

Der Klimawandel und die Globale Erwärmung (IPCC-Report 2013)

Eine Unterrichtsidee von Matthias Hauck

Das im Folgenden dargestellte Material wurde zur Einbindung des Artikels „Klimamodelle und Globale Erwärmung“ aus der Zeitschrift „Physik in unserer Zeit“ entwickelt [Marotzke (2014)]. Es gibt Hintergrundinformationen zu dem Artikel und kann generell im naturwissenschaftlichen Unterricht eingesetzt werden. Besonders empfiehlt es sich im Physikunterricht der gymnasialen Kursstufe. Neben den theoretischen Grundlagen zu den Strahlungsgesetzen und der Physik hinter dem Klimawandel werden zwei Demonstrationsexperimente für den Unterricht beschrieben. Diese wurden im Rahmen des Seminars „Demonstrationsversuche für Lehramtskandidaten“ an der Physikalischen Fakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg entwickelt [Löhken und Roedel (2002)]. Das gesamte Unterrichtsmaterial wurde bereits im Fach Naturwissenschaft und Technik (NwT) in Klassenstufe 10 sowie in zwei vierstündigen Physikkursen der gymnasialen Kursstufe in Baden-Württemberg erfolgreich eingesetzt.

Fachgebiet	Physik
Bezug zu	Naturwissenschaft und Technik (NwT), Geographie
Thema	Strahlungsgesetze und Umweltphysik
Stichwort	Planksche Strahlungsformel, Wiensches Verschiebungsgesetz, Stefan-Boltzmann-Gesetz, Strahlungsbilanz der Erde, schwarzer/grauer Strahler, Thermosäule, natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt, Albedo
Klassenstufe	Kursstufe, Klassenstufe 10
Zeit	2-3 Stunden

Hintergrundinformationen

Allgemeine Betrachtungen

Der Klimawandel und die daraus resultierende globale Erwärmung ist eine der größten Herausforderungen der Menschheit im 21. Jahrhundert. Der fünfte IPCC-Report von 2013/14 zeigt klar den anthropogenen Einfluss und das Ausmaß der Veränderungen unseres Klimas auf. Trotz dieser immensen Bedeutung wird dieses Thema in den meisten Lehrplänen der Schulen nur am Rande erwähnt. Aufgrund seiner Aktualität und des direkten Bezugs zu unserem täglichen Leben, ist dies pädagogisch eigentlich nicht zu rechtfertigen. Gerade die heutigen Schülerinnen und Schüler sowie deren Nachkommen werden die Folgen des Klimawandels deutlich spüren und damit leben müssen. Daher ist es meines Erachtens von großer Bedeutung, ihnen die entsprechenden naturwissenschaftlichen Grundlagen zu vermitteln, und sie für die gesamte Problematik zu sensibilisieren.

Um zu einem tiefergehenden Verständnis der Globalen Erwärmung beziehungsweise des Treibhauseffektes zu gelangen, benötigt man Kenntnisse über die Strahlungsbi-

lanz der Erde. Die Grundlage hierzu bildet die Plancksche Strahlungsformel. Sie gibt die Strahlungsflussdichte S eines schwarzen Strahlers in einem bestimmten Wellenlängenintervall $[\lambda; \lambda + d\lambda]$ an:

$$S(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{c \cdot h}{k_B \cdot \lambda \cdot T}} - 1)} \cdot d\lambda$$

Hierin sind $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js das Plancksche Wirkungsquantum, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, T die absolute Temperatur in Kelvin und $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K die Boltzmann-Konstante. Zur Herleitung dieser Formel sei an dieser Stelle auf die gängige Literatur zur Quantenphysik verwiesen [Haken und Wolf, (2002)].

Aus dem Planckschen Strahlungsgesetz lassen sich zwei fundamentale Gesetze der Thermodynamik herleiten: das Wiensche Verschiebungsgesetz und das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Ersteres gibt die Abhängigkeit der Wellenlänge λ_{\max} des Maximums der Strahlungsflussdichte S und der Temperatur T eines schwarzen Strahlers an. Die Berechnung dieses Maximums ($dS(\lambda, T)/d\lambda=0$) ergibt

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$$

Hieraus kann man zum Beispiel berechnen, dass unsere Sonne mit einer Oberflächentemperatur von etwa 6000 K ihr Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge von $\lambda_{\max} \approx 483$ nm im sichtbaren grünen Bereich des elektromagnetischen Spektrums besitzt.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz folgt aus der Integration der Planckschen Strahlungsformel über alle Wellenlängen. Es beschreibt die Gesamtabstrahlung eines schwarzen Körpers.

$$S(T) = \int_0^{\infty} S(\lambda, T) \cdot d\lambda$$

Integriert man im Hinblick über eine Hemisphäre einer Kugel, so ergibt sich

$$2\pi \cdot S(T) = \sigma \cdot T^4$$

Hierbei ist $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante.

Im Unterricht ist die Behandlung der Planckschen Strahlungsformel aufgrund ihrer für Schüler ungewohnten mathematischen Formulierung schwierig. Zum Verständnis des Treibhauseffektes ist die Kenntnis des Stefan-Boltzmann-Gesetzes allerdings notwendig. Dieses kann mit Hilfe eines Demonstrationsversuchs im Unterricht auch experimentell abgeleitet werden.

Versuch 1

Material

- Wärmestrahler (Infrarotlampe)
- Thermosäule nach Moll
- Geschwärztes Aluminiumplättchen
- CASSYLAB inklusive Thermometer

Die Thermosäule nach Moll ist ein Messinstrument für Wärmestrahlung. Die Funktionsweise basiert auf einer Hintereinanderschaltung mehrerer Elemente, die mithilfe des thermoelektrischen Effekts Wärme in eine messbare elektrische Spannung umwandeln. Die Thermoelemente sind auf der Seite, auf der die Strahlung trifft, geschwärzt, sodass das Maximum an Wärmestrahlung absorbiert wird. Aufgrund der Proportionalität zwischen der Thermospannung und der absorbierten Strahlungsleistung kann die Spannung im Folgenden als Äquivalent für die Leistung aufgefasst werden. Ein konkreter Leistungswert ist für diesen Versuch nicht notwendig, weshalb in der Regel auf eine entsprechende, je nach verwendeter Thermosäule typspezifische Umrechnung verzichtet werden kann.

Eine Thermosäule misst folglich eine Temperaturdifferenz. Die Spannung fällt zwischen der bestrahlten Öffnung der Säule (siehe Abbildung 2) und deren äußerer Hülle ab, wobei die Referenztemperatur auf der Oberfläche des Zylinders der Umgebungstemperatur entspricht. Daher ist es wichtig, dass diese während des Experiments nicht berührt und dabei verändert wird.

Durchführung

Zunächst wird der in Abbildung 1 dargestellte Aufbau verwendet. Darin wird lediglich das Aluminiumplättchen aufgeheizt. Dieses ist auf dem Thermometer von CASSY aufgeklebt, sodass ständig die Temperatur des Plättchens gemessen wird (siehe Abbildung 2). Am Computer kann die Temperatur über die Software CASSYLAB ausgegeben werden. Die Thermosäule muss bei diesem Aufheizvorgang möglichst abseits vom Wärmestrahler stehen, um ihre Referenztemperatur nicht zu verfälschen.

Das Plättchen sollte auf über 100°C aufgeheizt werden. Im Anschluss entfernt man den Wärmestrahler und platziert, wie in Abbildung 2 dargestellt, die Thermosäule direkt vor dem Plättchen. Mit diesem Aufbau kann nun gleichzeitig die Temperatur des Plättchens mittels CASSY und die abgestrahlte Wärme über die Thermosäule gemessen werden. Aufgrund der geringen Spannungen, die hierbei auftreten, ist es sinnvoll, ei-

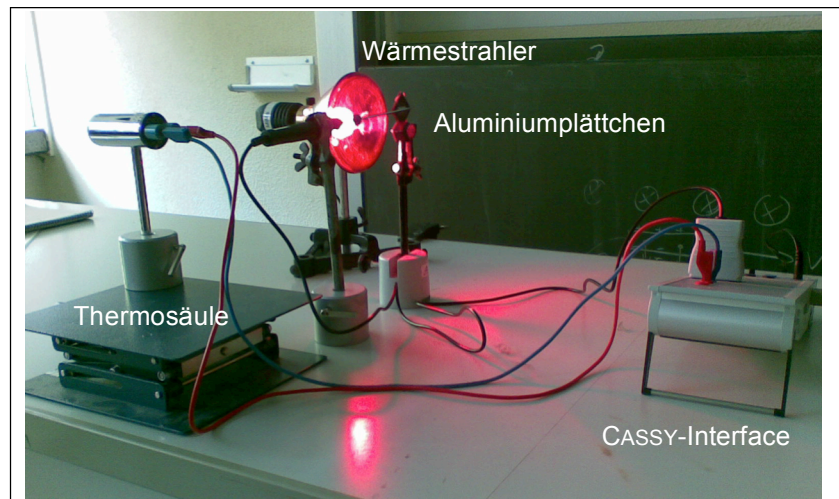


Abbildung 1: Aufheizen des Aluminiumplättchens zur experimentellen Ableitung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes.

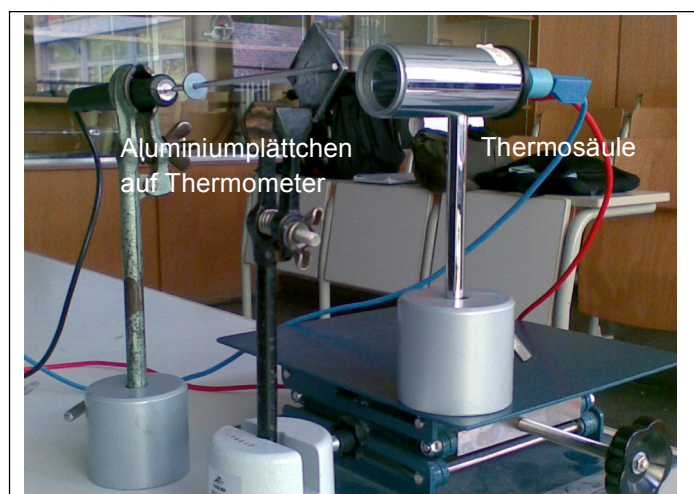
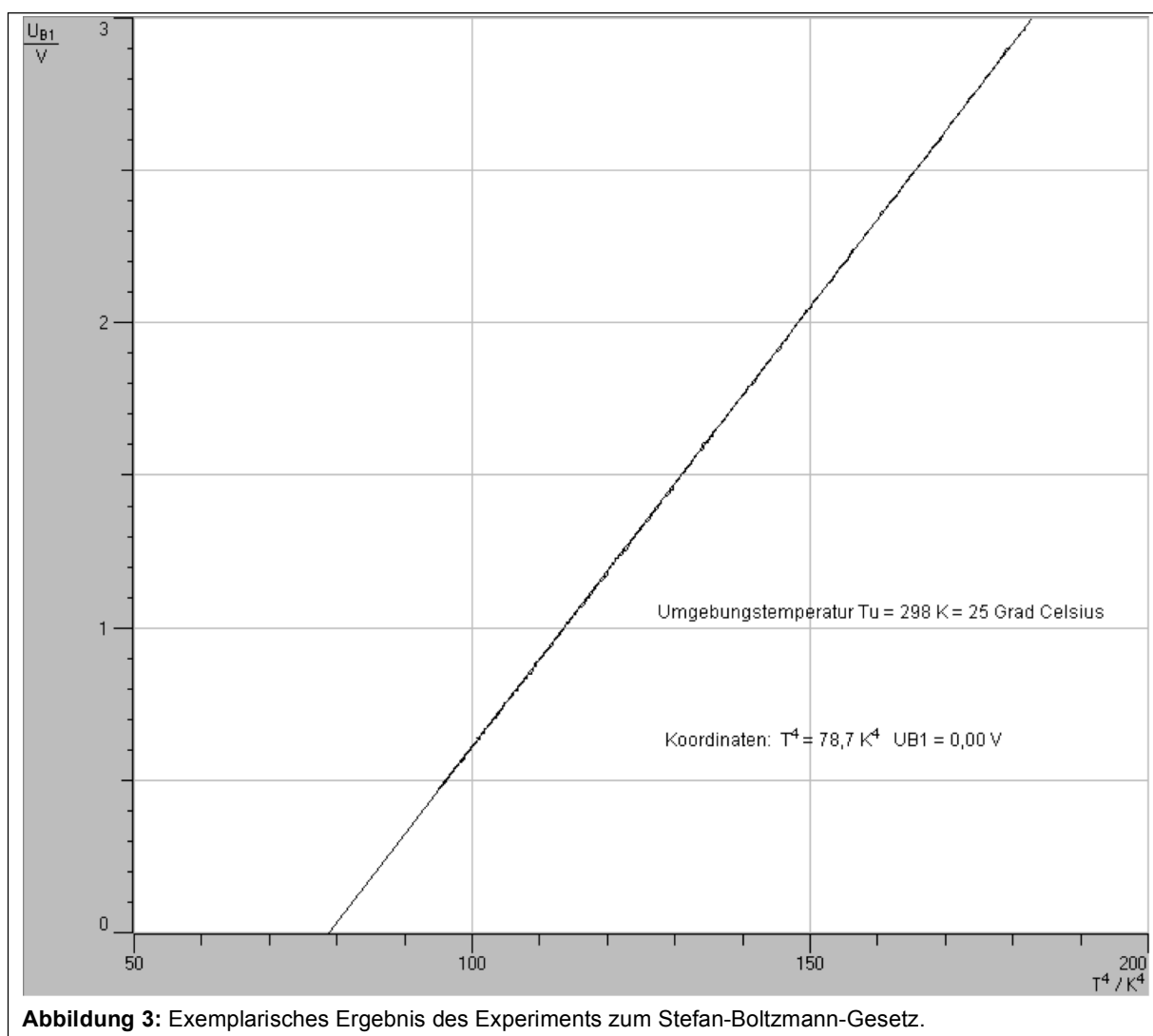


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau zur Messung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes.

nen Messverstärker zwischen die Thermosäule und das CASSY-Interface zu schalten.

Stellt man die abgestrahlte Leistung in Form der gemessenen Spannung des Thermoelements über der Temperatur in der vierten Potenz dar, so kann eine Ausgleichsgerade durch die Messwerte gelegt werden. Hieraus folgt ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen und man erhält somit das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Exemplarisch ist eine entsprechende Messung in Abbildung 3 dargestellt¹. Zur Vermeidung zu großer Zahlenwerte wurde hierbei die Temperatur T mit 0,01 multipliziert. Aus dem Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der T^4 -Achse kann abschließend die Raumtemperatur bestimmt werden.



¹ Diese Messwerte wurden von Dr. Rudolf Löhken zur Verfügung gestellt.

Die Strahlungsbilanz der Erde

Mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes kann die Strahlungsbilanz der Erde aufgestellt werden. Die Intensität der senkrecht einfallenden Sonnenstrahlung an der Oberkante der Atmosphäre wird durch die Solarkonstante S_0 beschrieben. Ihr Wert ist abhängig von dem 11-Jahreszyklus der Sonnenaktivität und vom jahreszeitlichen Abstand zwischen Sonne und Erde aufgrund der Ellipsenform der Erdbahn. Im Mittel beträgt die Solarkonstante $S_0 = 1368 \text{ Wm}^{-2}$. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wird die eingestrahlte Sonnenenergie von der Querschnittsfläche der Erde ($A = \pi \cdot r_E^2$ mit Erdradius r_E) aufgenommen. Diese wird im thermischen Gleichgewicht wieder über die gesamte Erdoberfläche $O = 4 \cdot \pi \cdot r_E^2$ abgestrahlt (siehe Abbildung 5). Hieraus ergibt sich die Gleichung

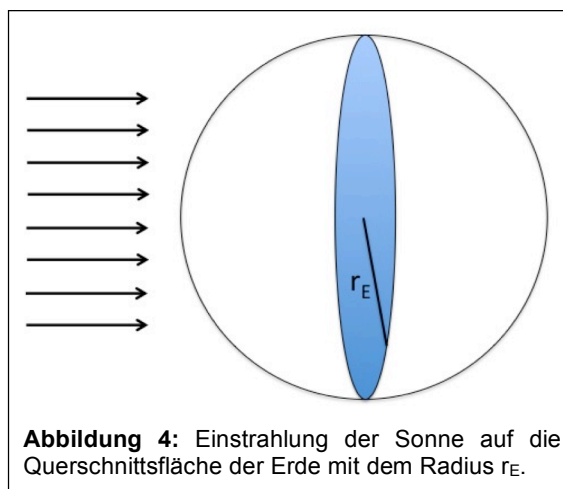


Abbildung 4: Einstrahlung der Sonne auf die Querschnittsfläche der Erde mit dem Radius r_E .

$$\pi r_E^2 \cdot S_0 = 4\pi r_E^2 \cdot S_E$$

$$\pi r_E^2 \cdot S_0 = 4\pi r_E^2 \cdot \epsilon_{\text{IR}} \cdot \sigma \cdot T_E^4$$

In der zweiten Zeile wurde das Stefan-Boltzmann-Gesetz verwendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Erde zwar nicht wie ein idealer schwarzer Strahler, aber wie ein grauer Strahler verhält. Das bedeutet, dass ihr Absorptions- respektive Emissionsvermögen unterhalb dessen eines schwarzen Strahlers liegt, dabei aber für alle Wellenlängen konstant bleibt. Diese Abweichung wird durch den Koeffizienten ϵ_{IR} ausgedrückt. Dieser berechnet sich nach der Formel

$$\epsilon_{\text{IR}} = \frac{\text{emittierte Leistung des Körpers}}{\text{emittierte Leistung eines schwarzen Strahlers}}$$

Da die Erde im infraroten Wellenlängenbereich der langwelligen Wärmestrahlung² näherungsweise ein schwarzer Strahler ist, gilt $\epsilon_{\text{IR}} = 0,96 \approx 1$.

Im kurzwelligeren sichtbaren Wellenlängenbereich des Sonnenlichts ist die Erde allerdings kein schwarzer Strahler. So wird das Licht beispielsweise an der Atmosphäre gestreut und an Wolken reflektiert. Dieses Rückstreuvermögen der Erde wird als planetare Albedo A_p bezeichnet. Sie beträgt etwa 30 %, wodurch nur 70 % der einfallenden Sonneneinstrahlung auf den Erdboden trifft. Somit muss die Formel für das Strahlungs-

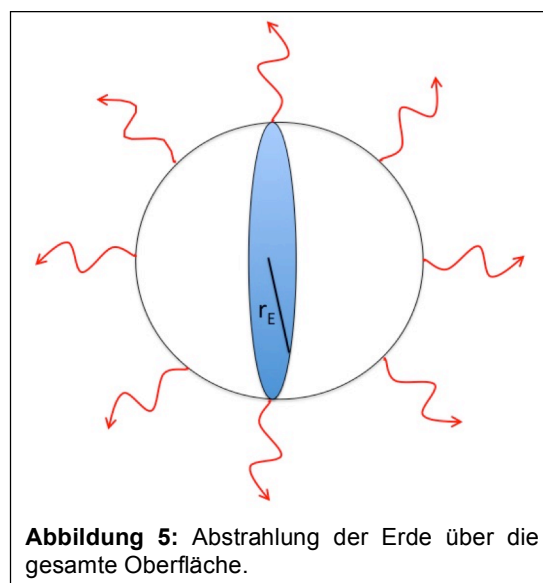


Abbildung 5: Abstrahlung der Erde über die gesamte Oberfläche.

² daraus leitet sich der Index „IR“ ab

gleichgewicht der Erde folgendermaßen erweitert werden

$$\pi r_E^2 \cdot S_0 \cdot (1 - A_p) = 4\pi r_E^2 \cdot \epsilon_{IR} \cdot \sigma \cdot T_E^4$$

$$\frac{S_0}{4} \cdot (1 - A_p) = \epsilon_{IR} \cdot \sigma \cdot T_E^4$$

Hieraus lässt sich ein Mittelwert der Oberflächentemperatur der Erde berechnen:

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{\frac{S_0}{4} \cdot (1 - A_p)}{\epsilon_{IR} \cdot \sigma}} \approx 255 \text{ K}$$

Mit ungefähr -18°C ist dieser viel zu gering. Im globalen Mittel beträgt die Oberflächentemperatur der Erde etwa 15°C . Dies erzeugt in den Schülerinnen und Schülern einen kognitiven Konflikt, den es aufzulösen gilt, und der direkt zum natürlichen Treibhauseffekt führt. An dieser Stelle ist es wichtig, deutlich zwischen dem natürlichen und dem anthropogenen Treibhauseffekt zu unterscheiden. Letzterer ist die Treibfeder des Klimawandels, wohingegen der natürliche Treibhauseffekt für uns Menschen lebensnotwendig ist.

Dieser natürliche Effekt ergibt sich daraus, dass die Atmosphäre die infrarote Strahlung der Erdoberfläche absorbiert und somit selbst zu einem thermischen Strahler wird, der einen Teil der Energie wieder als sogenannte thermische Gegenstrahlung auf die Erde zurückstrahlt. Ein häufig verwendeter Vergleich ergibt sich aus der Funktionsweise der Erdatmosphäre und der eines Glas- oder Treibhauses. Dessen Scheiben lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung hindurch, die langwellige Wärmestrahlung des Bodens wird jedoch wieder in das Innere des Glashauses abgegeben. Aus diesem Grund hat dieser Abschirmungseffekt der Atmosphäre den Namen Treibhauseffekt erhalten.

Formal kann der natürliche Treibhauseffekt durch die Einführung der so genannten Infrarot-Albedo B berücksichtigt werden. Ihr empirischer Wert beträgt etwa $0,38$. Somit ergibt sich die folgende Formel für das Strahlungsgleichgewicht der Erde

$$\frac{S_0}{4} \cdot (1 - A_p) = \epsilon_{IR} \cdot \sigma \cdot T_E^4 \cdot (1 - B)$$

und die Oberflächentemperatur berechnet sich zu

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{\frac{S_0}{4} \cdot (1 - A_p)}{\epsilon_{IR} \cdot \sigma \cdot (1 - B)}} \approx 288 \text{ K} \approx 15^\circ\text{C}$$

Abschließend wird eine Zusammenfassung über die thermischen Strahlungsflüsse in Abbildung 6 gegeben. Diese stammt aus dem IPCC-Klima-bericht von 2001. Hierin wird dargestellt, wie sich die ankommende Sonnenstrahlung von $S_0/4 \approx 342 \text{ W/m}^2$ in der Erdatmosphäre verteilt. Es zeigt sich, dass neben der unmittelbaren Absorption solarer Strahlung und nicht-radiativem Transport durch Konvektion, Verdunstung und Kondensation von Wasser, der Erdoberfläche zum größten Teil Energie durch den natürlichen Treibhauseffekt zugeführt wird. Hierfür sind in erster Linie Treibhausgase wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) oder Ozon (O_3) verantwortlich. Darüber hinaus besitzt der Bedeckungsgrad der Wolken eine wichtige Bedeutung. Gerade in der unteren Atmosphäre kommt hierbei dem Wasser-

dampf und den Wolken eine dominante Rolle zu. Bei bedecktem Himmel mit tief liegenden und somit relativ warmen Wolken geht die Nettoabstrahlung der Erdoberfläche fast auf Null zurück. Daneben hängt die thermische Gegenstrahlung im Wesentlichen von der Konzentration der Treibhausgase und ihrer Höhenverteilung ab. Ihre Wirkungsweise lässt sich im folgenden Demonstrationsexperiment den Schülerinnen und Schülern im Unterricht zeigen.

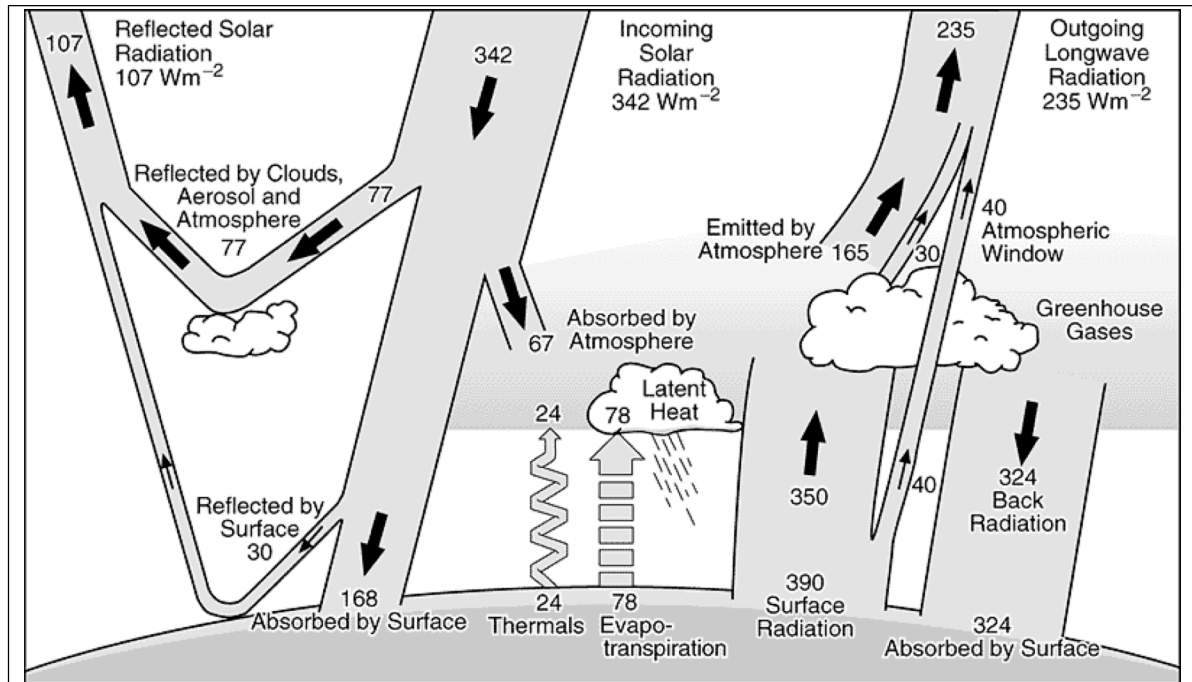


Abbildung 6: Darstellung der globalen Strahlungsbilanz.

Versuch 2

Material

- Wärmestrahler (Infrarotlampe)
- Thermosäule nach Moll
- Plastikrohr
- Messverstärker
- Gasflasche mit CO_2 oder N_2O

Durchführung

Zunächst werden die Enden des Plastikrohrs mit handelsüblicher Frischhaltefolie verschlossen. Das eine Ende wird von einer Infrarotlampe bestrahlt. Wie in Abbildung 7 dargestellt, wird am anderen Ende die Intensität der durch das Rohr gelangten Strahlung mit einer Thermosäule gemessen. Füllt man zum Beispiel CO_2 oder Lachgas (N_2O) in das Rohr, so verringert sich die gemessene Intensität im Vergleich zur Messung mit einem luftgefülltem Rohr. Dies liegt daran, dass die entsprechenden Spurengase einen Teil der auf die Thermosäule gerichteten Wärmestrahlung absorbieren und im An-

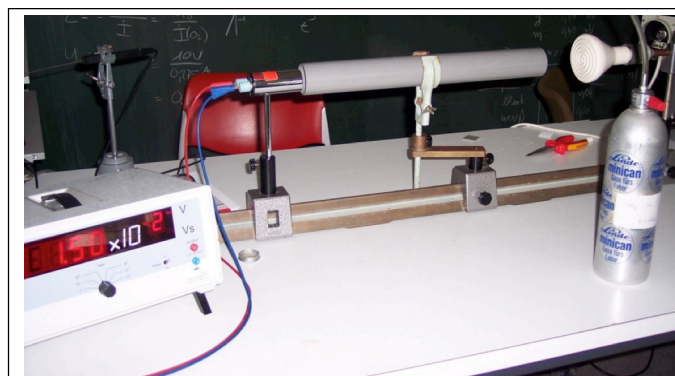


Abbildung 7: Versuch zur Absorption von Wärmestrahlung durch Treibhausgase.

schluss in alle Richtungen emittieren, wodurch schließlich weniger Intensität am Ende des Rohres ankommt.

Der anthropogene Treibhauseffekt

Im Vergleich zum natürlichen Treibhauseffekt, der eine Lebensgrundlage für uns Menschen auf der Erde darstellt, ist der anthropogene Treibhauseffekt in hohem Maße schädlich. Für Schülerinnen und Schüler ist es im Hinblick auf die Klimaerwärmung von großer Bedeutung, seine Ursachen zu verstehen. Aus diesem Grund sollte das Folgende umfassend im Unterricht besprochen werden.

Zur Veranschaulichung des anthropogenen Treibhauseffekts dient Abbildung 9 [Peixoto und Oort (1993)]. Sie zeigt im oberen Teilbild (a) die spektrale Energieverteilung der Sonnenstrahlung bei einer Oberflächentemperatur von 6000 K sowie die der Bodenstrahlung bei 255 K. Beide entsprechen näherungsweise einer klassischen Schwarzkörperstrahlung. Daneben ist das Absorptionsspektrum der gesamten Atmosphäre (b), das der Atmosphäre oberhalb von 11 km (c) sowie die Absorptionsspektren einiger relevanter Spurenstoffe (d) dargestellt. Es zeigt sich, dass die Absorptionskoeffizienten der einzelnen Gase sehr stark mit ihrer Wellenlänge variieren. Die Absorption erfolgt hierbei in einzelnen Spektrallinien.

Der Wasserdampf in der Atmosphäre sowie die Spurengase absorbieren das Sonnenlicht in einem großen Wellenlängenbereich nicht. Im Fall der Wärmestrahlung, die vom Erdboden ausgeht, ist der Abbildung 9d jedoch zu entnehmen, dass gerade bei den beiden wichtigsten Treibhausgasen, dem atmosphärischen Wasser und dem Kohlenstoffdioxid, die Absorption in einigen Wellenlängenbereichen bei 100 % liegt. So besitzt Wasser zum Beispiel eine starke Rotationschwingungsbande zwischen 5 und 8 μm , ge-

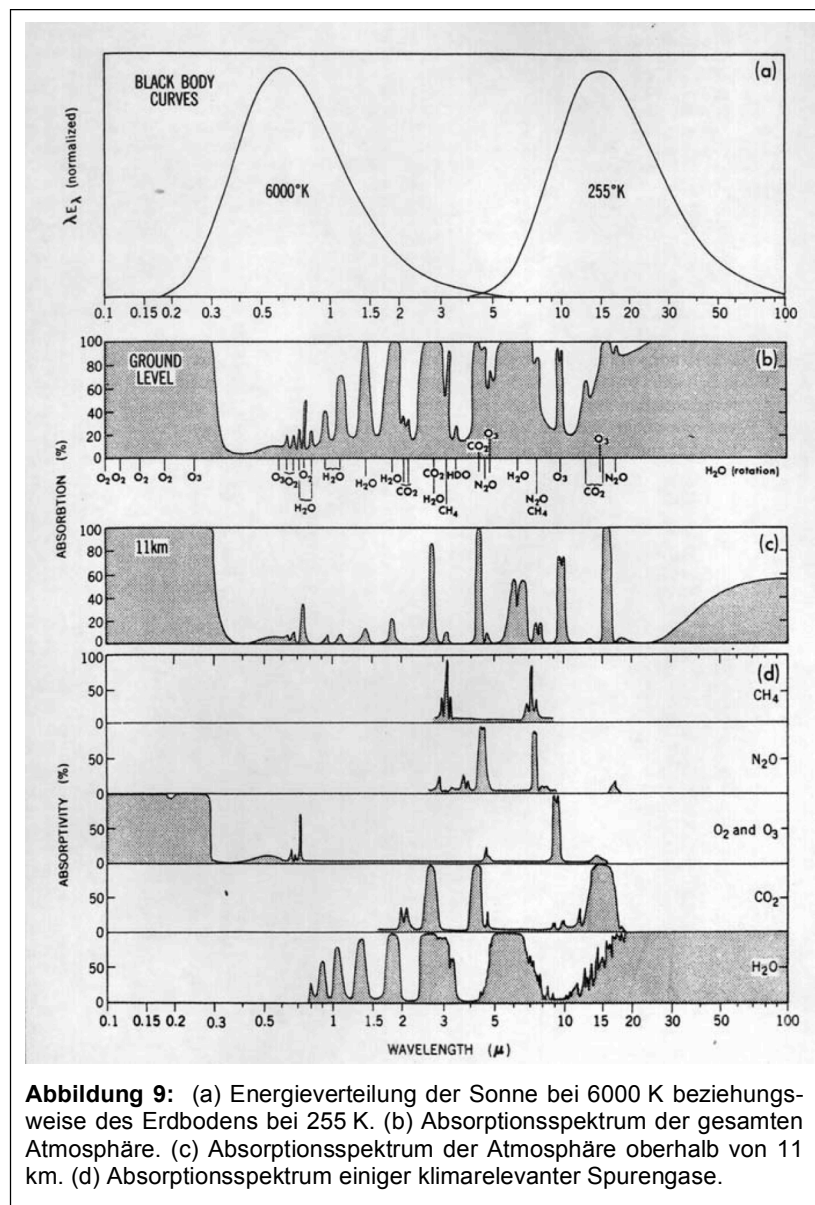


Abbildung 9: (a) Energieverteilung der Sonne bei 6000 K beziehungsweise des Erdbodens bei 255 K. (b) Absorptionsspektrum der gesamten Atmosphäre. (c) Absorptionsspektrum der Atmosphäre oberhalb von 11 km. (d) Absorptionsspektrum einiger klimarelevanter Spurengase.

folgt von einer breiten Rotationsbande ab etwa $16\ \mu\text{m}$. Zwischen 13 und $17\ \mu\text{m}$ liegt des Weiteren eine starke Bande des Kohlenstoffdioxids. Daher ergibt sich bei wolkenfreiem Himmel nur ein sehr schmales Fenster für die Abstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 8 und $13\ \mu\text{m}$. In dieses so genannte atmosphärische Fenster fällt allerdings zusätzlich eine schmale Bande des Ozons (O_3) bei etwa $9,5\ \mu\text{m}$ sowie um $8\ \mu\text{m}$ eine von Methan (CH_4) und von Distickstoffmonoxid (N_2O), umgangssprachlich als Lachgas bezeichnet [Roedel und Wagner (2011)].

Aufgrund der Emission von Treibhausgasen, vor allem durch die Verbrennung fossiler Energieträger und einer veränderten Landnutzung, haben die Menschen die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre in den letzten 150 Jahren massiv erhöht. Das atmosphärische Fenster wird durch die zusätzliche Absorption auf der Flanke der CO_2 -Bande bei $15\ \mu\text{m}$ sowie der CH_4 - und N_2O -Bande immer enger. Des Weiteren nimmt seine Durchlässigkeit aufgrund der stärkeren Absorption in der Ozonbande bei $9,5\ \mu\text{m}$ ab. Dadurch kann schließlich von der Erdoberfläche weniger Energie an den Weltraum abgegeben werden. Hinzu kommt, dass die Leistung eines thermischen Strahlers nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zu T^4 ist, wodurch die Gegenstrahlung der Atmosphäre umso intensiver wird, je wärmer die Atmosphäre ist.

Exemplarisch sei an dieser Stelle die Zunahme der CO_2 -Konzentration aufgeführt. Kohlenstoffdioxid ist das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre. Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Abholzung der Regenwälder kam es in den vergangenen Jahrzehnten zu einem steten Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Diese wurde zum Teil aufgefangen durch die Aufnahme von CO_2 in den Erdboden sowie in die Ozeane. Beiden Senken für das atmosphärische Kohlenstoffdioxid waren in den vergangenen 50 Jahren sehr stabil. Ob diese Stabilität in der Zukunft erhalten bleibt kann allerdings nicht prognostiziert werden. Vielmehr kommt es beispielsweise zu einer Abnahme des pH-Werts im Oberflächenwasser der Ozeane und somit zu einer „Versäuerung“ der Weltmeere.

Die anthropogenen Veränderungen in der Atmosphäre sind im IPCC-Report 2013³ zu den physikalischen Grundlagen des Klimawandels belegt und können auch von so genannten Klimakritikern nicht verleugnet werden. Die zentralen Punkte dieses Berichts werden nun abschließend beschrieben.

Zusammenfassung des physikalischen Grundlagenteils des IPCC-Reports 2013

Allgemeines

- Die Erwärmung des Klimasystems ist unzweifelhaft. Seit den 1950er Jahren sind viele der beobachteten Veränderungen beispiellos über Jahrzehnte bis Jahrtausende. Die Atmosphäre und Ozeane haben sich erwärmt, die Menge an Schnee und Eis hat abgenommen, der Meeresspiegel ist angestiegen und die Konzentration von Treibhausgasen hat zugenommen.
- Seit 1850 war jedes der vergangenen drei Jahrzehnte sukzessive wärmer auf der Erdoberfläche als jedes Jahrzehnt zuvor. In der Nordhemisphäre war der Zeitraum zwischen 1983 und 2012 wahrscheinlich die wärmste 30-Jahres-Periode in den vergangenen 1400 Jahren.

³ <http://www.climatechange2013.org> (zuletzt besucht am 27. April 2014)

- Die Erwärmung der Ozeane dominiert den Anstieg der im Klimasystem gespeicherten Energie. Sie ist für die Speicherung von mehr als 90 % der Energie zwischen 1971 und 2010 verantwortlich. Es ist praktisch sicher, dass der obere Teil der Ozeane (0 – 700 m) sich von 1971 bis 2012 erwärmt hat. 60 % der Energie ist in diesem oberen Teil und 30 % darunter gespeichert. In den Jahren von 1971 bis 2010 betrug die Erwärmung des Oberflächenwassers pro Jahrzehnt durchschnittlich 0,11 °C.
- Über die letzten beiden Jahrzehnte haben die Eisschilde von Grönland und der Antarktis an Masse verloren. Gletscher sind fast überall auf der Welt weiter geschmolzen und geschrumpft. Das arktische Meereseis und der Frühjahresschnee in der nördlichen Hemisphäre haben in seinem Umfang abgenommen. Der durchschnittliche Eisverlust der Gletscher um die Erde betrug etwa 226 Gigatonnen pro Jahr zwischen 1971 und 2012. In der Antarktis ergab sich ein Anstieg des Eisverlusts im Mittel von 30 Gt/a in den neunziger Jahren bis zu 147 Gt/a in den Jahren nach der Jahrtausendwende.
- Der Anstieg des Meeresspiegels war seit Mitte des 19. Jahrhunderts größer als die mittlere Anstiegsrate in den vergangenen zwei Jahrtausenden. Zwischen 1901 und 2010 stieg der globale Meeresspiegel um 0,19 m. Wahrscheinlich betrug der Anstieg von 1993 bis 2010 etwa 3,2 mm pro Jahr.
- Die atmosphärische Konzentration von Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffmonoxid (N₂O) sind auf ein beispielloses Level über die vergangenen 800 000 Jahre gestiegen. Seit der Vorindustrialisierung haben die CO₂-Konzentrationen um 40 % zugenommen. Hauptsächlich aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe und aufgrund der Veränderung in der Landnutzung insbesondere durch Abholzung.
- Die Ozeane haben 30 % des anthropogenen Kohlenstoffdioxids absorbiert, was zu einer Versäuerung der Weltmeere führt. Die entsprechende Abnahme des pH-Werts liegt bei 26 %.
- Die aktuellen Konzentrationen betragen 491 ppm⁴ für CO₂, 1800 ppb für Methan und 324 ppb für N₂O. Dies entspricht jeweils einer prozentualen Zunahme seit der Vorindustrialisierung um 40 %, 150 % und 20 %.
- Der totale Strahlungsantrieb ist positiv und führt zu einer Aufnahme von Energie durch das Klimasystem. Den größten Anteil am Strahlungsantrieb bildet der Anstieg in der atmosphärischen Konzentration von CO₂ seit 1750.
- Der menschliche Einfluss auf das Klimasystem ist unbestreitbar, erwiesen durch die Zunahme der Treibhausgase, des positiven Strahlungsantriebs und die Erderwärmung im Allgemeinen.

Ausblick

- Weitere Emissionen von Treibhausgasen werden zu einer stärkeren Erwärmung und zusätzlichen Veränderungen in allen Komponenten des Klimasystems führen. Eine Begrenzung des Klimawandels verlangt eine substanzielle und nachhaltige Reduzierung der Treibhausgasemissionen.

⁴ ppm – 1 Molekül pro einer Million Luftmolekülen („parts per million“); ppb – 1 Molekül pro einer Milliarde Luftmolekülen („parts per billion“)

- Die aktuellen Klimamodelle sagen eine Erderwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um mehr als 1,5 °C voraus.
- Der Unterschied im atmosphärischen Niederschlag zwischen feuchten und trockenen Gebieten sowie zwischen Regen- und Trockenperioden wird zunehmen.
- Die Ozeane werden sich weiter erwärmen. Die Wärme wird von der Oberfläche in tiefere Schichten der Weltmeere vordringen und die Ozeanzirkulation beeinflussen.
- Es ist wahrscheinlich, dass das arktische Meereseis und die Gletscher weiter abnehmen, ebenso der Frühjahresschnee in der nördlichen Hemisphäre.
- Alle theoretischen Szenarien ergeben, dass der globale Meeresspiegel weiter ansteigen wird, bedingt durch das Schmelzen der Gletscher und des Inlandeises.
- Der Klimawandel wird die Kohlenstoffkreisläufe in einer Weise beeinflussen, dass sich die Zunahme von CO₂ in der Atmosphäre verschärfen wird.
- Die weitere Aufnahme von CO₂ durch die Ozeane führt zu einer noch stärkeren Vergiftung der Meere und dadurch beispielsweise zu einer Zunahme des Korallensterbens.
- Die meisten Aspekte des Klimawandels werden viele Jahrzehnte andauern, selbst wenn die Emissionen von CO₂ gestoppt werden. Dies stellt eine substantielle jahrzehntelang anhaltende Veränderung des Klimas dar.

Literatur

H. Haken und H.C. Wolf (2001). *Atom- und Quantenphysik.* Springer, Heidelberg.

R. Löhken und W. Roedel (2002). *Die Gesetze der Wärmestrahlung. Eine Einführung mit einfachen Mitteln.* Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 5: 279–283.

J. Marotzke (2014). *Klimamodelle und Globale Erwärmung.* Physik in unserer Zeit, 45: 118–125.

J.P. Peixoto und A.H. Oort (1993). *Physics of Climate.* American Institute of Physics, New York.

W. Roedel und T. Wagner (2011). *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre.* Springer Verlag, Heidelberg.