17-25
- [6b] I. PARCHMANN - W. JANSEN: Der Treibhauseffekt als Folge der Wärmeabsorption von Gasen. - CHEMKON 1 (1996) 6-11
- [7] K. HENNING: Treibhauseffekt - Einige physikalische Grundüberlegungen. - PdN-Ph 43 (1994) 2-8
- [8] B. HUH: Experimente zum Treibhauseffekt. - PdN-Ph 43 (1994) 26-32
- [9] B. HUH: Physikalische Experimente zum Treibhauseffekt. - BLK - Modellversuch Energienutzung und Klima; Neumünster: März 1993
- [10] S. BAKAN - S. HOPPENAU: IR-Absorption in CO₂ - Ein qualitatives Experiment. - PdN-Ph 43 (1994) 22-23
- [11] J. BARTSCH - F. H. EFFERTZ - CH. LUKNER: Absorption und Transmission atmosphärischer Gase - Eine Versuchssequenz zum Treibhauseffekt. - PdN-Ph 43 (1994) 23-26
- [12] H. HOVERATH: Der anthropogene Treibhauseffekt und die globale Energieproblematik - Physikalische Grundlagen für ein geschärftes Umweltbewußtsein, eine Unterrichtsreihe in der SEK II, 2. Staatsexamensarbeit Studienseminar Gymn. Bonn, Juni 1993
- [13] Röhm GmbH: Produktinformation und persönliche Mitteilung. - Röhm GmbH, Chemische Fabrik, 64275 Darmstadt □