

# Übungen zur Wärmelehre – Lösungen Serie 3

## 1. Erwärmung im Mikroskopischen

Die Kochplatte ist ein Festkörper. Das bedeutet, die Atome, aus denen sie besteht, befinden sich in einer Art dreidimensionalem Gitter auf fest vorgegebenen Plätzen und bilden so gemeinsam die starre Struktur der Platte. Deren Temperatur ist ein Mass dafür, wie heftig die Atome auf ihren Gitterplätzen am hin und her schwingen resp. am zittern sind. Je heisser die Platte, desto heftiger sind diese Schwingbewegungen.

Stelle ich die anfangs kühle Pfanne auf die Kochplatte, so kommen die heftig zitternden Atome der Platte in Kontakt mit den ruhigeren Atomen der Pfanne. In der Folge übergeben die Plattenatome im statistischen Mittel Schwingungsenergie an die Atome der Pfanne, die dadurch auch immer heftiger zu zittern beginnen. Die Temperatur der Pfanne steigt. Diese Weitergabe der Schwingungsenergie findet auch innerhalb des Pfannenmaterials statt. Die ganze Pfanne wird heiss.

Schliesslich ist die Innenseite der Pfanne in Kontakt mit den Wassermolekülen. Dort findet in ähnlicher Weise eine Weitergabe der Energie statt. Ein Wassermolekül erhält von einem schwingenden Wandatom der Pfanne einen Stoss und übernimmt so kinetische Energie von diesem. Auf diese Weise gibt die Pfanne Wärme ans Wasser ab, die sich dann auch innerhalb des Wassers aufgrund von Stössen zwischen den Molekülen und durch Wärmeströmungen verteilt.

## 2. Kondensieren und Erstarren in der mikroskopischen Vorstellung

Wird einem Gas Wärme resp. innere Energie entzogen, so bewegen sich die Gasmoleküle im Schnitt immer langsamer. Die kinetische Energie nimmt ab. Zwischen den Gasteilchen gibt es nicht allzu starke, aber eben doch vorhandene, anziehende Kräfte. Werden die Moleküle aufgrund der Abkühlung nun immer langsamer, so kommt plötzlich der Moment, wo sie nicht mehr genügend schnell sind um der gegenseitigen Anziehung zu entkommen. D.h., die Teilchen klumpen zusammen, in der Regel nicht starr, sondern relativ zueinander beweglich, aber eben doch so, dass sie nicht mehr losgelöst voneinander unterwegs sind. Das ist das Kondensieren des Gases zur Flüssigkeit.

Dass dabei Energie freigesetzt wird, muss so sein, denn wenn zwei sich anziehende Objekte näher zueinander rücken, dann entspricht dies einer Verringerung ihrer gemeinsamen potentiellen Energie. Diese potentielle Energie wird beim Kondensieren frei. Das ist vergleichbar mit der Energiefreisetzung, wenn ein Gegenstand auf den Boden fällt. Beim Fallen nähern sich die beiden sich anziehenden Objekte (Gegenstand und Erde) an und die potentielle Energie des Systems wird geringer.

In der Flüssigkeit sind die Teilchen nahe aneinander, aber relativ zueinander immer noch frei beweglich. Sie besitzen noch hinreichend viel kinetische Energie, sodass stärkere anziehende Kräfte zwischen ihnen unterdrückt bleiben. Entziehen wir der Flüssigkeit weiter Wärme, so kommt der Moment, an dem sich die Teilchen diesen Kraftwirkungen nicht mehr entziehen können. Sie beginnen sich starr zueinander zu positionieren resp. sich fix aneinander zu binden. Diese Fixierung entspricht makroskopisch dem Erstarren des Stoffs. Mikroskopisch wird erneut potentielle Energie ( $\approx$  Energie der relativen Lage der Teilchen) abgegeben. Auch beim Erstarren muss der Stoff somit Energiefreisetzen resp. sie muss ihm entzogen werden, damit das Erstarren passiert.

## 3. Aussagen der Maxwell-Boltzmann-Verteilung

(a) Aus der Anwendung erfahren wir, dass die mittlere Teilchengeschwindigkeit bei  $20^\circ\text{C}$  (= Zimmertemperatur)  $\bar{v} \approx 470.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  beträgt.

Die Hälfte davon ist  $235.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Diesen Wert erreichen wir bei gerade etwa  $\vartheta = -200^\circ\text{C}$ .

Umgekehrt ergibt sich der doppelte Wert, also  $941.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ungefähr bei  $\vartheta = 900^\circ\text{C}$ .

- (b) Im Skript erfahren wir auf den Seiten 31f, dass die Fläche unter dem Graphen der Maxwell-Boltzmann-Verteilung stets  $1 = 100\%$  beträgt. Sie steht für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen einen beliebigen Geschwindigkeitswert von 0 bis  $\infty \frac{\text{m}}{\text{s}}$  aufweist. Diese Wahrscheinlichkeit wird 1 sein, denn jedes Teilchen hat ja irgendeinen Geschwindigkeitswert.

Bei der Absenkung der absoluten Temperatur verschieben sich  $\bar{v}$  und  $v_{\text{max}}$  nach links, also zu niedrigeren Geschwindigkeitswerten. Die sichtbare Wölbung der Kurve wird dadurch schmaler. Soll dabei die Fläche gleich bleiben, so muss der Bauch dafür vertikal grösser werden – die niedrigen Geschwindigkeiten werden immer häufiger resp. wahrscheinlicher.

Nun soll aber die Wölbung bei jeder beliebigen Temperatureinstellung im GeoGebra-Fenster immer gut sichtbar bleiben, egal wie hoch sie hinaufgeht. Deshalb wird bei Absenkung der Temperatur die vertikale Skala zusammengestaucht, sodass immer grössere Werte sichtbar bleiben. Die Fläche unter dem Graphen bleibt dabei immer gleich 1.

#### 4. Kühlung durch Schwitzen und Saunaphysik

- (a) In einer Flüssigkeit bewegen sich die einzelnen Teilchen mehr oder weniger schnell. Wir können eine mittlere Teilchengeschwindigkeit  $\bar{v}$  festlegen. Es sind aber prinzipiell verschiedenste Geschwindigkeiten möglich. Manchmal bewegt sich ein Teilchen fast gar nicht, manchmal kann es eine sehr grosse Geschwindigkeit haben, also im Moment gerade viel kinetische Energie tragen. Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung gilt nicht nur für Gase, sondern auch für Flüssigkeiten. Befindet sich ein sehr schnelles Teilchen per Zufall gerade an der Oberfläche der Flüssigkeit und hat es die passende Bewegungsrichtung, so kann es die anziehenden zwischenmolekularen Kräfte zwischen Flüssigkeitsteilchen überwinden und die Flüssigkeit alleine verlassen.

Solche Übergänge passieren fortlaufend, was zur Folge hat, dass die Luft über einer Flüssigkeit eine relativ hohe Konzentration an ehemaligen Flüssigkeitsteilchen aufweist. Es kommt auch vor, dass ein solches Teilchen wieder den Weg zurück in die Flüssigkeit findet – per Zufall fliegt es halt wieder in die Flüssigkeit hinein. An der freien Luft werden aber die meisten Teilchen den Nahbereich der Flüssigkeit nach einer gewissen Zeit verlassen haben. Vergleicht man die Anzahl der Ein- und Austritte in die Flüssigkeit, so stellt man fest: Insgesamt verlassen mehr Teilchen die Flüssigkeit, als dass Teilchen in sie zurückkehren. Die makroskopisch beobachtbare Folge ist, dass die Flüssigkeit verdunstet.

Beim Schwitzen sondert unser Körper Schweiß (= Flüssigkeit) ab, der auf der Haut liegt und dort verdunstet. Dabei verlassen, wie gerade überlegt, immer nur die schnellsten Moleküle den Schweißstropfen. D.h., es gehen nur solche Teilchen in die Luft über, welche gerade über eine weit über dem Durchschnittswert liegende kinetische Energie verfügen. Insgesamt verliert die Flüssigkeit somit an mittlerer innerer Energie pro Teilchen, d.h., sie wird kälter.

Der so gekühlte Schweißstropfen ist in thermischem Kontakt mit dem menschlichen Körper. Er berührt ja dessen Oberfläche. In der Folge gibt der Körper aufgrund des Temperaturunterschieds Wärme an den verbleibenden Schweiß ab. Schwitzen ist also ein Kühlmechanismus!

- (b) In einem abgeschlossenen Behälter wird Flüssigkeit nicht beliebig lange weiter verdunsten, denn es stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein: Im Mittel treten pro Zeitabschnitt gleich viele Teilchen in die Flüssigkeit ein, wie sie verlassen. Auch bei hoher Luftfeuchtigkeit ist dieses Gleichgewicht vorhanden und Objekte trocknen schlecht oder überhaupt nicht – ein Ärgernis für den Hausmann und die Hausfrau: In feuchten Kellern trocknet die Wäsche miserabel.

In der Sauna herrscht ebenfalls eine hohe Luftfeuchtigkeit – man macht ja extra Aufgüsse zu deren Erhöhung. D.h., in der Saunaluft schwirren bereits sehr viele Wassermoleküle herum. Das Verdunsten von Schweiß funktioniert nur, wenn mehr Wassermoleküle den Schweiß verlassen, als dass von der Luft in ihn zurückfinden. Genau diese Voraussetzung ist in der Sauna nicht mehr gegeben, und so sammelt sich der von der Haut produzierte Schweiß eben in Form von Flüssigkeitsperlen – gut sichtbare, grosse Schweißstropfen – auf ihr an.