B2 Treibhauseffekt im Trinkbecher – Ein Modell zur Klimaänderung

Mit diesem recht einfachen Experiment lassen sich die dem Treibhauseffekt zu Grunde liegenden physikalischen Phänomene wie Strahlung, Reflexion, Absorption, Wärmestrahlung usw. sehr gut erkennen und differenzieren. Um die Ergebnisse des Experiments zu interpretieren, bedarf es einiger Vorkenntnisse. Es bietet sich deshalb entweder an, das Experiment nach Einführung in die vorgenannten Themen zur Verifikation des Gelernten einzusetzen. Oder das Experiment wird als Einstieg in das brandaktuelle Thema Treibhauseffekt durchgeführt und anschließend findet die physikalische Vertiefung statt. Die zu diesem Experiment mitgelieferten Materialien und Geräte reichen für acht parallel arbeitende Schülergruppen.

1 Zentrale Fragestellung

Die durch den Treibhauseffekt bewirkte Klimaveränderung ist Gegenstand nationaler Politik sowie internationaler Konferenzen und Vereinbarungen. Die naturwissenschaftliche Fragestellung ist nun, wie entsteht in einem Treibhaus der typische Erwärmungseffekt und wie weit kann das auf den Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre übertragen werden. Das ist natürlich auch für lebensnahen Schulunterricht von großem Interesse. Wir untersuchen das mittels Teilexperimente in einem einfachen Becher aus Kunststoff (Polypropen, kurz PP).

- Teilexperiment 1:
  Messung im offenen Becher
- Teilexperiment 2:
  Messung im abgeschlossenen Becher
- Teilexperiment 3:
  Messung mit schwarzem Absorber
- Teilexperiment 4:
  Messung mit Alufolie als Absorber

Abb. 1: Einfaches Modell eines Treibhauses: Ein Becher aus transparentem Kunststoff (Polypropen), der mit einem Deckel verschlossen ist, und schwarzes Papier als Absorber.

2 Einordnung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang

2.1 Fachliche Grundlagen

Die Vorstellung der Schülerinnen und Schüler „Die Gefäßwand isoliert die Wärme bzw. Temperatur“ ist nicht ausreichend, um alle Phänomene des Experiments zu erklären! Vor allem reicht sie nicht, um die Effekte der Klimaveränderung aus einem Treibhauseffekt zu erklären!
Die Schülerinnen und Schüler sollten Vorkenntnisse über die Begriffe Energieerhaltung, Strahlung, Reflexion und Absorption von Strahlung sowie die drei Formen der Wärmeübertragung (Wärmeleitung/Wärmeströmung/Wärmestrahlung) haben. Nur durch differenzierte Betrachtung unserer Experimente unter diesen Aspekten kommen wir zu einer Klärung der Phänomene.
Falls diese Vorkenntnisse noch nicht alle vorhanden sind, kann das Experiment natürlich auch zum Einstieg in diese Themengebiete eingesetzt werden.

© Siemens Stiftung 2015. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

2.2 Lehrplanrelevanz

In der Altersstufe 14 – 15 Jahre steht für den Biologieunterricht zum Thema Umwelt im Lehrplan: „Beschreiben und Beurteilen an ausgewählten Beispielen zu Auswirkungen menschlicher Eingriffe in die Umwelt“. Die einschlägigen Themen im Geografieunterricht sind die vielfältigen Aspekte der Klimaveränderung (globale Bezüge; natürliche und anthropogen bedingte Klimaveränderungen und ihre Folgen, z. B. durch Treibhauseffekt, Ozonloch; Maßnahmen zum Schutz der Atmosphäre, z. B. Klimakonferenzen). Aus der Physik sind es die Themen Wärmeübertragung, Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung (Emission, Reflexion, Absorption).
In der Altersstufe 15 – 16 Jahre stehen für Physik und/oder Chemie die Themen „Treibhauseffekt: Bedeutung in Natur, Alltag und Technik“, „Erdöl, Erdgas und Kohle: Grundstoff- und Energielieferanten“, „Kohlenstoffkreislauf und Treibhauseffekt“ sowie „Alternative Stoff- und Energiequellen“ im Lehrplan.

Themen und Begriffe: Absorption, Emission, Energieerhaltung, Erdatmosphäre, Erwärmungseffekt, Farbtemperatur, globale Temperaturerhöhung, Klimagase, Klimakonferenz, Klimaveränderung, Konvektion, Ozonloch, Reflexion, Rückstrahlung, Sonnenlicht, Strahlung, Strahlungsenergie, Strahlungsgleichgewicht, Treibhauseffekt, Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Wärmeströmung, Wiederabstrahlung

2.3 Kompetenzen

Die Schülerinnen und Schüler ...

- erkennen, von der Beobachtung ausgehend, dass sich im isolierten Gefäß die Temperatur durch Lichteinstrahlung erhöht, die Rolle der verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen: Emission, Absorption und Reflexion von Wärmestrahlung sowie Wärmeleitung und Konvektion.
- erarbeiten sich theoretisch die Wirkungsweise des Treibhauseffekts.
- untersuchen praktisch, welchen Einfluss ein modifizierter Versuchsaufbau für die Erkenntnisgewinnung darstellt.
- gestalten selbstständig die Versuchsanordnung derart, dass sich Antworten auf ihre Fragestellungen ergeben.

2.4 Das Experiment im Erklärungszusammenhang

2.4.1 Qualitativer Zugang

Im Experiment wird Strahlungsenergie in Form von Licht in das Klimagefäß eingebracht und dort vom Gas und evtl. vorhandenen Absorptionsmaterialien gespeichert. Bei unserem Versuchsaufbau fällt, ohne Absorber relativ viel Licht unabsorbiert durch den Becher durch. Wie viel absorbiert und gespeichert wird, hängt also stark vom verwendeten Absorber ab. Die Temperatur steigt an, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Energieeintrag und Energieabgabe (durch Wärmeleitung, Konvektion und Wiederabstrahlung) einstellt.
Die Konvektion aus dem Becher heraus in die Umgebung kann in unserem Experiment durch einen Verschluss komplett unterbunden werden, man beobachtet dann eine höhere Temperatur im Inneren.

© Siemens Stiftung 2015. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

2.4.2 Vertiefende Erklärung der Phänomene

Im Experiment wird zwar Energie in Form von Strahlung in das Klimagefäß eingetragen, die Energieabgabe durch Strahlung ist aber „gebremst“. Wieso ist das so? Am besten kann man das verstehen, wenn der Prozess in mehreren Stufen betrachtet wird.
Kurzwellige Einstrahlung: Sonnenlicht strahlt mit einer Temperatur (= Farbtemperatur, siehe Planck’sche Strahlungskurve) von bis zu 6.000 K, eine Halogenglühlampe von bis zu 3.400 K. Beides entspricht, verglichen mit fernem Infrarot, hauptsächlich recht kurzwelliger Strahlung von ca. 250 nm bis ca. 1.000 nm (also UV-, sichtbares Licht und nahes IR). Diese kurzwellige Strahlung geht fast zu 100 % durch die Wände unseres Kunststoffbechers, ohne absorbiert zu werden. Ähnlich verhält sich die Erdatmosphäre, durch die fast 2/3 des eingestrahlten Sonnenlichts durchgehen (ca. 1/3 wird reflektiert).
Absorption: Befindet sich im Becher ein Material wie schwarzes Papier, absorbiert dieses fast zu 100 % das kurzwellige Licht und erwärmt sich dadurch. Dasselbe ist auch bei der Erdoberfläche der Fall.
Langwellige Wiederabstrahlung: Das auf ca. 310 K aufgewärmte Absorptions-Material gibt nun teils durch Wärmestöße seiner kleinsten Teilchen Wärme an die Luft im Inneren ab, teils strahlt es nun selbst wieder ab. Aufgrund der niederen Temperatur liegt das Spektrum der Wiederabstrahlung von aufgewärmter Luft und Absorber nur im langwelligen IR-Bereich von mehreren µm Wellenlänge. Auch die erwärmte Erdoberfläche gibt ihre Wärme wieder hauptsächlich durch Strahlung ab. Ein guter Teil wird aber auch durch sog. Konvektion abtransportiert. D. h., durch die warme Erdoberfläche erwärmte Luft und Wasserdampf steigen nach oben und transportieren Wärme ab. Diesen Effekt haben wir auch bei unserem Becher, deshalb wird das Innere mit Deckel wärmer.
Reflexion und Absorption der Becherwand: Die langwellige Strahlung wird nun von der Becherwand teils reflektiert, teils absorbiert. Die durch Absorption aufgewärmte Wand strahlt einen Teil der Energie in das Gefäßinnere zurück und einen Teil in die Umgebung. Auf diese Weise – direkte Reflexion an der Becherwand und Rückstrahlung der aufgewärmten Becherwand – wird die Energieabstrahlung abgebremst und das Behälterinnere bleibt wärmer als die Umgebung.
Unser Gefäßinneres kann also nicht direkt an die Außenwelt Strahlungsenergie abgeben, da diese die Becherwand nur zu geringem Teil durchdringen kann. Derselbe Effekt tritt an der Erdoberfläche auf: Ein Teil der abgestrahlten Energie wird in den Wolken und Gasteilchen der Luft absorbiert. Und diese strahlen nur einen Teil in den Weltraum ab und den Rest wieder zurück zur Erde. Diese Rückstrahlung trägt ganz wesentlich zur Temperaturerhöhung der Erde bei. Und sie wird noch verstärkt, wenn anteilig mehr im langwelligen Bereich absorbierende Gase wie CO_2 in der Atmosphäre sind. Wir müssen allerdings anmerken, dass in unserer Versuchsanordnung ein wesentlicher Verlust an Wärme nicht durch Strahlung, sondern durch Konvektion im Inneren des Bechers hin zu den Wänden und durch direkte Wärmeleitung durch die Wände erfolgt!
Es können aber nicht nur Aspekte der globalen Temperaturerhöhung durch Klimagase aufgegriffen werden. Unser Experiment gibt auch Einblick in praktische Anwendungen des Treibhauseffekts wie z. B. Gewächshäuser und Energiesparhäuser. Ein anderes Phänomen aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler ist z. B., dass sich bei Sonnenschein ein Auto trotz Minusgraden im Winter im Inneren sehr stark aufheizen kann.

Wichtiger Hinweis: Beim Experiment mit der gewölbten Alufolie reflektiert das Aluminium das Licht und absorbiert es nicht. Dies lässt ein Ergebnis mit geringerer Erwärmung als mit schwarzem Papier erwarten. Doch es gibt auch einen gegenläufigen Effekt: Je nach Lichtquelle und Abstand zu ihr sowie je nach Wölbung der Aluminiumfolie kann die Alufolie aber auch wie ein

© Siemens Stiftung 2015. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

Parabolrinnenspiegel wirken und das Licht auf den Messfühler konzentrieren. Dadurch steigt die Temperatur stark an. (Hier könnte die Lehrkraft auf entsprechend konstruierte Solarkollektoren hinweisen). Dass dieses Experiment nicht immer zum selben Ergebnis führt, ist didaktisch kein Problem. Es wäre ein guter Anlass, mit den Schülerinnen und Schülern darüber zu diskutieren, unter welchen Bedingungen Naturgesetze eindeutig erkennbar sind.

2.5 Durchführungsvarianten

- Die Teilexperimente funktionieren am besten in starkem Sonnenlicht. (Himmel sollte ziemlich wolkenfrei sein!)
- An Tagen mit geringer Sonneneinstrahlung sollte die Lehrkraft geeignete, starke Lichtquellen einsetzen. Messungen mit einer 20 Watt Reflektor-Halogenglühlampe (Abstand ca. 10 cm zum Becher) ergaben bei einer Raumtemperatur von 21 °C nach jeweils ca. 8 Minuten: Becher offen ohne schwarzes Papier 25,3 °C, Becher geschlossen ohne schwarzes Papier: 27,3 °C und Becher geschlossen mit schwarzem Papier: 30,7 °C. Leuchtstoffröhren sind wegen ihrer flächigen Abstrahlung ungeeignet.
- Normale Glühbirnen mit 60 W weisen eine um ca. den Faktor 20 niedrigere Strahlungsleistung im Vergleich zum Sonnenlicht auf. Wenn dann noch der Abstand einen halben Meter zur Lichtquelle beträgt, müssen die Schülerinnen und Schüler sehr präzise messen, um die Temperatureffekte des jeweiligen Experiments überhaupt qualitativ zu erfassen. Außerdem dauert es länger (bis ca. 30 Minuten) je Experiment, bis sich das Temperaturgleichgewicht eingestellt hat.
- Man kann die Schülerinnen und Schüler gruppenweise einzelne Teilexperimente durchführen und dann die Ergebnisse präsentieren lassen. Dann sollten die Schülerinnen und Schüler darauf hingewiesen werden, dass sie unter möglichst gleichen Bedingungen experimentieren (Schatten, Zugluft, gleiche Versuchsdauer usw.).
- Oder man lässt die Schülerinnen und Schüler nacheinander die verschiedenen Teilexperimente durchführen. Wichtig ist auch hier wieder der Hinweis auf gleiche Bedingungen!

3 Ergänzende Informationen zum Experiment

Zur Vorbereitung bzw. zur Vertiefung dieses Experiments finden Sie ergänzende Medien auf dem Medienportal der Siemens Stiftung:
https://medienportal.siemens-stiftung.org

4 Hinweise zur Durchführung der Teilexperimente

4.1 Räumlichkeiten

Für die Teilexperimente ist direktes, helles Sonnenlicht (egal ob Sommer oder Winter) zu empfehlen. Es kann entweder im Freien experimentiert werden (die Schülerinnen und Schüler sollten dann trotzdem im Klassenraum die Experimente vorbereiten, damit das Material zur Hand ist!) oder in Räumen, wo die Sonne gut einfällt (Fensterbrett oder Tische am Fenster).

© Siemens Stiftung 2015. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

4.2 Zeitbedarf

	Vorbereitung	Messung	Auswertung	Besprechung
Vorbereitung	5 min	5 min	Zusammen 10 min	Kann in der Folgestunde erfolgen, evtl. stellen einzelne Schüler ihre Ergebnisse als Referat vor.
Teilexperiment 1	5 min	5 min		
Teilexperiment 2	5 min	5 min		
Teilexperiment 3	5 min	5 min		
Teilexperiment 4	5 min	10 min		

Bei Kunstlicht dauern die einzelnen Messungen jeweils ca. 15 Minuten.

4.3 Sicherheitsaspekte

Die Versuche dürfen nur bei Anwesenheit und unter Aufsicht der Lehrkraft durchgeführt werden. Die Schülerinnen und Schüler sind darauf hinzuweisen, dass die bereitgestellten Materialien nur entsprechend den jeweiligen Anweisungen eingesetzt werden dürfen.

4.4 Geräte und Materialien

Vorab zu besorgen bzw. vorzubereiten:

- Falls kein direktes starkes Sonnenlicht vorhanden ist, eine starke fokussierende Lichtquelle, z. B. eine Leuchte mit Halogenspiegellampe mit mindestens 20 Watt.
- Evtl. ein Lineal, um die Entfernung zur Lampe zu messen.
- Uhr

Mitgeliefert:
Die mitgelieferten Geräte bzw. Materialien reichen für paralleles Experimentieren von **acht** Schülergruppen.
Für **eine** Schülergruppe werden folgende Materialien aus dem Kasten benötigt:

Material	Anzahl
Alufolie, Rolle*	1x
Becher aus Kunststoff (klar), 500 ml	1x
Bierdeckel	1x
Digitalthermometer**	1x
Nagel (Stahl, „Eisen“)	1x
Papier, schwarz, DIN A4*	1x für die ganze Klasse
Reagenzglasklammer aus Holz	1x
Schere	1x

*Das einmal zugeschnittene schwarze Papier und die zugeschnittene Alufolie sollten aufgehoben werden. Sie können für das Experiment immer wieder verwendet werden.
**Vor dem ersten Gebrauch die Plastikhülle abziehen. Zum Einschalten des Thermometers die Taste „on/off“ drücken. Nach dem Experimentieren das Thermometer wieder ausschalten („on/off“ erneut drücken). Durch Drücken der Taste „°C/°F“ kann zwischen der Celsius- und der Fahrenheit-Temperaturskala umgeschaltet werden.

© Siemens Stiftung 2015. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

Abb. 2: Mitgelieferte Geräte bzw. Materialien für eine Schülergruppe.

4.5 Aufräumen, Entsorgen, Recyceln

Alle Geräte und fast alle Materialien aus dem Kasten sind wiederverwendbar. Daher sollten sie nach Beendigung des jeweiligen Experiments wieder in die entsprechende Box im Kasten zurückgelegt werden. So stellen Sie sicher, dass Sie bzw. Ihre Kolleginnen und Kollegen beim nächsten Einsatz alles schnell wiederfinden.
Geräte, die beim Experimentieren verschmutzt wurden, wie z. B. Becher, Schalen, Löffel, Reagenzgläser, sollten vor dem Zurücklegen in den Kasten erst gereinigt werden. Sinnvollerweise lässt man dies die Schülerinnen und Schüler gleich nach Beendigung des Experiments erledigen. Stellen Sie zudem sicher, dass die Geräte wieder für den nächsten Einsatz betriebsbereit sind. Beispielsweise sind benutzte Akkus gleich aufzuladen (Auch bei längerer Nichtbenutzung ist das Aufladen der Akkus sinnvoll.).
Materialien, die nicht wiederverwendbar sind, wie z. B. gebrauchte pH-Meßstäbchen oder Filterpapier, sollten fachgerecht entsorgt werden.
Die Entsorgung der in diesem Experiment anfallenden Abfälle kann über den normalen Hausmüll bzw. den Ausguss erfolgen.

© Siemens Stiftung 2015. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international