

Wissenschaft in die Schulen – Zusatzinformationen für Lehrer

Thema: Konvektion als universelles Phänomen

Autor: Dr. Oliver Schwarz, Universität Koblenz-Landau

In praktisch allen ausgedehnten Gas- oder Flüssigkeitsmassen, die unter dem Einfluss der Schwerkraft stehen, kann man Konvektionsprozesse beobachten. Die mögliche Themenspanne für die Erörterung dieses physikalischen Phänomens im Schulunterricht ist dementsprechend groß und umfasst neben dem Wärmeaustausch in der Erdatmosphäre (und damit dem irdischen Klima) und dem Wärmetransport auf der Sonne auch solche Fragen wie Aufwindkraftwerke, das Segelfliegen, die effektive Heizung eines Gebäudes ... Das Thema Konvektion ist also ganz hervorragend für den fachübergreifenden Unterricht geeignet, in dem dann als besonders spektakuläres Beispiel die Sonne und ihre Fotosphäre diskutiert werden können.

Unter den Energietransportphänomenen in der irdischen Gashölle kann die Wärmeleitung vernachlässigt werden. Wer schon einmal in der Nähe einer intensiven Wärmequelle war, dem ist bekannt, dass die Energieübertragung durch Wärmestrahlen in der Atmosphäre mit Sicherheit nicht zu vernachlässigen ist. Bei der Konvektion wird die Energieübertragung durch Massentransport bewirkt, indem die Wärme in Form innerer Energie der bewegten Luft zwischengespeichert wird. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit der Luft ist, desto mehr Energie kann pro Zeiteinheit verbraucht werden. Aus dieser Überlegung folgt, dass die Konvektion offenbar ein effektives Mittel des Energietransportes ist – allerdings natürlich nur dann, wenn die Konvektion im konkreten Fall auch einsetzt. Mithilfe eines einfachen Experimentes kann im Schulunterricht gezeigt werden, dass die Konvektion in der Nähe der Erdoberfläche recht schnell anläuft und dass sie viel Energie übertragen kann.

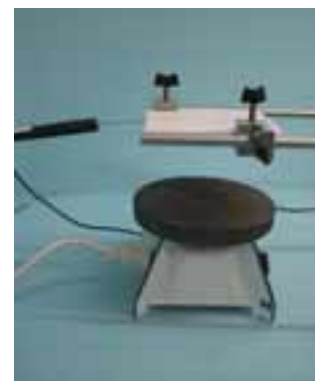
Konvektion und Wärmestrahlung im Schulexperiment

Um die Konvektion mit der Wärmestrahlung vergleichen zu können, benötigen wir ein Experiment, mit dem man die Konvektion „an- und ausschalten“ kann. Da die Konvektion immer entgegen der Schwerkraftrichtung erfolgt, kann man sie unterbinden, indem man den Versuchsaufbau einmal mit und einmal entgegen der Schwerkraftrichtung orientiert.

Versuchsgeräte: Geschwärzte Metallplatte als Absorberkörper, digitales Thermometer mit Temperaturfühler, Herdplatte mit regulierbarer Temperatur, Stativmaterial.

Versuchsaufbau

und Durchführung: Die nebenstehende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau. Man wähle einen relativ kleinen Abstand zwischen Heizplatte und Absorber. Zunächst erfasst man die Energieübertragung durch Konvektion und Strahlung. Dazu stellt man die Heizplatte auf eine mittlere Wärmestufe und beobachtet die Temperaturerhöhung im Absorber über eine Zeit von ca. 5 Minuten hinweg. Anschließend lässt man den Versuchsaufbau abkühlen und dreht ihn um 180°. Der Absorber ist jetzt unten, die Heizplatte strahlt von oben. Man untersucht erneut den zeitlichen Verlauf der Temperaturerhöhung im Absorber. Dieser ist allerdings nur noch durch die Wärmestrahlung bedingt.

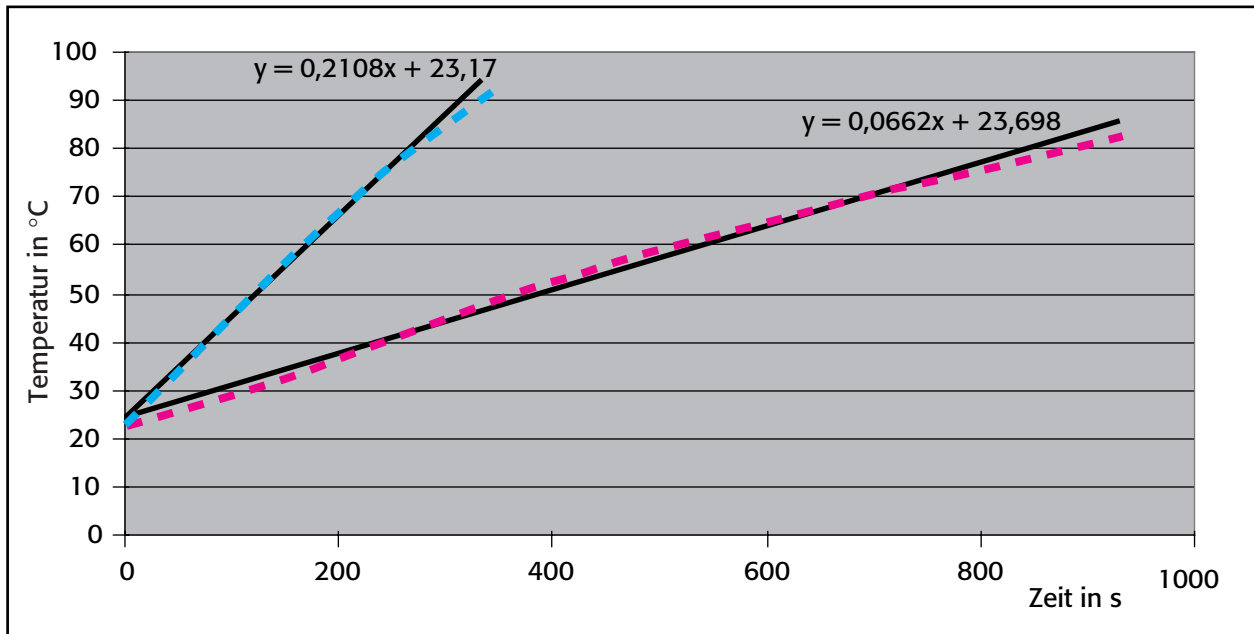


[1]

Wie bei allen Strahlungsmessungen treten Effekte höherer Ordnung auf, d.h. der Absorber strahlt zur Heizplatte zurück. Bei kurzer Versuchsdauer kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

Resultat:

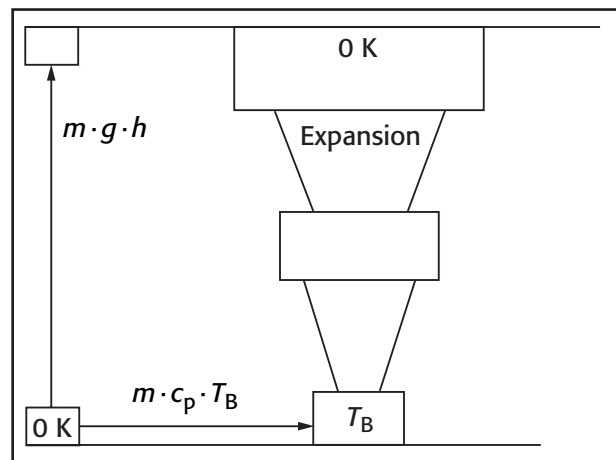
Die unten stehende Abbildung zeigt die gemessenen Temperatur-Zeit-Funktionen. Offenbar kann die Konvektion unter den gewählten Versuchsbedingungen deutlich mehr Wärme als die Wärmestrahlung übertragen. Wiederholt man den Versuch mit verschiedenen Heizstufen an der Kochplatte, dann erkennt man: Egal wie viel Wärme die Heizplatte abgibt, die Konvektion kann diese Wärme anscheinend stets „problemlos“ abtransportieren. Dies ist möglich, indem sich die Konvektionsgeschwindigkeit erhöht.



[2]

Der theoretische Zugang zur Konvektion durch ein einfaches Modell

Eine relativ einfache Überlegung auf der Grundlage des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik ermöglicht einen theoretischen Zugang zur Konvektion für Schüler höherer Klassenstufen. Die nebenstehende Abbildung zeigt eine Schichtung idealen Gases, in der die Temperatur vom Boden (T_B) bis auf den Wert 0 K in der Höhe h absinkt. Ferner betrachtet man ein kleines Gaselement der Temperatur 0 K und der Masse m , welches vom Boden der Atmosphäre an ihre obere Grenze gebracht werden soll. Zwei Wege stehen hierfür zur Auswahl: Einerseits kann man an dem Gaselement direkt die notwendige Hubarbeit $m \cdot g \cdot h$ verrichten. Andererseits kann man durch Zuführung der Wärme $m \cdot c_p \cdot T_B$ (bei am Boden konstantem Druck!) die Temperatur des Gaselementes zunächst auf die Temperatur T_B bringen und ihm anschließend einen unendlich kleinen „Anschub“ nach oben erteilen.



[3]

Das Gaselement wird dann ganz langsam aufsteigen, sich ausdehnen (also Volumenarbeit verrichten) und dabei seine innere Energie verringern. Wenn die dabei sinkende Temperatur des Elements stets genau so groß wie die der Umgebung ist, erfolgt kein Wärmeaustausch – die betrachtete Atmosphäre verhält sich adiabatisch. Die unendlich klein gedachte Anfangsgeschwindigkeit des Gaselements bleibt ihm dabei erhalten. Es gelangt – quasi durch eigene Konvektion – bis an die obere Grenze der Atmosphäre. Ausgangs- und Endzustand des Gases sind gleich. Aus energetischer Sicht müssen beide Wege des Gaselementes nach oben identisch sein. Also gilt:

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot c_p \cdot T_B$$

Durch Umformung erhält man:

$$\frac{\Delta T}{\Delta h} = \frac{T_B}{h} = \frac{g}{c_p}$$

Die letzte Gleichung lässt sich beispielsweise verwenden, um die maximale Höhe abzuschätzen, bis zu der in Planetenatmosphären Konvektion auftreten kann. Für die Erdatmosphäre ($c_p = 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $T_B = 293 \text{ K}$) erhält man: $h = 30 \text{ km}$.

So einfach unser gewähltes Modell auch erscheinen mag, es spiegelt ziemlich gut die exakten Verhältnisse in den unteren Schichten der Troposphäre der Erde wieder.

Der Zahlenwert g/c_p beträgt $1 \text{ K}/100 \text{ m}$ oder $0,1 \text{ K}/10 \text{ m}$ oder $0,01 \text{ K}/1 \text{ m}$. Ist der tatsächliche Temperaturunterschied größer als diese Größe, dann wird ein aufsteigendes Luftpaket in Gasschichten kommen, die kälter als es selbst sind. Demzufolge wird seine Dichte kleiner als die der Umgebung sein und es wird durch den Auftrieb weiter nach oben strömen. Da aber eine Temperaturschwankung größer als $0,01 \text{ K}/\text{m}$ auf der Erde praktisch immer vorkommen kann, setzt die Konvektion in unserer Atmosphäre meist ziemlich schnell ein.

Halten wir fest: Unser einfaches adiabatisches Modell der Konvektion stellt einen Grenzfall dar, bei dem die Konvektion praktisch mit unendlich langsamer Geschwindigkeit abläuft.

Konvektion auf der Sonne

Betrachten wir nun die Verhältnisse in der Nähe der Sonnenoberfläche:

Die Temperatur im Sonnenzentrum beträgt 10^7 K , die Oberflächentemperatur ist gegenüber diesem Wert zu vernachlässigen. Der Sonnenradius ist $7 \cdot 10^8 \text{ m}$. Daraus folgt, dass die mittlere Temperaturabnahme in unserem Zentralgestirn mit einem Zahlenwert von

$$\frac{T}{R} = 0,017 \frac{\text{K}}{\text{m}},$$

also etwa 2 Hundertstel Kelvin je Meter, erfolgt. Für die Fotosphäre und unmittelbar darunter liegende Schichten der Sonne können wir näherungsweise von folgenden Zahlenwerten ausgehen:

$c_p = 40\,000 \text{ K}/(\text{J} \cdot \text{kg})$ (völlionisierter Wasserstoff), $g = 270 \text{ m}/\text{s}^2$. Aus diesen Werten folgt:

$$\frac{g}{c_p} = 0,007 \frac{\text{K}}{\text{m}}.$$

Wie man sieht, ist die mittlere Temperaturabnahme in der Sonne noch deutlich größer als die Temperaturabnahme, die in der Nähe der Fotosphäre eigentlich notwendig wäre, damit gerade Konvektion einsetzen kann. Diese Überlegung macht es sehr wahrscheinlich, dass in der Nähe der Sonnenoberfläche Konvektion stattfindet. Es ist bemerkenswert, dass man mit einer relativ elementaren Überlegung die Existenz von Konvektionsströmungen auf der Sonne fast „vorhersagen“ kann.

Wissenschaft in die Schulen - Bildquellen

[1]: Eigenes Bild

[2]: Eigene Messung

[3]: Eigene Zeichnung