

# Warum ist die Luft oben kälter?

Eine weit verbreitete Ansicht begründet es so: Im Kontakt mit der Erde erwärmt diese die aufliegende, unterste Luftschicht; diese erwärmt die darüber liegende, diese die darüber liegende und so weiter - und so nimmt eben die Temperatur nach oben ab. Wenn auch scheinbar durchaus naheliegend - diese Erklärung ist nicht richtig.

Eine andere, die allgemein anerkannte und übliche Erklärung sagt, dass Luft, wenn sie höher und dadurch unter **weniger Druck** kommt - weil immer weniger Luft von oben drückt -, sich durch die "**Adiabatische Expansion**" (Ausdehnung ohne Wärmeaustausch) abkühlt. Aber darunter lässt sich nicht leicht etwas Anschauliches vorstellen. Und eine diesbezügliche Rechnung ist nicht einfach. Es gibt aber eine einfachere Erklärung für die Temperaturabnahme - und siehe da: es ergibt sich damit das **ganz genau Selbe** wie mit der "Adiabatischen Expansion". Diese Erklärung ist sehr viel einfacher und direkter - zudem brauche es dafür den oben erwähnten Druck **nicht**. Ja, man so weit gehen zu sagen: Die Temperaturabnahme mit dem abnehmenden Luftdruck zu erklären, ist ein **ganz und gar unnötiger Umweg** - und verstellt den Blick fürs Wesentliche.

Also warum ist es oben kälter? Vorab und kurz gesagt: Der Grund ist **die irdische Schwerkraft**. Aus demselben Grund, warum ein nach oben geworfener Stein auf dem Weg nach oben wegen der Erdanziehung immer langsamer wird (und zum Stillstand kommt, bevor er wieder nach unten fällt), aus demselben, einfachen Grund wird es oben kälter. Und so wie beim Stein die Geschwindigkeitsabnahme mit steigender Höhe auszurechnen ist, ebenso - fast genauso einfach - lässt sich die Temperaturabnahme der Luft herleiten. Und dies geschieht nun im Folgenden (*um das zu verstehen, sind keine besonderen Kenntnisse nötig*):

Was ist denn eigentlich Wärme bei Luft? Warme Luft unterscheidet sich dadurch von kälterer, dass die Luftmoleküle sich - völlig ungeordnet - mehr bewegen: **eben das ist Wärme!** Und während der geworfene Stein beim Nach-oben-Steigen Bewegungsenergie (kinetische Energie) verliert, indem er sichtbar langsamer wird, verlieren die Luftmoleküle beim Nach-oben-Steigen gleichfalls Bewegungsenergie, indem sie auch langsamer und damit fühl- und messbar kälter werden. **Die Bewegungsenergie der Luftmoleküle drückt sich in deren Temperatur aus!** Und nun stellt sich zunächst die Frage: *Wie schnell sind sie, welche kinetische Energie haben denn die Luftmoleküle hier unten - bei zum Beispiel 15 Grad?*

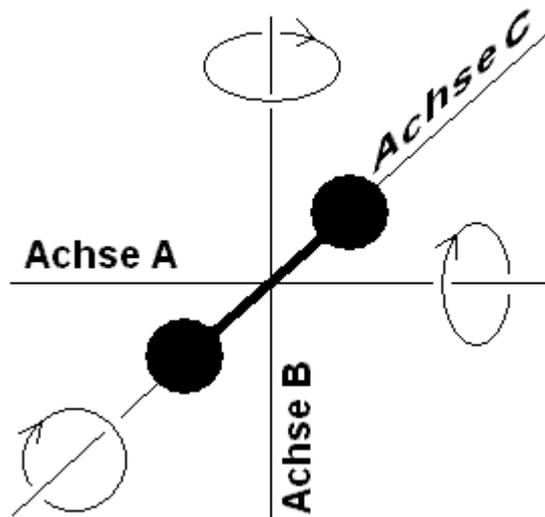
Allgemein ist die kinetische Energie eines bewegten Objekts

## **1/2 mal Masse mal Geschwindigkeit im Quadrat**

wobei hier Masse die des Luftmoleküls ist (die Erdanziehung macht aus der Masse das Gewicht). Und wie groß ist nun die Geschwindigkeit des Luftmoleküls? Hier lässt sich nun - **und dies ist die einzige Komplikation!** - nicht einfach nur **eine Zahl** angeben. Denn die Bewegung und damit Bewegungsenergie der Luftmoleküle ist nämlich auf **drei plus zwei** Geschwindigkeits-Komponenten (Bestandteile) aufgeteilt. Und eben über diese Geschwindigkeits-Komponenten kommt man recht einfach - wie nun folgt - zur Gesamt-Bewegungsenergie.

**Wegen ihrer Wärme** flitzen die Luftmoleküle wild umher in alle Richtungen und stoßen ständig gegen andere - pro Sekunde viele Billionen Mal. Beim Stoß prallen sie voneinander ab und ändern dabei dauernd Geschwindigkeit und Richtung. Dieser wirren Bewegung ließe sich eine - bezüglich ihrer Bewegungsenergie - mittlere Geschwindigkeit zuordnen. Wird zudem nach Geschwindigkeitsrichtungen unterschieden, so lässt sich diese mittlere Geschwindigkeit **vollständig** auf **drei** Komponenten mit **zueinander rechtwinklig angeordneten** Richtungen aufteilen: zum Beispiel auf-ab, vor-zurück, links-rechts. *Warum rechtwinklig zueinander?:* mit der Kombination so aufgeteilter Kompo-

nennten lassen sich einerseits **alle Raumrichtungen** erfassen; andererseits haben **so aufgeteilte** Geschwindigkeits-Komponenten **je ihre eigene Energie** - und so lassen sich deren Einzelenergien einfach addieren. Und wie groß ist nun eine (von diesen dreien) in **eine Richtung** weisende Komponente? Es ist eben jene Geschwindigkeit, mit der die Luftmoleküle im Mittel in **diese eine** Richtung vorankommen - sie kommen zwar gar nicht weit, da sie gegen andere stoßen, aber jene kommen weiter, und so fort. Und so kann - wie bei einem Stafettenlauf - von Stoß zu Stoß, von Molekül zu Molekül etwas weitergegeben werden. Dieses "etwas" ist **der Schall**. Dies heißt also: Die (energiemäßig) mittlere Geschwindigkeit in **eine** Richtung ist gerade gleich der **Schallgeschwindigkeit!** Und die ist bekannt: 340,3 Meter pro Sekunde **bei 15 Grad** (*wenn kälter, dann weniger*). Für die beiden anderen Richtungen gilt dasselbe, und somit hat also ein Luftmolekül für **jede dieser drei** Geschwindigkeits-Komponenten **bei 15 Grad** eine mittlere Bewegungsenergie von  **$1/2 \cdot \text{Masse} \cdot (340,3\text{m/s})^2$** .



Nun zu jenen oben erwähnten zwei weiteren Geschwindigkeits-Komponenten, in der auch noch Bewegungsenergie (also Wärme) steckt. Moleküle bestehen aus Atomen, und Luftmoleküle fast gänzlich aus zwei, je gleichartigen Atomen, die miteinander verbunden sind - wie eine kleine Hantel (siehe Bild). Durch die ständigen Stöße, wobei die beiden Atome meist **ungleichmäßig** getroffen werden, bekommen die Luftmoleküle nicht nur einen Stoß in eine Richtung, sondern - eben durch den ungleichmäßigen Stoß - auch noch eine Drehung (Rotation). Und deshalb flitzen sie nicht nur schnell davon, sondern drehen sich noch dabei - **ebenso schnell** kreisen beide Atome umeinander. Auch

Drehbewegungen lassen sich in Bestandteile aufteilen, und zwar bezüglich der **Richtung** ihrer Drehachse (z.B. Achse A, B, C) in drei **senkrecht** zueinander stehende Komponenten mit **je eigener Rotationsenergie**. Da fast alle Luftmoleküle aus zwei Atomen bestehen, ergeben sich bei dieser Aufteilung nur **zwei** Drehrichtungen, bei der die beiden Atome **mit jener energiemäßig mittleren Geschwindigkeit umeinander kreisen**. Um die dritte Dreh-Achse, und zwar längs der "Hantel"-Achse C, gibt es - offensichtlich - kein Umeinander-Kreisen und somit auch keine diesbezügliche Rotationsenergie.

Und so hat mit diesen beiden Komponenten und den drei oben erwähnten das Luftmolekül schließlich fünfmal von jener Energie (*es heißt: Wärme hat bei Luft fünf "Freiheitsgrade"*). Also: **Die gesamte Bewegungsenergie der Luftmoleküle hier unten bei 15 Grad ist somit**

**fünfmal  $1/2 \cdot \text{Masse} \cdot (340,3\text{m/s})^2$**

Mit dieser Energie flitzen die Luftmoleküle umher und eben auch nach oben und verlieren so beim Bewegen gegen die Erdanziehung an Bewegungsenergie, werden langsamer - wie der nach oben geworfene Stein. Zwar gelangt das einzelne Luftmolekül so kaum ganz nach oben, weil es ständig gegen andere stößt. Aber da die Stoß-Energie von einem Luftmolekül zum anderen weitergegeben wird, tritt somit das eine an die Stelle des anderen - bis oben hin. Und obwohl beim Nach-oben-Flitzen bis zum nächsten Stoß zunächst nur die eine der fünf Bewegungen - die nach oben gerichtete - wegen der Erdanziehung abnimmt, findet durch die ständigen gegenseitigen Stöße immer wieder ein Ausgleich statt; und so nehmen alle fünf ab beim Weg nach oben.

Auf welche Höhe würden die Luftmoleküle so - im Mittel und theoretisch - nach oben gelangen, bevor sie ihre gesamte Bewegungsenergie (thermische Energie, Wärme) verloren hätten? Es wird

dabei wie beim Stein Bewegungsenergie unten in Lageenergie (potentielle Energie) oben umgesetzt. Die Lageenergie ist

**Gewicht · Höhe**

wobei das Gewicht wiederum sich ergibt aus

**Masse · Erdanziehungsfaktor**

Da die Lageenergie oben von der Bewegungsenergie (Wärme) unten herrührt, lassen sich die beiden Energien gleichsetzen, also

$$\text{Lageenergie oben} \quad \text{ergibt sich aus} \quad \text{Bewegungsenergie (Wärme) unten}$$
$$\text{Masse} \cdot \text{Erdanziehungsfaktor} \cdot \text{Höhe} = 5 \cdot 1/2 \cdot \text{Masse} \cdot (340,3\text{m/s})^2$$

Die Höhe, bei der - im Mittel und theoretisch - alle Bewegungsenergie (thermische Energie, also Wärme) so aufgebraucht wäre und dann ganz in der Lageenergie steckte, erhält man mit dem Umstellen der Gleichung, nämlich mit dem Teilen beider Seiten durch Masse und den Erdanziehungsfaktor (genannt Erdbeschleunigung  $g = 9,81\text{m/s}^2$ ). Somit

$$\text{Höhe} = 5/2 \cdot 340,3^2 / 9,81 \text{ Meter,}$$

ergibt eine Höhe von 29512 Meter. Da hätte die Luft (theoretisch, wenn nichts "stören" würde!) also eine Temperatur von absolut Null = minus 273 Grad, das heißt keine Wärme, keine thermische Energie mehr. Die Temperatur nähme demnach von unten bis 29512 Meter Höhe um 288 Grad ab - von plus 15 Grad auf minus 273 Grad. Wenn man diese 29512 Meter nun aufteilt auf die 288 Grad (die absolute Temperatur  $T_0$  für 15 Grad Celsius am Boden), so erhält man

### **102,5 Meter pro Grad**

$$\frac{dh}{-dT} = \frac{5}{2} \cdot \frac{v_{\text{Erkoll}}^2}{g \cdot T_0}$$

Und das war tatsächlich schon die ganze Rechnerei - so einfach; alle 102,5 Meter nähme demnach die Temperatur um ein Grad ab. (Alles zusammengefasst in der Formel darunter.)

Jedoch dieser beschriebene Vorgang der Temperaturabnahme ist "Störungen" unterworfen. Und den Einfluss solcher Störungen zeigt die so genannte "Standardatmosphäre", die besagt nämlich, tatsächlich misst man - durchschnittlich - 154 Meter pro Grad. Das heißt die Temperatur der Lufthülle nimmt normalerweise nach oben etwas weniger stark ab (*sie ist mehr oder weniger "stabil geschichtet"*). Der Grund dafür ist vor allem wetterbedingt, wie zum Beispiel Sonneneinstrahlung oder Einfließen von anders temperierten Luftmassen. Eingeflossene wärmere (und damit leichtere) Luft legt sich eher oben hin, eingeflossene kältere (schwerere) eher unten - **beides** mindert so die Temperaturabnahme nach oben. (Und deshalb und auch wegen anderer Störungen reicht die Lufthülle in Wirklichkeit höher als jene theoretischen 29512 Meter.)

Also einfach indem sie gegen die Erdanziehung anrennen, verlieren die Luftmoleküle pro 102,5 Meter so viel an Bewegungsenergie (das heißt Wärme!), dass sie dadurch jeweils ein Grad kälter werden. Und dies ist der **unmittelbare** Grund dafür, dass es nach oben kälter wird. Und das Wettergeschehen mindert diese Temperaturabnahme etwas.

Wie schon gesagt, wenn gemäß der üblichen Erklärung, die "Adiabatischen Expansion", gerechnet wird, kommt man zum **genau selben Ergebnis**. Aber jene Rechnung ist nicht einfach zu verstehen.