

Die Problematik von Demonstrationsexperimenten zum Treibhauseffekt: Analyse und Lösungen

Verfasser: Dr. Erich Huber, Physiker, Mühlemattstraße 3, CH-6004 Luzern; Dr. Urs Aeschbacher, Institut für Psychologie der Universität Basel, Bernoullistrasse 16, CH-4056 Basel.

1 Das Verständnis des Treibhauseffekts in der Öffentlichkeit

Daß die künstliche Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehaltes der Erdatmosphäre den globalen Treibhauseffekt¹ in gefährlicher Weise verstärkt – davon ist in den Medien oft die Rede. Aber den meisten Menschen fehlt die zu einer selbständigen Beurteilung dieser Information notwendige Basis. Einerseits fehlt das wissenschaftliche Sachverständnis dazu, denn die selektive Absorption der Wärmestrahlung, aber nicht des eindringenden Sonnenlichts, durch das Kohlenstoffdioxidgas läßt sich nur quantenphysikalisch herleiten. Andererseits fehlt den allermeisten für die Absorption von Wärmestrahlung durch das Kohlenstoffdioxid auch die konkrete Erfahrungsbasis, wie wir sie etwa bei den Effekten zahlloser Schalter haben, die wir nicht theoretisch herleiten können, auf die wir uns aber aufgrund der alltäglichen, praktischen Erfahrung von Ursache und Wirkung verlassen. Das subjektive »Wissen« darüber bleibt so in einem Vorraum des bloßen Gehört- bzw. Gelesenhabens, und die einzige Beurteilungsmöglichkeit besteht in der Einschätzung der Glaubwürdigkeit der Quellen, was meist bloß aus einer politischen oder sonstigen Rahmeneinstellung heraus erfolgt.

Es ist das Ziel dieser interdisziplinären Arbeit darzulegen, wie das Phänomen der selektiven Strahlungsabsorption im Kohlenstoffdioxid – der Kern des Treibhauseffektes – in didaktischer Reduktion und dennoch

Da der Treibhauseffekt schwer zu vermittelnde physikalische Prozesse aufweist, ist es besonders wichtig, ihn durch ein Demonstrationsexperiment unmittelbar zu zeigen. In erster Linie bestimmen psychologisch-didaktische Kriterien, ob ein solches Experiment wirklich »unter die Haut geht«. Zudem ist die Forderung nach wissenschaftlicher Lauterkeit wichtig. Es hat sich nämlich erwiesen, daß bei gewissen naheliegenden Versuchsaufbauten nicht der Treibhauseffekt, sondern im wesentlichen ein durch Konvektion zustandekommendes Artefakt gemessen wird. Aus diesen Kriterien wurde ein Experiment erarbeitet, das die Absorption von Wärmestrahlung durch Kohlenstoffdioxid einem Laienpublikum als dramatischen Effekt vor Augen führt.

wissenschaftlich korrekt demonstriert werden kann. Das zu diesem Zweck von uns entwickelte Demonstrationsexperiment richtet sich in erster Linie an ein breites Laienpublikum, das keine langen Vorbereitungen und Erklärungen in Kauf zu nehmen gewillt ist. Es soll überraschen, zum Staunen anregen und damit zum erfahrungsmäßigen Anerkennen des Grundvorganges des Treibhauseffektes führen (»Kohlenstoffdioxid-Gas hält tatsächlich Wärmestrahlung zurück, ich habe es selbst gesehen!«).

2 Der Treibhauseffekt im naturwissenschaftlichen Unterricht an der Oberstufe

Hier zeigt sich die Situation mit etwas veränderten Schwerpunkten. Die Grundlagen zur Aufnahme komplexer naturwissenschaftlicher Abläufe sind vorhanden: es ist durchaus möglich, die Theorie des Treibhauseffekts im Unterricht zu behandeln. Da sie aber recht umfangreich ist, sollte darüber hinaus in einem Experiment eine konkrete Erfahrungsbasis vermittelt werden. Damit kann man vermeiden, daß Wissen, das kaum oder nur knapp die Schwelle zum eigentlichen Verständnis überwunden hat, rasch wieder versinkt bzw. keinen Niederschlag im Umweltverhalten findet. Im Rahmen des Oberstufenunterrichts mögen die nachfolgend beschriebenen Anforderungen an das Experiment etwas streng erscheinen. Im naturwissenschaftlichen Unterricht sind die theoretischen Voraussetzungen bei den Schülern besser, und weitere didaktische Möglichkeiten – z. B. zur Überbrückung von Wartezeiten – stehen zur Verfügung. Trotzdem können auch im Oberstufenunterricht bei Schülern Verhaltensweisen auftreten, wie sie etwa bei einem breiten Publikum an Ausstellungen beobachtet werden: Desinteresse bei längeren experimentellen Pausen oder schwer durchschaubaren Versuchsaufbauten und Manipulationen.

¹ Zum Begriff »Treibhauseffekt«: Der natürliche Treibhauseffekt beruht auf der Absorption der von der Erde abgestrahlten Wärmestrahlung (Infrarot, IR). Ohne dieses Zurückhalten von Wärme wäre die Temperatur auf der Erdoberfläche im Mittel -18°C , gegenüber den tatsächlichen $+15^{\circ}\text{C}$! Eine Erhöhung des Treibhauseffektes (vereinfachend als Treibhauseffekt bezeichnet) tritt ein, wenn der Gehalt der IR-aktiven Gase in der Atmosphäre zunimmt. Man schätzt, daß die Verdopplung des jetzigen Kohlenstoffdioxid-Gehaltes zu einer Erwärmung von etwa 1.1°C führt. Aufgrund von zusätzlichen Rückkopplungsmechanismen kann sich dieser Wert auf $2-4^{\circ}\text{C}$ erhöhen [1-3].

3 Anforderungen an ein publikumswirksames Demonstrationsexperiment

Damit das Demonstrationsexperiment in einer breiten Öffentlichkeit wirken kann, sollte es folgenden psychologisch-didaktischen Kriterien genügen:

- a) Einfachheit und Transparenz des experimentellen Aufbaus und der Manipulationen,
- b) leichte Durchführbarkeit: Auslösung und Effekt-ablesung sind problemlos möglich,
- c) Schnelligkeit des Effekts: der Effekt soll der Auslösung unmittelbar folgen,
- d) leichte Übertragbarkeit der Aussage auf den globalen Treibhauseffekt.

Das Kriterium a erleichtert den Wahrnehmungs- und Verständnisprozeß und vermeidet damit - mit Blick auf die Wichtigkeit der Botschaft - das notorisch frühe »Abschalten« bei vielen Adressaten. Kriterium b ermöglicht die spielerisch-aktive Auseinandersetzung des Publikums bzw. der Schüler mit dem Experiment. Kriterium c macht das Ausprobieren attraktiv und fördert zudem die direkte assoziative Gedächtniskopplung von Auslösung und Folgeereignis. Diese elementare Lernform ist beim konkreten Erfahrungslernen wichtig. Dazu tritt selbstverständlich das Kriterium der wissenschaftlichen Lauterkeit: der Effekt soll die globale Situation korrekt wiedergeben und frei von Artefakten sein.

4 Praktische Realisierung

Beim systematischen Testen verschiedener Experimentalanordnungen hat sich gezeigt, daß nur das in Abbildung 1 dargestellte Grund-Experiment alle obige Kriterien erfüllt (vgl. Abschnitt 5). Es handelt sich dabei um eine Messung der Abnahme der Intensität von IR-Strahlung beim Durchgang durch eine mit Luft oder Kohlenstoffdioxid gefüllte Meßzelle [4]. Die Aussage des Experiments ist klar und einfach: Kohlenstoffdioxid-Gas kann der Wärmestrahlung, die durch das Gas hindurchtritt, Energie entnehmen, d. h. sich mit Wärmeenergie »aufladen«.

Der Versuch ist kein vollständiges Abbild des Treibhauseffektes. Abbildung 2 zeigt ein Schema der verschiedenen Vorgänge, die zum globalen Treibhauseffekt führen. Das Demonstrationsexperiment führt die selektive Absorption von Wärmestrahlung vor Augen (Station 4 im Schema) und trifft damit genau die lernpsychologische Schwachstelle in der Kausalkette des Treibhauseffektes: Daß Kohlenstoffdioxid gerade die langwellige Wärmestrahlung der Erde absorbiert, aber nicht das kurzwellige Sonnenlicht, läßt sich nur quantenphysikalisch herleiten und bleibt dem Laien unverstandenes »Wortgeklingel«, für das ihm jede Aufnahmebasis fehlt [5]. Genau hier liefert das Demonstrationsexperiment nun eine unmittelbare Er-

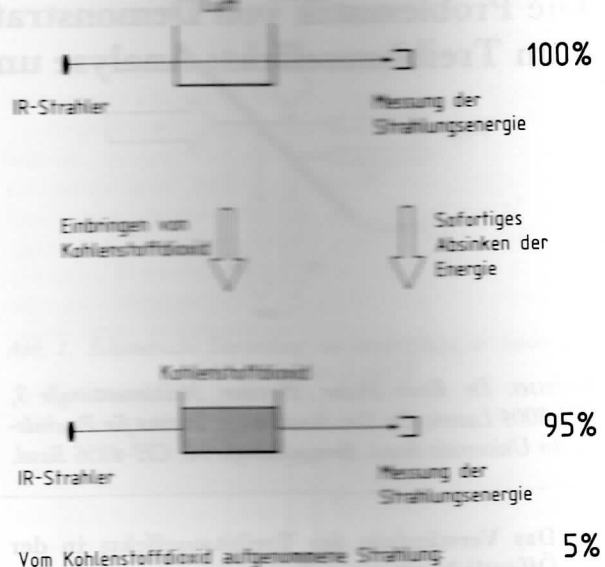


Abb. 1. Ablaufschema des Demonstrationsexperiments: Wird Kohlenstoffdioxid in den Weg eines Wärmestrahls eingebracht, so verliert die Strahlung im Kohlenstoffdioxid einen Teil ihrer Energie, d. h. das Gas »schluckt« (absorbiert) Wärmestrahlung.

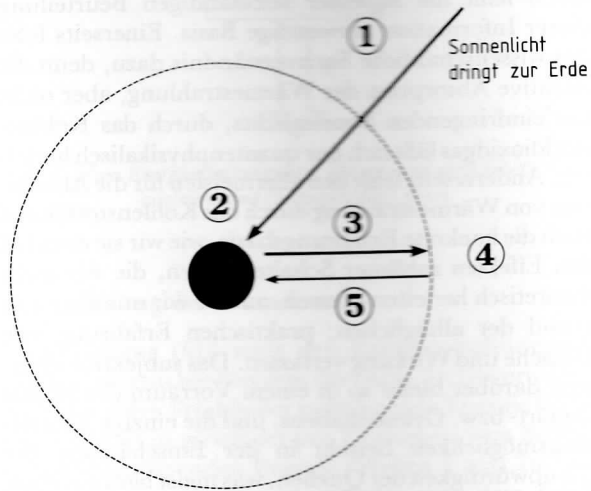


Abb. 2. Zur Einordnung der Experimentalaussage im Schema des globalen Treibhauseffektes.

1: Das Sonnenlicht dringt weitgehend ungehindert zur Erdoberfläche durch. 2: Das Sonnenlicht erwärmt die Erdoberfläche. 3: Die Erdoberfläche gibt ihrerseits (langwellige) Wärmestrahlung ab. 4: Langwellige Wärmestrahlung der Erde wird in kohlenstoffdioxidreicher Luftschicht teilweise absorbiert. 5: Kohlenstoffdioxid strahlt die aufgenommene Energie nach allen Seiten wieder ab, zum Teil auch auf die Erdoberfläche zurück. Das System Erdoberfläche/Atmosphäre wird über komplizierte, z. T. noch ungeklärte Ausgleichs- und Rückkopplungsprozesse erwärmt.

fahrungsbasis. Demgegenüber ist der Energieerhaltungssatz heute vielfach verankertes Allgemeinwissen auch des Laien, d. h. die Folgerung, daß die vom Koh-

lenstoffdioxid aufgenommene Energie nun das ganze System Erdoberfläche/Atmosphäre mit Wärmeenergie »auflädt«, leuchtet dem Laien leicht ein.

Das Experiment ist einfach; es gibt keine indirekten Manipulationen und Meßvorgänge, deren Bedeutung lange erklärt werden müßten (Abschnitt 5.7). Die Strahlungsmessung ist – durch Unterbrechen des Strahlengangs – qualitativ nachvollziehbar; das Einfüllen des Gases geschieht nicht durch einen Schlauch, sondern handlungsbetont durch offenes Eingießen aus einem Krug. Der Effekt tritt sofort ein, nachdem der Pegelstand des Gases die Höhe des Wärmestrahls erreicht hat. Das Füllen des Kruges aus einer Druckflasche, das Eingießen des Kohlenstoffdioxids in die Meßzelle und die Kontrolle des Pegelstandes (durch verlöschenden Gasanzünder oder schwebende Seifenblasen) ist so problemlos, daß sich das Experiment geradezu als attraktiver »Do-it-yourself-Versuch« in einer Ausstellung anbietet.

Die Versuchsanlage schließt Artefakte der Art, wie sie in früheren Experimenten (siehe Abschnitt 5) auftraten, aus. Außerdem bleibt man mit der Experimentalaussage im Bereich dessen, was am globalen Treibhauseffekt bei allem Expertenstreit unbestritten ist.

5 Rückschau

Lernprozesse werden transparenter, wenn nebst den Ergebnissen – die mit den gesteckten Zielen nicht immer übereinstimmen – auch die Wege und Umwege präsentiert werden. Letztere werden nämlich oft aus dem fertigen Endprodukt künstlich entfernt. Andererseits kann gerade die Entstehungsgeschichte eines Lehrmittels Hinweise darauf geben, warum ein zu vermittelnder Sachverhalt trotz aller Sorgfalt »nicht ankommt«. Im folgenden ist der Ablauf der Untersuchungen chronologisch, ohne jeweils späteren Erkenntnissen vorzugreifen, dargestellt. Ausgangspunkt war die Frage: Kann im Zimmermaßstab demonstriert werden, daß eine Zunahme des Kohlenstoffdioxid-Gehaltes in der Modell-Atmosphäre einen Anstieg der Oberflächentemperatur der Modell-Erde zu Folge hat?

5.1 Theoretische Abschätzungen

Zur Demonstration der treibhausbedingten Temperaturzunahme müssen die globalen Verhältnisse auf ein Modell in Zimmermaßstab reduziert werden, ohne die relevanten physikalischen Phänomene durch Störeinflüsse zu überdecken. Der größte Effekt ist zu erwarten, wenn man eine reine Kohlenstoffdioxid-Atmosphäre mit einer IR-inaktiven (z. B. trockene Luft) vergleicht. Einfache theoretische Abschätzungen ergeben, daß im Modellexperiment mit Kohlenstoffdioxid eine Temperaturerhöhung ΔT (gegenüber trockener Luft) von ca. 0,1 bis 1 °C erwartet werden kann.

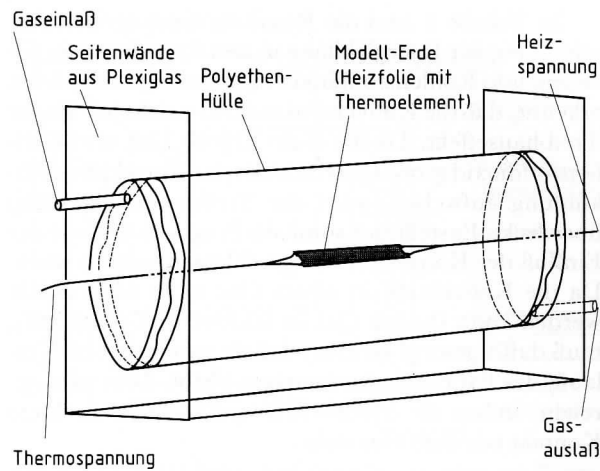


Abb. 3. Beim Versuchsaufbau 1 ist die Modell-Erde von einer zylindrischen Hülle (Inhalt 8 l) aus dünner IR-durchlässiger Polyethylen-Folie (35 μm) mit Stirnseiten aus Plexiglas umgeben. Die Modell-Erde besteht aus einer elektrischen Heizfolie (ca. 3,5 cm \times 6 cm), die bei einer zugeführten elektrischen Leistung von 4 W eine Temperatur von etwa 90 °C annimmt. Direkt auf die Folie geklebt ist ein Thermolement. Die Thermospannung wird einem Verstärker mit Nullpunktunterdrückung und einer Auflösung von 0,01 °C zugeführt (aufgrund thermischer Schwankungen im Experiment beträgt die Auflösung jedoch nur etwa 0,1 °C). Über Einfüllstutzen können die Gase zugeführt bzw. abgesaugt werden.

5.2 Erster Versuch: Scheinerfolg

Die Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau. Um einen IR-Strahlungsfluß von einem Körper (Modell-Erde) an die Umgebung (Modell-Weltraum) zu erzeugen, muß dieser über die Umgebungstemperatur erwärmt werden, was durch eine elektrische Heizfolie erfolgt. Zuerst ist die Hülle mit Zimmerluft gefüllt, und eine empfindliche, relative Temperaturskala wird auf Null gesetzt. Wird nun die Hülle mit Kohlenstoffdioxid gefüllt, so wird ein Anstieg der Temperatur der Modell-Erde von ca. 2 °C beobachtet. Dies wird vorerst dem Treibhauseffekt zugeschrieben. Damit scheint das Ziel bereits im ersten Versuch erreicht zu sein. Testmessungen mit Argon, einem Gas ohne Treibhausaktivität, ergeben aber ebenfalls eine Temperaturerhöhung (um 6 °C gegenüber Kohlenstoffdioxid!). Dies deutet darauf hin, daß es sich um ein von der Konvektion hervorgerufenen Artefakt handelt.

Da die Wärmeleitung in Gasen bei Abständen von einigen Zentimetern vernachlässigbar wird, bleibt nur noch die Konvektion als Möglichkeit für den Energietransport. Die lokal starke Erwärmung der Hülle genau oberhalb der Heizfolie läßt darauf schließen, daß Konvektionsströmungen stattfinden, die Wärme von der Heizfolie zur Hüllwand transportieren. Dieser Transport durch Konvektion ist bei Luft und Kohlenstoffdioxid effizienter als bei Argon, so daß sich der Heizkörper im letzteren Fall stärker erwärmt.

In Tabelle 1 sind die Resultate einer groben Abschätzung der Energiebilanz in den Experimenten für Argon und Kohlenstoffdioxid zusammengestellt. Man erkennt, daß die Konvektion mehr Gewicht hat als der Treibhauseffekt. Da die Gase Argon, Luft und Kohlenstoffdioxid große Unterschiede der konvektiven Abkühlung aufweisen, wird der Treibhauseffekt völlig überdeckt. Es stellt sich somit die Frage, ob und wie der Einfluß der Konvektion ausgeschlossen werden kann. Da die Konvektion in einem Gas nicht unterdrückt werden kann (heißes Gas ist leichter und steigt auf), muß dafür gesorgt werden, daß sie zumindest im Verlaufe des Experimentes konstant bleibt. Dies wird erreicht, indem die Modell-Erde gar nicht in direktem Kontakt mit dem Gas steht.

5.3 Zweiter Versuch: Konstanthaltung der Konvektion

Die Heizfolie ist auf der Außenseite der Hülle montiert, so daß sich der größte Teil der Konvektion in der Umgebungsluft abspielt und nicht vom Gaswechsel beeinflusst wird. Bei diesem Versuch ist die Erwärmung in Argon kleiner als in Versuch 1 (1 °C gegenüber Kohlenstoffdioxid), aber noch vorhanden, was darauf hindeutet, daß in der Hülle immer noch Konvektionsströmungen existieren, die Wärme abführen.

5.4 Dritter Versuch: Ausschalten der Konvektion

Um diese Einflüsse weiter zu reduzieren, wird um die Modell-Erde eine kleine IR-durchlässige, innere Hülle gelegt (Abb. 4). Diese wird während des ganzen Experiments mit Luft gespült, so daß sie sich überall etwa gleich erwärmt. Bei diesem Versuch zeigt sich nur bei Kohlenstoffdioxid eine leichte Erwärmung (ca. 0,15 °C), so wie es aufgrund der IR-Aktivitäten der Gase zu erwarten ist. Allerdings muß man erwähnen, daß die Messungen infolge von Stabilitätsproblemen unsicher sind (die dünnen Polyethen-Folien sind mechanisch zu wenig fest, was sich beim Gaseintritt in Temperaturschwankungen äußert). Untersuchungen mit aufwendigeren Hilfsmitteln könnten hier gewisse Erfolge bringen. Allerdings sprechen die Kriterien der Transparenz des experimentellen Aufbaus und der leichten und schnellen Durchführbarkeit etwas gegen solche Forschungen.

5.5 Vierter Versuch: Neue Versuchsgeometrie

In der Absicht, die Messungen stabiler zu machen, wird noch eine weitere Bauart für die Gashülle getestet: ein Gefäß aus Plexiglas (»Aquarium«) und aufgesetztem Deckel. Da Plexiglas die IR-Strahlung stark absorbiert, ist in einer Seitenwand ein Fenster aus dünner IR-durchlässiger Polyethylen-Folie angebracht. Die Modell-Erde (Heizfolie) ist außerhalb des Gefäßes, unmittelbar vor dem IR-Fenster montiert (Abb. 5). Bei

Energie	Argon	Kohlenstoffdioxid
Zugeführte Energie	100 %	100 %
Durch direkte Strahlung abgeführt	81 %	69 %
Durch Konvektion abgeführt	19 %	29 %
Absorbiert und zum Treibhauseffekt beitragend	0 %	2 %

Tab. 1. Abschätzung der Energiebilanz für Argon und Kohlenstoffdioxid

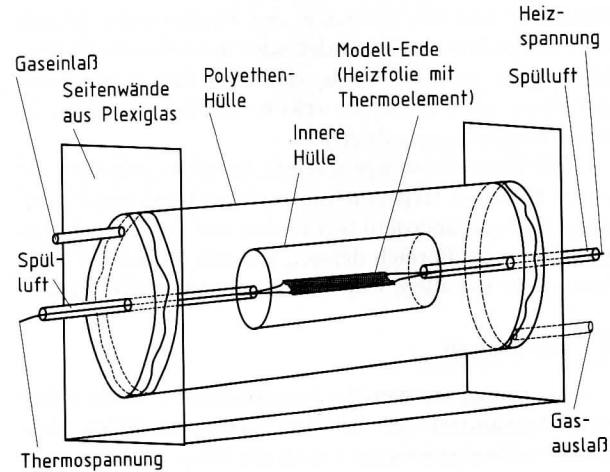


Abb. 4. Der Versuchsaufbau 3 ist der gleiche wie bei Versuch 1 (siehe Abb. 3) mit Ausnahme der inneren Hülle, die zusätzlich um die Modell-Erde gelegt ist. Die innere Hülle besteht ebenfalls aus Polyethen-Folie und Plexiglas. Sie wird während des Versuchs mit Zimmerluft gespült.

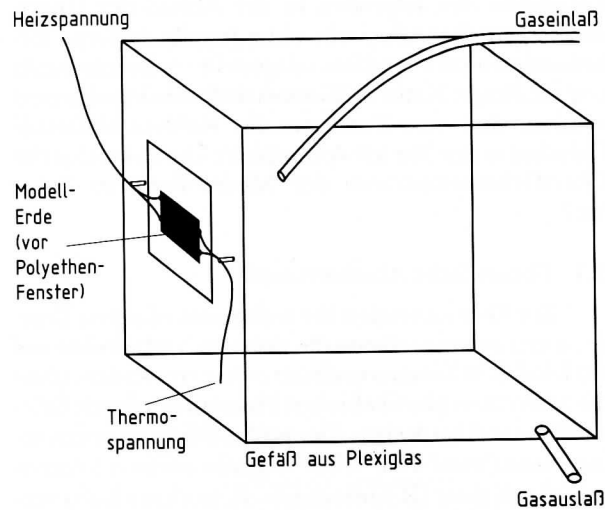


Abb. 5. Bei Versuchsaufbau 4 dient als Gashülle ein Gefäß aus Plexiglas (Inhalt 22 l, mit Deckel). Die Modell-Erde (Heizfolie und Thermoelement) befindet sich außerhalb des Gefäßes und ist etwa 1 cm vor dem IR-Fenster (10 × 10 cm, Polyethenfolie 12 µm) montiert.

diesem Versuch kann aber überhaupt keine eindeutige Temperaturänderung, das heißt kein Treibhauseffekt, mehr festgestellt werden.

5.6 Analyse der Mißerfolge und Neuorientierung

Die Erwärmung der Modell-Erde direkt zu messen, erscheint aufgrund der bisherigen Untersuchungen unmöglich und zwar aus folgenden Gründen:

- Die Weglänge der globalen Situation (einige km) ist nicht realisierbar. Zur Kompensation erhöht man den Gasgehalt vom ppm-Bereich auf ca. 100%. Dies ist an sich zulässig, hat aber zur Folge, daß die Konvektion bei Gaswechsel stark ändert (im Gegensatz zur globalen Situation!). Die damit verbundene Temperaturänderung ist wesentlich größer als der Treibhauseffekt.
- Bei Unterdrückung der Konvektion kann man für die beschriebenen Versuche mit einem Treibhauseffekt von max. $0,1^{\circ}\text{C}$ rechnen. Dies ist für ein Demonstrationsexperiment zu wenig: die Versuchsbedingungen müssen sehr konstant sein und die Wartezeit für eine zuverlässige Ablesung ist groß.

Aus den bisherigen Arbeiten geht hervor, daß neue Wege gesucht werden müssen. Man darf davon ausgehen, daß der Satz von der Erhaltung der Energie auch einem breiten Publikum unmittelbar einleuchtet. Wenn es nun gelingt, sichtbar zu machen, daß Kohlenstoffdioxid Energie aufnehmen («aufgeladen» werden) kann, so ist das didaktische Anliegen erfüllt, denn es ist leicht nachvollziehbar, daß eine Energiezunahme in der Erdatmosphäre zu Veränderungen im Klimasystem (Temperaturverschiebungen, Stürme, etc.) führen kann. Gemessen wird bei einem solchen Versuch die Abnahme der Strahlungsintensität beim Durchgang durch ein Gefäß mit Kohlenstoffdioxid. Aufgrund der Überlappung der Absorptionsbanden des Kohlenstoffdioxids mit der Planckschen Strahlungskurve für 100°C ergibt sich eine grobe Abschätzung von 3 bis 8%. Diese Abnahme ist ein umgekehrtes Maß für den Energiezuwachs im Gas. Damit gehen wir von der Messung einer Temperaturzunahme zur (indirekten) Messung einer Energiezunahme über.

5.7 Fünfter Versuch: Messung des absorptionsbedingten Strahlungsverlustes

Es handelt sich hier um den bereits in Abschnitt 4 als unseren Lösungsvorschlag vorgestellten Versuch. Es wird das »Aquarium«-Gefäß von Versuch 4 benutzt (ohne den Deckel, da Kohlenstoffdioxid eine höhere Dichte hat als Luft). Der Füllstand kann anschaulich mit einem Feuerzeug oder mit Seifenblasen überprüft werden. Vor dem großen IR-Fenster wird als einfache Strahlungsquelle ein LötKolben montiert. An der gegenüberliegenden Wand ist ein weiteres IR-Fenster angebracht, hinter dem sich ein empfindlicher Strah-

LötKolben als IR-Strahler

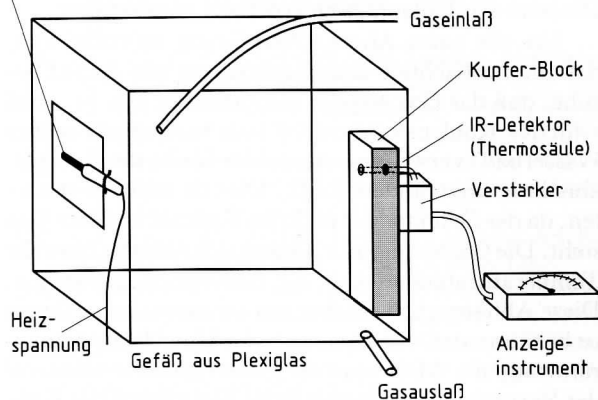


Abb. 6. Modell zur Veranschaulichung der Absorption von Wärmestrahlung durch Kohlenstoffdioxid. Das Modell besteht aus einem gasdichten Gefäß (Plexiglas 22 l), einer IR-Quelle (LötKolben, 350°C) und einem Detektor (Thermosäule). Letztere sind durch IR-Fenster (Polyethylenfolie) vom Gas getrennt. Der Kupferblock dient zur Konstanthaltung der Temperatur. Die Ausgangsspannung des Detektors gelangt zu einem Verstärker, der den Nullpunkt unterdrückt, so daß auch kleine Änderungen auf einem Zeigerinstrument ablesbar sind. Das Einbringen des Kohlenstoffdioxides kann, wie gezeigt, durch einen Schlauch oder - attraktiver - durch Eingießen aus einem Krug erfolgen.

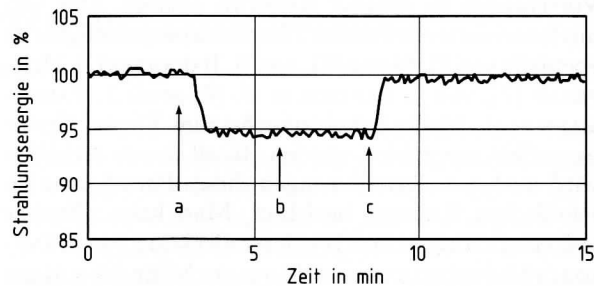


Abb. 7. Änderung der Strahlungsenergie beim Einströmen und Absaugen des Kohlenstoffdioxids (Einstrom zwischen a und b mit 5 l/min , Absaugen bei c mit ca. 15 l/min). Die Zeitkonstanten sind durch die Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt. Bei dem von uns bevorzugten manuellen Eingießen tritt der Effekt ohne spürbare Verzögerung ein.

lungsdetektor befindet (Abb. 6). Zusätzlich ist eine Messung der Gastemperatur vorgesehen.

Zuerst ist das Gefäß mit Zimmerluft gefüllt. Die Strahlungsenergie, die auf den Empfänger trifft, wird (mit gespreizter Skale) gemessen und die Anzeige auf 100% gestellt. Nach Einfüllen des Kohlenstoffdioxids wird die Abnahme der Anzeige registriert. Die Veränderung der Strahlungsenergie mit der Zeit ist in Abbildung 7 dargestellt. Vom Kohlenstoffdioxid werden 5,5% der eingebrachten Strahlungsenergie absorbiert. Dies entspricht den theoretischen Erwartungen. Störeffekte sind bei der Messung keine zu erwarten, da sowohl die Strahlungsquelle als auch der Detektor vom Gas getrennt sind und sich in Zimmeratmosphäre be-

finden. Der Einfluß der Zimmertemperatur auf den Detektor wird allenfalls elektronisch kompensiert.

Um die naive Alternativklärung zu entkräften, daß die beobachtete Energieabnahme nur darauf beruhe, daß das Gas aus der Druckflasche kalt ist, wird erhitztes Kohlenstoffdioxid (Gasleitung durch heißes Wasserbad) verwendet. Auch hier bleibt die Energieabnahme unverändert 5.5%. Dies ist auch zu erwarten, da der Detektor gar nicht im Kontakt mit dem Gas steht. Die Gastemperatur könnte sich also nur über die Temperaturabhängigkeit der Absorption auswirken. Diese Abhängigkeit ist aber nur schwach. Im weiteren ist bekannt, daß sich Gas rasch der Umgebungstemperatur anpaßt. Mißt man die Gastemperatur während des Versuchs, so stellt man beim Einbringen des Kohlenstoffdioxids eine Erwärmung um etwa 1 °C fest. Sie tritt nur bei eingeschaltetem IR-Strahler auf und ist ein Maß für die absorbierte Energie². Da der Effekt nur sehr langsam zu beobachten ist und zudem stark schwankt, ist er aber für unsere Zwecke nicht geeignet.

6 Vergleich mit anderen Arbeiten

Nachträglich sind verschiedene andere Arbeiten mit ähnlicher Thematik und teilweise recht ähnlichen Vorschlägen zu unserer Kenntnis gelangt. Das von uns favorisierte elementare Transmissionsparadigma ist ebenfalls von H. HEISE [6], von S. BAKAN und S. HOPPENAU [7], von J. BARTSCH et al. [8] sowie I. PARCHMANN et al. [9] für Schulversuche zum Thema Treibhauseffekt empfohlen worden. In all diesen Arbeiten wird auch von Realisierungen dieses Paradigmas im schulischen Rahmen berichtet. Man kann offenbar von einer didaktischen Wiederentdeckung von J. TYNDALLS Meßexperimenten [10] aus der Mitte des vorigen Jahrhunderts sprechen (vgl. dazu R. BACHOFEN und K. FRISCHKNECHT [11] sowie [9]). Von allen in diesem Abschnitt betrachteten Vorschlägen unterscheidet der unsere sich in einer Weise, welche zum Teil die Unterschiede zwischen den beiden Zielgruppen Oberstufenschüler und erwachsenes Laienpublikum widerspiegelt. Keiner der von diesen Autoren vorgeschlagenen Schulversuche kontrastiert die Wirkung von Kohlenstoffdioxid auf die Wärmestrahlung unmittelbar mit derjenigen der Luft. Wenn bei jedem Meßdurchgang erst nach dem Einfüllen des Gases und dem Verschließen der Meßzelle die Wärmestrahlung eingeschaltet wird, um sodann das sich nach einigen Minuten einstellende Maximum der transmittierten Strahlung zu registrieren (so bei H. HEISE [6] und bei I. PARCHMANN

et al. [9]), so kann ein Kohlenstoffdioxid/Luft-Vergleich nur sehr indirekt erfolgen, nämlich über die zeitliche Distanz mindestens einer Meßwiederholung und unter Bezug auf gespeicherte Meßdaten. Diese relative Umständlichkeit und Indirektheit des Vergleichs ist auch beim Versuch von S. BAKAN und S. HOPPENAU [7] gegeben, welche die Steilheit der Meßkurven bei verschiedenen Gasfüllungen vergleichen. Außerdem liefern bei ihrem Vorgehen ausgerechnet Kohlenstoffdioxid und Luft fast deckungsgleiche Kurven.

Das Vorgehen von J. BARTSCH et al. [8] kommt dem unseren am nächsten: Sie registrieren ebenfalls Soforteffekte am Detektor beim Einbringen von Kohlenstoffdioxid bzw. anderer IR-aktiver Gase. Sie sind aber offenbar stärker daran interessiert, die einzelnen Gase durch vollständige Funktionskurven (Absorption in Abhängigkeit von der Gaskonzentration) und den Bezug zu reinen IR-inaktiven Referenzgasen zu charakterisieren, denn sie verfolgen diese Soforteffekte und damit die Möglichkeit einer direkten Kontrastierung von Kohlenstoffdioxid mit Luft nicht weiter.

Demgegenüber zielt bei unserem experimentellen Vorgehen – unter Preisgabe des Genauigkeitsanspruches – alles darauf ab, gerade diesen Vergleich schnell (innerhalb einer Sekunde) und unmittelbar zu ermöglichen. Wir wollen mit Blick auf den globalen Treibhauseffekt möglichst drastisch vor Augen führen, daß das Einbringen von Kohlenstoffdioxid in die Luft die IR-Absorption der Atmosphäre steigert. Entsprechend tritt nach der »Dramaturgie« unseres Versuches das Kohlenstoffdioxid auch in der Verursacherrolle auf: das Eingießen in die Meßzelle löst in sinnfälliger Kausalität den Effekt aus. Der Effekt soll in dieser Zuspitzung verblüffen und beeindrucken, was er nach unseren bisherigen Demonstrationserfahrungen auch tut [4]. Aus diesem Grunde kann man davon ausgehen, daß er besonders gut im Gedächtnis haften bleibt.

Auch bei dem von I. SCHULZE und R. HÄGERBÄUMER [12] vorgestellten Schulversuch, in welchem die Gastemperatur als Folge der Absorption gemessen wird, erscheinen uns die dort noch erheblich längeren Vorbereitungs- und Wartezeiten und die indirekten Vergleiche als ungeeignet für eine »unter die Haut gehende« Demonstration. Der Versuch von M. ADELHELM und E.-G. HÖHN [13] schließlich mißt zur Hauptsache genau jenes Artefakt, vor welchem wir im vorangehenden Abschnitt warnen. Neuerdings hat auch B. HUHN [14] auf diese Problematik hingewiesen. Untersuchungen an der Universität Bern [15], sowie unsere eigenen Versuche haben ergeben, daß es im Zimmermaßstab nicht ohne weiteres möglich ist, den echten Treibhauseffekt vom viel größeren Konvektionseffekt zu trennen. Der vorgeschlagene Rückgriff auf die Messung des absorptionsbedingten Strahlungsverlusts kann aber – wie gezeigt – eine sinnvolle Alternative sein.

² Aus dem ersten Versuch (siehe 5.2) ist bekannt, daß die schlechtere Konvektion im Kohlenstoffdioxid ebenfalls zu einer Erwärmung eines Körpers führt. Dies gilt aber vor allem dann, wenn der Körper nicht die gleiche Temperatur wie das Gas hat, d. h. eine Wärmequelle ist. Für den Fall des verwendeten Thermoelements, das keine Eigenwärme produziert, kann dieser Einwand aber ausgeschlossen werden.

Wir danken der Koordinationsstelle Mensch-Gesellschaft-Umwelt (MGU) der Universität Basel, daß sie mit ihrer finanziellen Unterstützung diese Arbeit möglich gemacht hat.

Literatur

- [1] H. OESCHGER: Und niemand will es wahrhaben. - Technische Rundschau **32**, 20 (1989).
- [2] C.-D. SCHÖNWIESE - B. DIEKMANN: Der Treibhauseffekt: Der Mensch ändert das Klima. - Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt 1987.
- [3] S. A. ARRHENIUS: On the influence of carbonic acid in the air upon temperature on the ground. - Zitiert nach R. BACHOFEN und K. FRISCHKNECHT (siehe 11).
- [4] E. HUBER - U. AESCHBACHER: Prototyp vorgestellt auf dem International CO₂-Symposium, CH-3800 Interlaken, 21.-22. April 1995.
- [5] U. AESCHBACHER: Meinungen, Wissen und Verstehen von Lehrerstudentinnen und -studenten in Sachen »Treibhaus-Effekt«. - Bildungsforschung und Bildungspraxis **2** (1992) 149-161.
- [6] H. HEISE: Das CO₂-Problem und der »Glashauseffekt« aus physikalischer Sicht. - MNU **37** (1984) 347-354.
- [7] S. BAKAN - S. HOPPENAU: IR-Absorption in CO₂. Ein qualitatives Modellexperiment. - PdN-Ph **43** (1994) 22-23.
- [8] J. BARTSCH - F. H. EFFERTZ - CH. LUKNER: Absorption und Transmission atmosphärischer Gase. Eine Versuchssequenz zum Treibhauseffekt. - PdN-Ph **43** (1994) 23-26.
- [9] I. PARCHMANN - B. KAMINSKI - W. JANSEN: Die Wärmeabsorption von Gasen - Voraussetzung für den Treibhauseffekt. - ChemKon **2** (1995) 17-25.
- [10] J. TYNDALL: Die Wärme betrachtet als eine Art Bewegung. - Braunschweig: Vieweg & Sohn 1867.
- [11] R. BACHOFEN - K. FRISCHKNECHT: Nachweis der Wärmeabsorption von Gasen als Ursache für den Treibhauseffekt. Anregungen von JOHN TYNDALL (1860) zur Behandlung des Treibhauseffektes auf der Gymnasialstufe. - MNU **48** (1995) S. 350 ff.
- [12] I. SCHULZE - R. HÄGERBÄUMER: Modellversuch zum Treibhauseffekt. - MNU **44** (1991) 89-93.
- [13] M. ADELHELM - E.-G. HÖHN: Zur Behandlung des Treibhauseffekts im Chemieunterricht. - MNU **44** (1991) 417-421.
- [14] B. HUHN: Experimente zum Treibhauseffekt. - PdN-Ph **43** (1994) 26-32.
- [15] B. STAUFFER: Physikalisches Institut der Universität Bern, Sidlerstr. 5, CH-3012 Bern (private Mitteilung 1994). □