

Berücksichtigung von Reflexion und Remission von Wärmestrahlung in Modellexperimenten zum Treibhauseffekt

Verfasserin: Dr. Ilka Parchmann, Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg, Fachbereich Chemie, Postfach 25 03, 26111 Oldenburg

Die Remission von Wärmestrahlung durch Spurengase in der Atmosphäre hat einen wesentlichen Anteil am Treibhauseffekt. Es wird ein Experiment vorgestellt, mit dem diese Remission im Unterricht anschaulich demonstriert werden kann. Der Versuchsaufbau eignet sich auch, um die Reflexionen von Lichtstrahlung durch Stäube und Nebel aufzuzeigen.

1 Einleitung

Die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes durch anthropogen erhöhte Gehalte an Spurengasen in der Atmosphäre ist ein zur Zeit in der Öffentlichkeit viel diskutiertes Problem. Ein zeitgemäßer Chemieunterricht sollte sich daher ebenfalls mit derartigen globalen Umweltproblematiken beschäftigen. In letzter Zeit sind in der fachdidaktischen Literatur einige Beiträge erschienen, die Vorschläge für eine experimentelle Erarbeitung des Phänomens Treibhauseffekt liefern (z. B. [1–5]). In keiner dieser Arbeiten konnte jedoch die für den Treibhauseffekt so wichtige Voraussetzung der Remission von Wärmestrahlung durch klimawirksame Gase gezeigt werden. Spurengase wie Kohlenstoffdioxid, Methan oder Distickstoffmonoxid absorbieren die von der Erde ausgesandte Wärmestrahlung und emittieren sie anschließend nicht nur in den Weltraum, sondern ebenfalls zurück zur Erde. Die Folge ist eine Erwärmung des Erdbodens und der Erdatmosphäre. Im folgenden wird ein Experiment vorgestellt, das – eingebettet in eine experimentelle Konzeption zur Behandlung der Emission von Wärmestrahlung – die Remission von Wärmestrahlung durch atmosphärische Spurengase demonstriert.

Weitere klimabestimmende Faktoren sind Stäube und Aerosole in der Atmosphäre. Dieser Aspekt wird bisher im Unterricht kaum, experimentell vermutlich gar nicht behandelt. Das hier vorgestellte Experiment bietet ebenfalls eine Möglichkeit, den Einfluß von Aerosolen bzw. Nebeln auf die Temperaturverhältnisse zu veranschaulichen.

2 Absorption und Remission von Wärmestrahlung und deren Bedeutung für den Treibhauseffekt

In der Realität erreicht fast nur sichtbare Lichtstrahlung und nahe Infrarotstrahlung der Sonne den Erdboden, beide werden dort absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die anschließend vom Erdboden emittierte Wärmestrahlung wird dann bekanntermaßen in der Atmosphäre durch Wasserdampf und Spurengase absorbiert. Diese Energieaufnahme durch Moleküle in

der Atmosphäre führt hier zunächst einmal zu einer Erwärmung. Entscheidend für die Entstehung des Treibhauseffektes ist nun die Tatsache, daß ein Großteil der absorbierten Strahlungsenergie wieder zurück zur Erde remittiert wird. Die Folge ist eine stärkere Erwärmung des Erdbodens, damit eine verstärkte Emission von Wärmestrahlung und schließlich eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur. Der Strahlungshaushalt der Erde ist in Abbildung 1 dargestellt.

Für eine fundierte Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen des Treibhauseffektes ist die Behandlung der Remission unerlässlich. Im folgenden werden Experimente und historische Textauszüge vorgestellt, die eine anschauliche Bearbeitung ermöglichen.

3 Experimente zur Emission und Remission von Wärmestrahlung

Die Remission von Wärmestrahlung durch Feststoffe und Flüssigkeiten kann in einfachen Experimenten veranschaulicht werden. Hier soll zunächst ein Experiment vorgestellt werden, mit dem der allgemeine Zusammenhang zwischen Absorption und Emission von Strahlung aufgezeigt werden kann.

Versuch 1: Vergleich der Absorption und Emission von Wärmestrahlung durch eine glänzende und eine geschwärzte Aluminiumplatte

Material: 2 Aluminiumbleche ($3 \times 10 \times 0,1$ cm), eines davon berußt, Thermoelement (NiCr-Ni) mit Meßgerät, Aluminiumfolie, Bunsenbrenner, 2 Magnetheizrührer oder Bügeleisen, je eines davon berußt, Wärmestrahldetektor (schwarze Pappe, Aluminiumfolie, Weißblechdose, Polyethenfolie, NiCr-Ni-Thermoelement mit Meßgerät oder Innen-Außen-Digitalthermometer [3]),

a. Absorption von Wärmestrahlung

Durchführung und Ergebnis: Zur Untersuchung der Absorption von Wärmestrahlung befestigt man das Thermoelement hinter einem Aluminiumblech (Abb. 2a). Von der anderen Seite wird Alu-

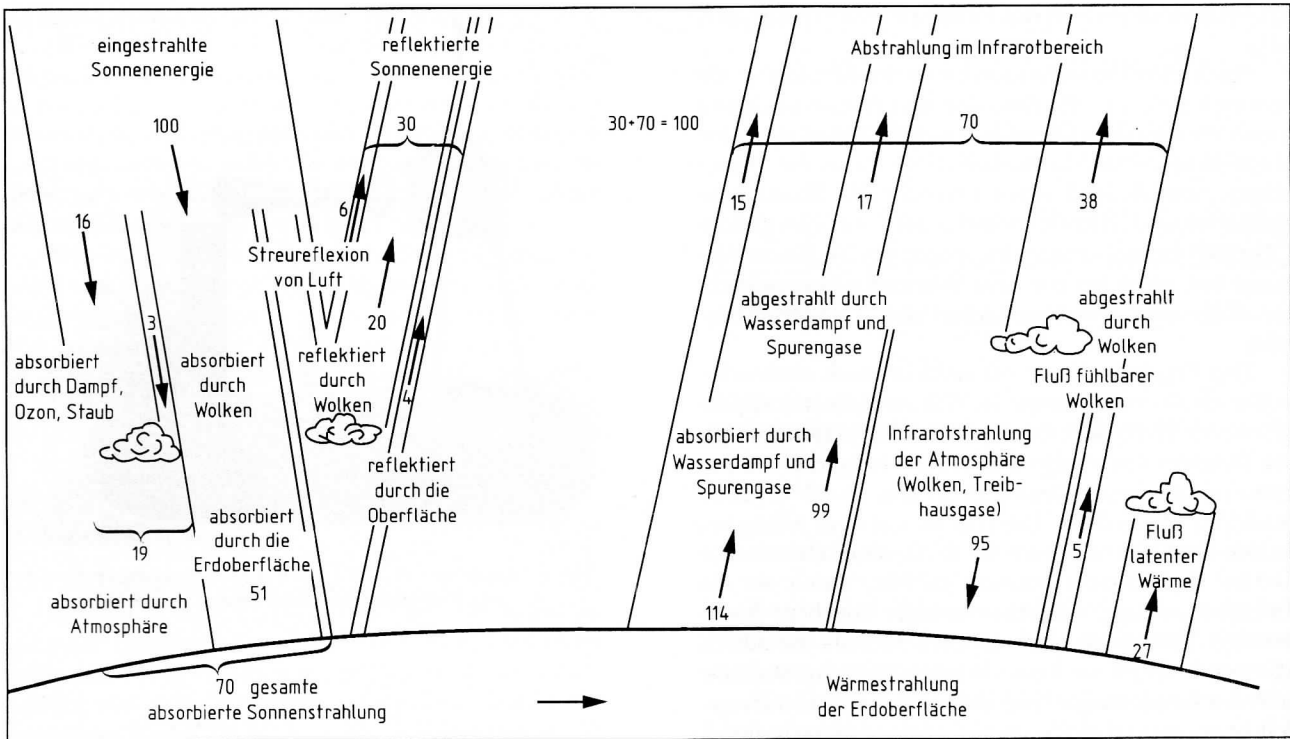


Abb. 1. Strahlungshaushalt Erde-Atmosphäre-Sonne, verändert nach [6]

miniumfolie gegen das Thermoelement geklebt, um nicht auch andere mögliche Strahlungsquellen im Raum zu registrieren. Nun befestigt man das Aluminiumblech eine Minute lang in einem Abstand von zehn Zentimetern vor der nichtleuchtenden Bunsenbrennerflamme. Man beobachtet den Temperaturanstieg und wiederholt den Versuch mit dem berußten Blech.

Als Ergebnis kann man feststellen, daß das Thermoelement hinter dem unberußten Aluminiumblech nur einen Temperaturanstieg von ca. 1°C registriert. Ist das Aluminiumblech dagegen geschwärzt, steigt die Temperatur um $6\text{--}7^{\circ}\text{C}$. Schwarze Oberflächen absorbieren Wärmestrahlung deutlich stärker als metallisch glänzende. Diese Erfahrung ist auch aus dem Alltag bekannt, etwa durch dunkle Kleidung, die Licht- und Wärmestrahlung sehr stark absorbiert.

b. Emission von Wärmestrahlung

Durchführung und Ergebnis: Zur Untersuchung der Emission von Wärmestrahlung benötigt man zunächst einen geeigneten Detektor für diese Strahlung. Neben käuflichen Geräten (z. B. Thermosäule [7]) kann man sich mit einfachen Mitteln einen Wärmestrahlerdetektor bauen. Hierzu wird zunächst mit Tesafilm ein Thermoelement auf eine schwarze Pappe geklebt. Zur Isolation gegen Wärmestrahlung aus der Umgebung wird hinter das Thermoelement Aluminiumfolie geklebt. Von der anderen Seite wird

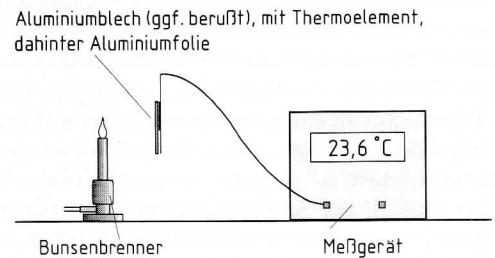


Abb. 2a. Untersuchung der Absorption von Wärmestrahlung durch verschiedene Oberflächen

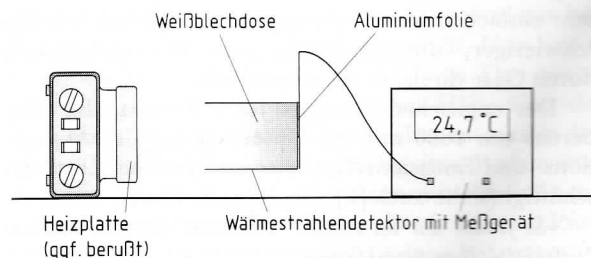


Abb. 2b. Untersuchung der Emission von Wärmestrahlung durch verschiedene Oberflächen

die Weißblechdose auf der Pappe befestigt (siehe auch [3]).

Nach der Versuchsanordnung in Abbildung 2b ermittelt man nun die Emission von Wärmestrahlung durch verschiedene Oberflächen, indem man zunächst einen unberuhten Magnetheizrührer (bzw. ein Bügeleisen), anschließend einen beruhten als Strahlungsquelle benutzt. Die Heizquelle wird auf die gleiche Oberflächentemperatur eingeregelt und in einem Abstand von ca. 5 cm vor dem Wärmestrahlungsdetektor aufgestellt. Man beobachtet den Temperaturanstieg.

Das Ergebnis dieses Versuchs ist noch eindrucksvoller als das vorhergehende. Während die metallisch glänzende Heizplatte nur zu einem Temperaturanstieg am Detektor um wenige Grad führt, steigt die Temperatur mit der geschwärzten Platte um 10–20 °C (siehe auch [3]). Auch diese Tatsache ist aus dem Alltag bekannt: alte Öfen oder auch die Rückwände elektrischer Geräte sind oftmals schwarz gefärbt, damit sie die Infrarotstrahlung möglichst intensiv abgeben; hochwertige Teekannen sind dagegen oftmals metallisch glänzend, damit sie keine Wärmestrahlung abgeben und der Inhalt länger heiß bleibt. Es kann also festgehalten werden, daß ein »guter Absorber« nach diesen Experimenten auch ein »guter Emittent« ist.

Im Anschluß an diese Experimente kann untersucht werden, ob ein Stoff, der Wärmestrahlung absorbiert hat, diese anschließend auch wieder remittiert. Ein solches Experiment ist erst kürzlich von HOVERATH in dieser Zeitschrift beschrieben worden [7]. HOVERATH untersucht zunächst die Absorption von Wärmestrahlung durch Plexiglas, um anschließend dessen Emissionsfähigkeit zu demonstrieren. Ähnliche Versuche zur Einführung des Begriffes der Remission sind von HUH N [2] und PARCHMANN [3] beschrieben worden. Werden diese Experimente mit Glas durchgeführt, kann parallel die Begründung für die Bezeichnung »Treibhauseffekt« geliefert werden.

Im Unterricht werden die Schülerinnen und Schüler möglicherweise zu Recht fragen, ob man diese an Feststoffen beobachteten Effekte auf die Vorgänge in der realen Atmosphäre übertragen kann, das heißt, ob auch die Gase der Luft solche Remissionseffekte zeigen. Im Gegensatz zu den bisher geschilderten, sehr einfachen Modellversuchen ist es jedoch weitaus schwieriger, die Remission von Wärmestrahlung durch Gase direkt zu demonstrieren.

Der englischen Physiker JOHN TYNDALL hat sich bereits um 1860 mit der Untersuchung der Absorptions- und Emissionsfähigkeit verschiedener Gase beschäftigt (siehe auch [8]). Er schreibt dazu:

»So finden wir bei einigen Gasen eine fast vollkommene Unfähigkeit ihrer Atome [bzw. Moleküle], [. . .] Wellen aufzufangen, während die Atome anderer Gase, wenn sie von diesen Schwingungen getroffen werden, ihre Bewegung absorbieren und

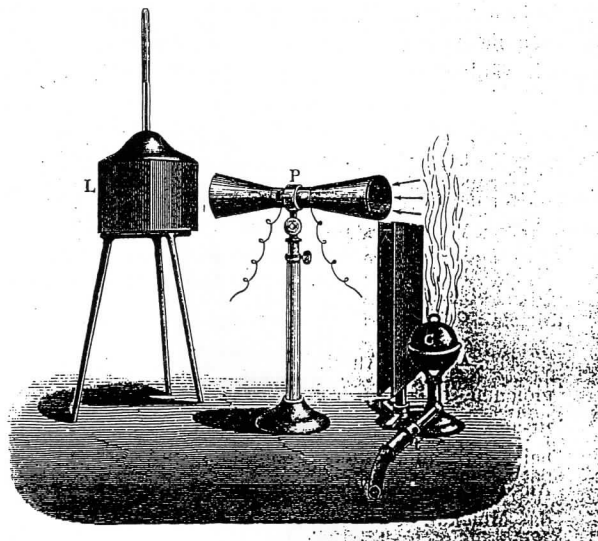


Abb. 3. Apparatur von John Tyndall zur Untersuchung der Emission von Wärmestrahlung durch Gase [11, S. 435]

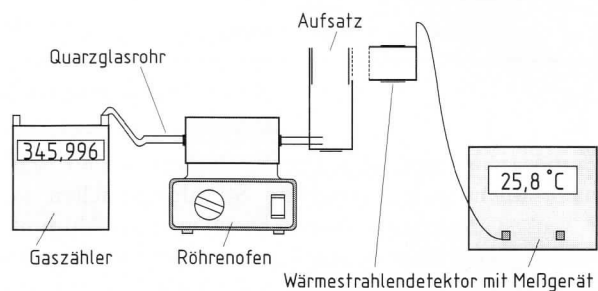


Abb. 4. Versuchsaufbau zur Untersuchung der Emission von Wärmestrahlung durch Gase.

(Der Aufsatz besteht aus einer Weißblechdose ohne Deckel, mit einer Öffnung für das Rohr etwa 1 cm über dem Boden. Oben an der Dosenrückwand befindet sich Aluminiumfolie als Reflektor, vorne PE-Folie, die das Herausdiffundieren der Gase verhindert, aber strahlungsdurchlässig ist)

selbst Wärmemittelpunkte werden. Wir müssen nun die Eigenschaften der gasförmigen Körper in dieser letzteren Beziehung näher untersuchen; wir müssen fragen, ob ihre Atome, die [. . .] [durch Wellen] in so verschiedenen Graden Bewegung annehmen können, nicht auch durch ihre Fähigkeit charakterisiert sind, [. . .] [durch Wellen] in verschiedenen Graden Bewegung mitzuteilen; oder einfacher, da wir die Absorptionskraft der verschiedenen Gase für strahlende Wärme kennen gelernt haben, so müssen wir nun auch nach ihrer Ausstrahlungsfähigkeit fragen.« (verändert nach [9, S. 434])

TYNDALLS Apparatur zur Untersuchung dieser Emissionsfähigkeit ist in Abbildung 3 dargestellt. TYNDALL ermittelte das Emissionsvermögen diverser Gase, indem er diese über eine erhitzte Kugel strömen ließ.

Er formulierte seine Beobachtungen wie folgt:

»Wir sehen, dass Ausstrahlung und Absorption einander entsprechen, dass das Molekül, das einen Wärmestrahlaufzufangen vermag, auch im Stande ist, dem entsprechend einen Wärmestrahlaufzugeben; kurz, dass die Fähigkeit, Bewegung [...] anzunehmen und [...] Bewegung mitzuteilen, einander entsprechende Eigenschaften der gasförmigen Körper sind.« (verändert nach [9, S. 436])

Mit einem derart einfachen Aufbau erhielten wir keine reproduzierbaren Werte, da zum einen die Strömungsgeschwindigkeit der Gase schwer regulierbar war, zum anderen die Temperaturen der Gase für ein deutliches Ergebnis wohl nicht ausreichten. Mit Hilfe des folgenden, in Abbildung 4 dargestellten Versuchsaufbaus, der in ähnlicher Weise erst kürzlich auch von BODE und PIENKA beschrieben wurde [10], ist es allerdings möglich, das unterschiedliche Emissionsvermögen von Luft bzw. Stickstoff und Kohlenstoffdioxid zu zeigen. Erwärmt man verschiedene Gase im Röhrenofen und leitet diese anschließend am Detektor vorbei, so stellt man deutliche Unterschiede fest. Die Beobachtung der Temperatur am Detektor zeigt mit Stickstoff nach drei Minuten einen geringfügigen Temperaturanstieg von 0,2–1,5 °C, der auf die Erwärmung der gesamten Umgebungsluft zurückzuführen ist. Mit Kohlenstoffdioxid dagegen steigt die Temperatur um mindestens 3 °C. Dieser deutlich höhere Anstieg beruht auf der zusätzlichen Emission von Wärmestrahlung durch Kohlenstoffdioxid.

Voraussetzung für Absorption und Emission von Infrarotstrahlung ist, daß sich durch die angeregten Schwingungen im Molekül das jeweilige Dipolmoment des Moleküls ändert. Dies ist weder bei Sauerstoff noch bei Stickstoff der Fall, da diese Moleküle lediglich symmetrische Streckschwingungen vollführen können. Beim Kohlenstoffdioxid findet man dagegen neben den symmetrischen auch die antisymmetrischen Streckschwingungen sowie die Deformationsschwingungen. Bei den letzteren beiden ändert sich das Dipolmoment, so daß es zu einer erfolgreichen Wechselwirkung zwischen der elektromagnetischen Infrarotstrahlung und dem Molekül kommen kann. Bei der Emission von Infrarotstrahlung geben die angeregten Moleküle einen Teil dieser Schwingungsenergie wieder ab.

Das hier geschilderte Experiment zeigt den gewünschten Effekt der Emission von Wärmestrahlung durch Gase. Problematisch ist allerdings neben dem recht komplexen Versuchsaufbau zum einen die Freisetzung großer Gasmengen, zum anderen die Regulation der Gastemperaturen, die in etwa gleich sein müssen. Eventuell empfiehlt es sich daher, im Unterricht dieses Experiment nur zu beschreiben und ergänzend auf TYNDALLS Untersuchungen einzugehen.

Völlig problemlos kann danach das folgende Experiment erarbeitet und demonstriert werden, das die Remission von Wärmestrahlung durch Gase zeigt.

250-W-Halogenlampe mit Schirm

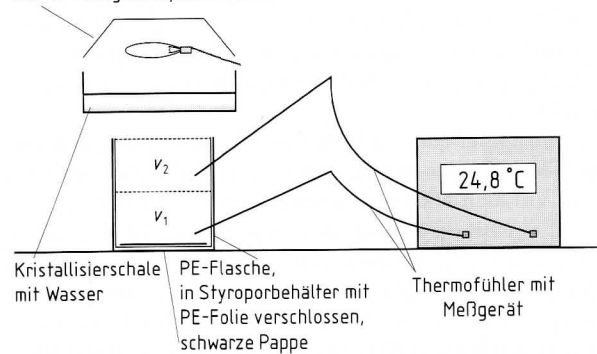


Abb. 5. Versuchsaufbau des Modellexperiments zum Treibhauseffekt bei gleichzeitiger Demonstration der Remission von Wärmestrahlung

Versuch 2: Modellexperiment zum Treibhauseffekt und Demonstration der Remission von Wärmestrahlung durch Gase

Die Grundlagen dieses Modellexperimentes sind bereits in [5] ausführlich dargelegt worden. Die folgende Abwandlung ermöglicht nun die parallele Untersuchung der Remission.

Geräte und Chemikalien: 250-W-Halogenlampe mit Fassung, Kristallierschale ($\varnothing = 22$ cm) mit Wasser, 700-ml-Polyethenflasche (abgeschnittene Putzmittelflasche) mit seitlichen Öffnungen zur Aufnahme der Thermoelemente, Styroporgefäß, 2 Thermoelemente mit Meßgerät oder Digitalthermometer mit Außenfühler, schwarze Pappe, Polyethenfolie, Knetmasse, Kohlenstoffdioxid, ggf. weitere treibhausrelevante Gase

Durchführung: Zum Versuchsaufbau siehe Abbildung 5.

Zunächst befestigt man in 4–5 cm Höhe in dem Polyethenbehälter (PE-Flasche), mit Hilfe von Tesaband eine PE-Folie. Dabei muß ausgeschlossen werden, daß eine Gasdiffusion von dem einen in den anderen Raum möglich ist. Alternativ kann in die PE-Flasche ein zweites PE-Gefäß mit herausgeschnittenem Deckel und Boden gestellt werden, das oben und unten mit PE-Folie verschlossen ist. Das PE-Gefäß wird zur Isolierung in einen Styroporbehälter gestellt. Nun bringt man, wie in Abbildung 5 dargestellt, ein Thermoelement im unteren Raum in 1–2 mm Höhe über der Pappe an ($\vartheta 1$). Ein zweites Thermoelement wird in den oberen Raum gebracht ($\vartheta 2$, Höhe vom Boden etwa 5–6 cm). Das PE-Gefäß wird dann mit PE-Folie mit einem Gummiband verschlossen. Die Schale mit Wasser dient dem Herausfiltern der direkten Wärmestrahlung der Lampe, so daß lediglich Licht- und nahe Infrarotstrahlung die Pappe erreichen.

Nun werden die Temperaturen in beiden Gasräumen bestimmt. Anschließend schaltet man die Lampe ein und mißt fünf Minuten lang im Abstand von jeweils einer Minute die Temperaturen im oberen und unteren Gasraum.

Anschließend wird der obere Gasraum mit Kohlenstoffdioxid oder einem anderen Treibhausgas gefüllt. Der Versuch wird wie beschrieben wiederholt.

Ergebnisse und Auswertung: In Tabelle 1 sind die Ergebnisse dargestellt, wie sie mit Luft und mit Kohlenstoffdioxid erzielt wurden. Die Temperatur steigt direkt über der Pappe (ϑ_1) deutlich stärker an als im oberen Raum (ϑ_2), wenn sich in beiden Gasräumen Luft befindet. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, daß die schwarze Pappe tatsächlich die Lichtstrahlung der Halogenlampe absorbiert und in Wärme umwandelt.

Befindet sich Kohlenstoffdioxid im oberen Raum, steigt die Temperatur hier ebenfalls deutlich an, teilweise sogar stärker als im unteren, luftgefüllten Raum. Diese wesentlich stärkere Erwärmung des Kohlenstoffdioxids gegenüber Luft beruht auf der zusätzlichen Absorption der Wärmestrahlung, die von der Pappe emittiert wird. Weiterhin ist zu beobachten, daß die Temperatur unterhalb des Kohlenstoffdioxids (ϑ_1) ebenfalls stärker ansteigt als unter Luft. Dafür gibt es zwei mögliche Erklärungen: Zum einen kann die Wärmestrahlung von der Pappe nicht ungehindert entweichen, die Wärme »staut« sich vermutlich unter Kohlenstoffdioxid (käme die Wärmestrahlung direkt von der Lampe, dürfte dieser Effekt nicht auftreten!). Zusätzlich ist davon auszugehen, daß auch hier das Kohlenstoffdioxid Wärmestrahlung zurück zur Pappe emittiert, was einen stärkeren Temperaturanstieg auf und direkt über der Pappe zur Folge hat. Auch andere Treibhausgase wie Distickstoffmonoxid weisen diese Effekte auf. Die direkte Ableitung der Wärme (Wärmeleitfähigkeit) oder das Erwärmen des Gases an der Pappe (Wärmekapazität) können in diesem Fall keine Rolle spielen, da das Kohlenstoffdioxid von der Pappe räumlich getrennt ist.

Dieses Modellexperiment zeigt zum einen die stärkere Erwärmung einer Gasatmosphäre, die höhere Konzentrationen an treibhausrelevanten Spurengasen enthält. Dieser Temperaturanstieg beruht – ebenso wie in der Atmosphäre – auf der Absorption von Wärmestrahlung, die von der schwarzen Pappe (analog zum Erdboden) emittiert wird. Zum anderen kann die Remission und als Folge davon die stärkere Erwärmung auf bzw. über der Pappe (analog zum Erdboden) hervorgehoben werden.

Die sich einstellenden Temperaturunterschiede können in diesem Experiment ausschließlich auf Absorption und Emission von Wärmestrahlung beruhen, da Strahlungsquelle und Absorber räumlich voneinander getrennt sind.

$\frac{t}{\text{min}}$	Luft		Kohlenstoffdioxid		$\Delta\vartheta$ (Kohlenstoffdioxid) – $\Delta\vartheta$ (Luft)	
	ϑ_2 ($\Delta\vartheta$)	ϑ_1 ($\Delta\vartheta$)	ϑ_2 ($\Delta\vartheta$)	ϑ_1 ($\Delta\vartheta$)	$\Delta\vartheta_2$	$\Delta\vartheta_1$
0	19,7	20,4	19,4	20,6	–	–
1	22,7(3,0)	24,1(3,7)	24,1(4,7)	25,3(4,7)	1,7	1,0
3	24,5(4,8)	26,8(6,4)	27,1(7,7)	28,0(7,4)	2,9	1,0
5	26,1(6,4)	28,9(8,5)	28,4(9,0)	30,1(9,5)	2,6	1,0

Tab. 1. Ergebnisse des Modellexperimentes mit Luft und mit Kohlenstoffdioxid

4 Reflexion von Lichtstrahlung durch Stäube und Aerosole und deren Bedeutung für den Treibhauseffekt

Etwa 30% der Sonnenstrahlung werden natürlicherweise in der Atmosphäre direkt reflektiert, der größte Teil davon an Wolken (s. Abb. 1). Auch andere Partikel wie Stäube oder Aerosole tragen zu dieser Reflexion bei. Letztere entstehen u. a. durch die Freisetzung von Schwefeldioxid bei Vulkanausbrüchen oder durch anthropogene Tätigkeiten. Schwefeldioxid wird z. B. durch Ozon oxidiert und reagiert mit Wasser zu Schwefelsäure. Diese Schwefelsäuremoleküle dienen als Kondensationskeime für die Wolkenbildung. Die entstehenden, feinen Tröpfchen können Ammoniak absorbieren, so daß sich schließlich sichttrübende Sulfat-Aerosole bilden [11]. Sowohl die feinen Tröpfchen (Nebel), als auch diese Aerosole sind nicht durchlässig für Lichtstrahlung. Sie verstärken die natürliche Reflexion der Sonnenstrahlung und wirken somit ebenso wie eine dichtere Wolkendecke dem Treibhauseffekt entgegen, da weniger Lichtstrahlung zur Erwärmung des Erdbodens zur Verfügung steht.

Diese verstärkte Reflexion könnte eine Erklärung für die zum Teil extrem großen Temperaturschwankungen in der Vergangenheit sein, etwa nach einem Vulkanausbruch oder nach einem Meteoriteneinschlag. Auch in jüngerer Zeit waren derartige Einflüsse von Vulkaneruptionen auf die Lichtdurchlässigkeit der Atmosphäre zu messen, z. B. nach den Ausbrüchen des El Chichon 1982 und des Mt. Pinatubo 1991 [12]. Der Abkühlungseffekt durch Aerosole wird mittlerweile auch in Klimaberechnungen mit einbezogen. Man vermutet, daß die hohe anthropogene Schwefeldioxidfreisetzung zumindest über der Nordhalbkugel einer Erwärmung durch den verstärkten Treibhauseffekt entgegengewirkt hat. Dies könnte eine Erklä-

rung dafür sein, daß der globale Erwärmungstrend zwischen 1940 und 1970 zum Stillstand kam [13].

In bezug auf den Treibhauseffekt ist es daher nicht nur interessant, treibhausrelevante Gase zu untersuchen, sondern auch den Einfluß von Nebeln oder Aerosolen. Diese verringern den Temperaturanstieg des Erdbodens und der Atmosphäre, da sie den Anteil der reflektierten Lichtstrahlung erhöhen. Ein solcher Abkühlungseffekt kann mit dem in Abbildung 5 dargestellten Versuchsaufbau ebenfalls demonstriert werden.

Versuch 3: Modellexperiment zur Untersuchung der Bedeutung von Aerosolen auf den Strahlungshaushalt

Geräte und Chemikalien: wie in Versuch 2, dazu: Schwefelpulver, Stiellöffel ($\varnothing = 1 \text{ cm}$), Standzylinder mit Abdeckplatte, Bunsenbrenner

Durchführung: Versuchsaufbau siehe Abbildung 5. Zunächst führt man den Versuch 2 wie beschrieben mit Luft durch. Anschließend wird etwas Schwefelpulver in den Stiellöffel gegeben, mit dem Bunsenbrenner angezündet und in den Standzylinder gehalten. Der Standzylinder wird mit einer Glasplatte verschlossen, sobald er deutlich sichtbar mit Rauch bzw. Nebel gefüllt ist. Nun gießt man diese von Schwefeldioxid gebildeten Aerosole durch Umstülpen des Zylinders in den oberen Gasraum der PE-Flasche und verschließt die Flasche sofort mit PE-Folie. Anschließend verfährt man wie in Versuch 2 beschrieben.

Ergebnisse und Auswertung: Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Bei der Verbrennung von Schwefel bildet sich Schwefeldioxid, das mit dem Wasserdampf der Luft sofort gut sichtbare Nebel bildet. Diese Nebel reflektieren einen Teil der Lichtstrahlung der Halogenlampe, so daß weniger Energie zur Verfügung steht, um an der Pappe in Wärme umgewandelt zu werden. Die Folge ist ein deutlich geringerer Temperaturanstieg unter der Aerosolatmosphäre ($\vartheta 1$) als unter Luft. Auch die Temperaturdifferenz im oberen Gasraum, also im Schwefeldioxid, wird im Laufe der Zeit gegenüber Luft immer geringer. Das ist ein deutliches Zeichen dafür, daß an der Pappe erheblich weniger Wärmestrahlung entsteht, so daß die Absorptionsfähigkeit des Schwefeldioxids nicht mehr zum Tragen kommen kann. Die geschilderten Temperaturdifferenzen sind sogar dann zu beobachten, wenn der mit Schwefeldioxid gefüllte Gasraum für das Auge fast durchsichtig erscheint. Einen vergleichbaren Effekt bekommt man mit anderen Partikeln, die die Lichtdurchlässigkeit der oberen Atmosphäre verringern, z. B. mit Zigarettenrauch, so daß mit diesem Modellexperiment also auch der Einfluß von Nebeln oder Stäuben veranschaulicht und erarbeitet werden kann. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse aus den Versuchen 2 und 3 graphisch dargestellt.

$\frac{t}{\text{min}}$	Luft		Schwefeldioxid		$\Delta\vartheta$ (Schwefeldioxid) - $\Delta\vartheta$ (Luft)	
	$\vartheta 2 (\Delta\vartheta)$	$\vartheta 1 (\Delta\vartheta)$	$\vartheta 2 (\Delta\vartheta)$	$\vartheta 1 (\Delta\vartheta)$	$\vartheta 2 (\Delta\vartheta)$	$\vartheta 1 (\Delta\vartheta)$
0	20,1	19,4	21,0	21,1	-	-
1	23,4(3,3)	23,9(4,5)	24,4(3,4)	24,7(3,6)	0,1	-0,9
3	25,8(5,7)	27,6(8,2)	26,2(5,2)	27,2(6,1)	-0,5	-2,1
5	27,7(7,6)	30,3(10,9)	27,8(6,8)	29,3(8,2)	-0,8	-2,7

Tab. 2. Ergebnisse des Modellexperimentes mit Luft und mit Schwefeldioxid

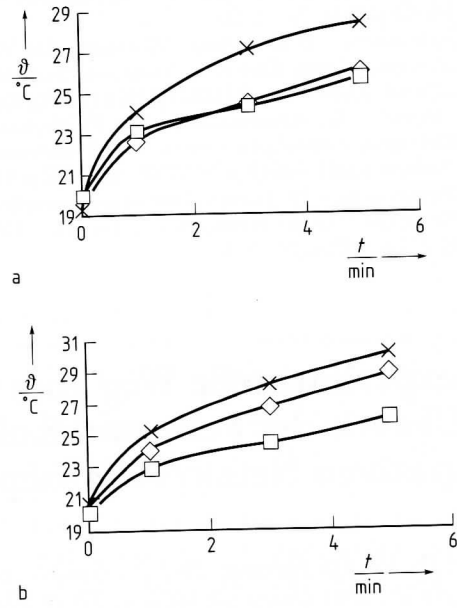


Abb. 6. Temperaturdifferenzen zwischen Luft, Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid - Nebeln, a: Temperatur der Gasatmosphäre ($\vartheta 2$); b: Temperatur im Lufruam unter den Gasen ($\vartheta 1$) (\diamond : Luft, \times : Kohlenstoffdioxid, \square : Schwefeldioxid)

4 Zusammenfassung

Mit dieser Versuchsreihe können der Begriff der Remission, die Emissionsfähigkeit von Gasen sowie die für den Treibhauseffekt wesentliche Voraussetzung der Remission von Wärmestrahlung durch atmosphärische Spurengase demonstriert werden. Aufgrund der großen Bedeutung der Remission von Wärmestrahlung durch Gase zurück zur Erde sollte dieser Aspekt auch im Unterricht möglichst anschaulich behandelt werden. Insbesondere die Erklärungen TYNDALLS kön-

nen dazu dienen, auch jüngeren Schülern und Schülerinnen eine Erklärungsgrundlage zu liefern.

Der Einfluß von Aerosolen, Tröpfchen und Stäuben auf den Strahlungshaushalt der Erde ist in den letzten Jahren zunehmend in Klimamodellen berücksichtigt worden. Auch dieser kann mit Hilfe des geschilderten Experimentes betrachtet werden.

Gemeinsam mit den bereits erwähnten bekannten Experimenten und Konzeptionen wird so ein Verständnis des komplexen Phänomens »Treibhauseffekt« erleichtert.

Literatur

- [1] M. ADELHELM – E. HÖHN: Zur Behandlung des Treibhauseffektes im Chemieunterricht. – MNU 44(1991), 417.
- [2] B. HUH: Experimente zum Treibhauseffekt. – PdN-Ph 43 (1994), Nr. 6, 26.
- [3] I. PARCHMANN – B. KAMINSKI – W. JANSEN: Die Wärmeabsorption von Gasen – Voraussetzung für den »Treibhauseffekt«. – CHEMKON 2 (1995), Nr. 1, 17.
- [4] E. HUBER – U. AESCHBACHER: Die Problematik von Demonstrationsexperimenten zum Treibhauseffekt: Analyse und Lösungen. – MNU 48 (1995), 415.
- [5] I. PARCHMANN – W. JANSEN: Der »Treibhauseffekt« als Folge der Wärmeabsorption von Gasen. – CHEMKON 3 (1996), Nr. 1, 6.

- [6] Foliensatz des Fonds der Chemischen Industrie, Thema »Luft«. – Fonds der Chemischen Industrie, Postfach 1119 43, 60054 Frankfurt.
- [7] H. HOVERATH: Versuche zum Treibhauseffekt – Absorption von Wärmestrahlung durch Glas und durch verschiedene Gase. – MNU 50 (1997), 29.
- [8] R. BACHHOFEN – K. FRISCHKNECHT: Nachweis der Wärmeabsorption von Gasen als Ursache für den Treibhauseffekt – Anregungen von John Tyndall (1860) zur Durchführung von Schulversuchen. – MNU 48 (1995) 350.
- [9] J. TYNDALL: Die Wärme betrachtet als eine Art der Bewegung. – Braunschweig: Vieweg 1867 (Deutsche Auflage).
- [10] H. BODE – H. PIENKA: Absorption und Emission von IR-Strahlung durch Treibhausgase. – PdN-Ph 45 (1996) Nr. 5, 32.
- [11] R. STEUDEL: Schwefelsäure aus Schwefeltrioxid und Wasser – eine überraschend komplexe Reaktion. – CHEMKON 3 (1996) Nr. 1, 47.
- [12] J. T. HOUGHTON u. a. (Hg.): Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. – Cambridge: University Press 1995.
- [13] R. J. CHARLSON – T. M. L. WIGLEY: Sulfat-Aerosole und Klimawandel. – Spektrum der Wissenschaften 4 (1994) 46. □

Ich danke Herrn Prof. Dr. WALTER JANSEN für die Unterstützung dieser Arbeit und die permanente Bereitschaft zur konstruktiven Diskussion.