

3 Temperatur & Wärme

Inhalt

3.1 Einleitung	47
3.2 Was ist vorher zu tun?	48
3.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren	48
3.3.1 Temperatur vs. Wärme	48
3.3.2 Wie misst man Temperaturen?	49
3.3.3 Wie misst man Wärmeenergie?	50
3.3.4 Wärmekapazität	51
3.3.5 Phasenübergänge und latente Wärmen	52
3.3.6 Thermische Ausdehnung	53
3.3.7 Wirkungsgrad	54
3.4 Rechenaufgaben	55
3.5 Kontrollfragen	55
3.6 Experimentelle Aufgaben	55
3.6.1 Thermische Längenänderung	55
3.6.2 Wärmeleitung	56
3.6.3 Wirkungsgrad	56
3.6.4 Spezifische Wärmekapazität eines Festkörpers	57
3.6.5 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser	58
3.6.6 Wärmekamera	59
3.7 Wie geht es weiter?	59
3.8 Hinweise zur Auswertung	59
3.8.1 Thermische Längenänderung	59
3.8.2 Wärmeleitung	59
3.8.3 Spezifische Wärmekapazität eines Festkörpers	60
3.8.4 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser	60
3.8.5 Wirkungsgrad	61

3.1 Einleitung

Diesmal geht es um **Thermodynamik** – ein Teilgebiet der Physik, in dem es vor allem um Wärme geht. Hinter der Thermodynamik steckt eine raffinierte Theorie, die es nur mit Mitteln der Statistik möglich macht, sehr allgemeine Aussagen über große Systeme zu treffen, ohne viel über die Einzelteile zu wissen, z.B. dass Kühlschränke nicht ohne Energieversorgung funktionieren oder dass die Unordnung im Universum insgesamt immer zunimmt. Über diese Theorie werden Sie an dieser Stelle nicht viel lernen;

stattdessen beschäftigen wir uns gezielt mit Phänomenen und Konzepten, die auch für Biologen und Chemiker relevant sind: mit der **thermischen Längenänderung**, der **spezifischen Wärmekapazität**, der (riesigen!) **spezifischen Verdampfungswärme** von Wasser, der **Wärmeleitung** und dem **Wirkungsgrad**. Es gibt viel zu messen!

3.2 Was ist vorher zu tun?

- Lesen Sie das **Skript** zu diesem Versuchstag, also die folgenden Seiten.
- Sorgen Sie dafür, dass Sie den **Theorieteil** verstanden haben! Falls Ihnen Grundlagen fehlen, ist es in Ihrer Verantwortung, diese aufzuarbeiten. Gute Lehrmaterialien zu diesen Themen findet man problemlos im Internet.
- Fertigen Sie **Messwerttabellen** an (im Team), achten Sie dabei auf das korrekte Format und lassen Sie ggf. Details (Einheiten) zunächst frei.
- Lösen Sie die **Rechenaufgaben** (im Team). Sie werden am Versuchstag kontrolliert.
- Schauen Sie sich die **Kontrollfragen** an! In der Vorbesprechung müssen Sie in der Lage sein, sie zu beantworten, sonst dürfen Sie nicht am Praktikum teilnehmen und müssen den Versuchstag nachholen.

3.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren

3.3.1 Temperatur vs. Wärme

Was ist Wärme? In der Physik ist die **Wärme** Q nichts anderes als Energie, genauer gesagt: **Bewegungsenergie**, die zufällig auf viele Körper verteilt ist. In jedem Stoff um uns herum sind die Bestandteile ständig dabei, mit unglaublicher Geschwindigkeit durch den Raum zu schießen, aufeinanderzuprallen, zu rotieren und gegeneinander zu schwingen. In all diesen Bewegungen ist Energie gespeichert, und in der Summe ist das die Wärmeenergie, die in diesem Stoff steckt.

Die Moleküle der uns umgebenden Luft haben z.B. eine **mittlere Geschwindigkeit** von ca. 1500 km/h; die Werte für Flüssigkeiten liegen auch (ganz grob) in dieser Größenordnung. Die gesamte Wärmeenergie in der Luft ist also im Prinzip genau so groß wie die Energie, die man bräuchte, um die gesamte Luft auf Schallgeschwindigkeit in die gleiche Richtung zu beschleunigen – aber das wäre natürlich eine völlig andere Situation.

Stellen Sie sich zwei frisch gebrühte Tassen Kaffee vor: Die Teilchen in dem einen System „Kaffeetasse“ haben die gleiche Wärmeenergie wie die im anderen. Das Gesamtsystem aus zwei Kaffeetassen muss also doppelt so viel Wärmeenergie enthalten wie eine der Tassen. Wärmeenergie ist an die Stoffmenge gekoppelt: Doppelter Kaffee, doppelte Wärme. Größen, für die ein solcher Zusammenhang gilt, heißen **extensiv**.

Aber wie ist es mit der **Temperatur** des Kaffees? Wir haben aus unserem Alltag ein intuitives Verständnis von Temperatur, aber wie würden wir den



Abbildung 3.1: Zwei frisch gebrühte Tassen Kaffee, in jeder Hinsicht identisch.

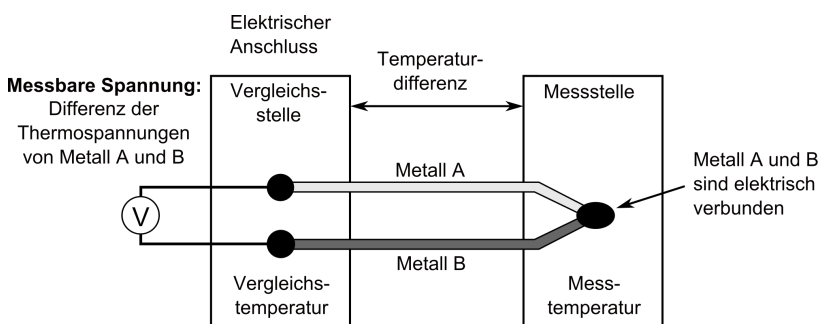
Begriff definieren, ohne Worte wie „warm“ und „kalt“ zu verwenden? Das ist nicht ganz leicht, aber einige Dinge können wir sofort festhalten:

1. Eine frische Tasse Kaffee hat eine Temperatur von etwa 80 °C. Wenn eine zweite Tasse Kaffee hinzukommt, steigt die Temperatur nicht etwa auf 160 °C – sie bleibt gleich. Temperatur ist also nicht an die Stoffmenge gekoppelt: Doppelter Kaffee, gleiche Temperatur. Solche Größen nennt man *intensiv*.
2. Mehr Wärme führt zu einer höheren Temperatur.
3. Wir wissen, dass zwei Stoffe die gleiche Temperatur haben, wenn zwischen Ihnen insgesamt keine Wärme ausgetauscht wird. Ein frischer Kaffee kühlt sich ab, bis er Raumtemperatur hat – dann bleibt er bei dieser Temperatur, bis ihn jemand trinkt.

3.3.2 Wie misst man Temperaturen?

Gas- und Flüssigkeitsthermometer nutzen aus, dass sich Stoffe mit zunehmender Temperatur ausdehnen. Nach demselben Prinzip arbeiten **Bimetall-Thermometer**: zwei Streifen von Materialien unterschiedlicher thermischer Längenänderung werden fest miteinander verbunden. Je nach Temperatur krümmt sich diese Anordnung mehr oder weniger stark, vgl. Abb. 3.2.

Ein Messprinzip, das im Laboralltag oft und gerne verwendet wird, ist das **Thermoelement** (Abb. 3.3). Es besteht aus zwei Drähten unterschiedlicher Metalle, meistens Chrom und Nickel. Diese Anordnung funktioniert im Temperaturbereich von -90 bis 1370 °C.



Die freibeweglichen Elektronen in diesen Metallen haben bei Raumtemperatur mittlere Geschwindigkeiten von ca. tausend Kilometern *pro Sekunde*. An der Grenzfläche zwischen den beiden Metallen kann es daher passieren, dass Elektronen in das jeweils andere Metall übertreten. Allerdings ist die »Bilanz« nicht ausgeglichen: Aus dem Metall mit der kleineren Austrittsenergie bewegen sich mehr Elektronen zu dem mit der größeren Austrittsenergie als umgekehrt.

Dieser Effekt, der von der Temperatur abhängt, macht sich in einer messbaren Spannung bemerkbar. Aber wie misst man diese Spannung? Dazu muss man die Metalldrähte A und B an irgendeinem Punkt mit dem (Kupfer-)Anschlusskabel eines Voltmeters verbinden, und hier tritt der gleiche Effekt mit umgekehrtem Vorzeichen auf. Man kann daher immer nur



Abbildung 3.2: Funktionsweise eines **Bimetalls**. Der Wärmeausdehnungskoeffizient α (siehe 3.3.6) ist in diesem Beispiel beim hellen Material größer.

Abbildung 3.3: Schematische Messschaltung mit einem Thermoelement.

Temperaturdifferenzen messen, was meistens ausreicht. Als Vergleichstemperatur dient oft einfach die Raumtemperatur im Labor.

Bei **Widerstandsthermometern** wird ausgenutzt, dass sich der elektrische Widerstand mit der Temperatur ändert: Bei *Kaltleitern* (wie z.B. Metallen) wächst der Widerstand mit der Temperatur (PTC-Widerstand, *positive thermal coefficient*), bei *Heißleitern* (wie z.B. Halbleitern) sinkt er mit der Temperatur (NTC-Widerstand). Die häufigste Anwendung finden hier Platin-Widerstandsthermometer (»Pt-100«), die im Temperaturbereich von -200 bis 850 °C verwendet werden können.

Im Gegensatz zu den bisher skizzierten Verfahren, die den Kontakt mit dem zu messenden Körper voraussetzen, ist die Hauptaufgabe der **Strahlungsthermometrie** das berührungslose Erfassen der Temperatur. Dazu nutzt man aus, dass jeder Körper, dessen Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes liegt, Energie in Form elektromagnetischer Strahlung abstrahlt. Dabei hat die ausgesandte Strahlung als Funktion der Wellenlänge ein Maximum, dessen Lage von der Temperatur des Strahlers abhängt, und zwar verschiebt sich mit steigender Temperatur das Maximum der Ausstrahlung zu kürzeren Wellenlängen hin. Zwischen der Temperatur T und der Wellenlänge des Strahlungsmaximums λ_{max} besteht folgende Beziehung (Wiensches Verschiebungsgesetz):

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \mu\text{mK} \quad (3.1)$$

Ab ca. 650 °C sind bereits Anteile im sichtbaren Bereich vorhanden – ein Körper mit dieser Temperatur *glüht*. Beispiele für die Position des Strahlungsmaximums finden sich in der folgenden Tabelle 3.2.

Körper	Temperatur	λ_{max} [μm]
Sonne	ca. 5800 K	ca. 0,5
Eisen, hell glühend	1700 K \approx 1400 °C	1,7
Eisen, dunkelrot glühend	900 K \approx 600 °C	3,3
Wasserdampf	373 K = 100 °C	7,8
Körpertemperatur	310 K = 37 °C	9,3
Gefrierpunkt	273 K = 0 °C	10,6
Tiefkühlkost	253 K = -20 °C	11,5

3.3.3 Wie misst man Wärmeenergie?

Es ist nicht so einfach, Energie direkt zu messen. Dafür müsste man sie der Probe entziehen können, und es liegt in der Natur der Energie, dass sie das nicht mit sich machen lässt. Glücklicherweise liegt es auch in der Natur der Energie, dass ihr absoluter Wert nicht wichtig ist,¹ sondern nur die Differenz zu anderen Energien, z.B. zwischen zwei Zuständen (vorher/nachher).

Energie kann nicht erschaffen oder vernichtet werden.² Das heißt, dass die Energie in einem nach außen abgeschlossenen System konstant ist – sie kann lediglich intern »umgewidmet« werden, aber die Summe bleibt

Kaltleiter	Heißleiter
hohe Temperatur → großer Widerstand	hohe Temperatur → kleiner Widerstand
<i>positive thermal coefficient</i> (PTC)	<i>negative thermal coefficient</i> (NTC)
z.B. alle Metalle	z.B. alle reinen Halbleiter

Tabelle 3.1: Synonyme Bezeichnungen für die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes.

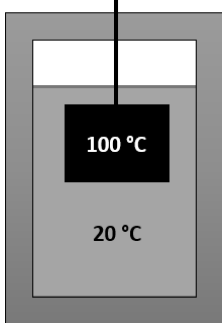
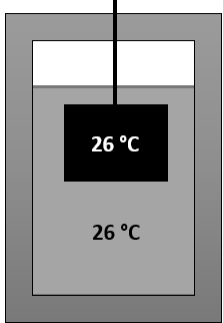
Tabelle 3.2: Wellenlänge des Strahlungsmaximums bei verschiedenen Temperaturen.

¹ In modernen physikalischen Theorien wie z.B. der Allgemeinen Relativitätstheorie stimmt das nicht mehr – dort spielt auch die absolute Energiedichte eine zentrale Rolle. In der klassischen Physik ist Energie aber einfach das *Wegintegral* über die Kraft (Schulphysik: »Kraft mal Weg«) und als solches nur bis auf eine frei wählbare Konstante bestimmt; der absolute Wert ist daher im Prinzip nicht wichtig.

² Das Prinzip der Energieerhaltung folgt übrigens aus der Prämisse, dass physikalische Gesetze zu allen Zeiten gleich sein sollten. Es gibt noch mehr solche *kontinuierliche Symmetrien*, und zu jeder gehört eine Erhaltungsgröße: Die Homogenität des Raumes liefert die Impulserhaltung, die Isotropie des Raumes die Drehimpulserhaltung, und spezielle Systeme können weitere Erhaltungsgrößen haben – das ist die Aussage des *Noether-Theorems*, welches 1918 von EMMY NOETHER bewiesen wurde.

die gleiche. Ein solches System, das keine Wärmeenergie mit der Umgebung austauscht, heißt **adiabatisch**, und ein realer Gegenstand mit diesen Eigenschaften wäre z.B. eine Thermoskanne.

Kalorimeter (oder englisch: *Dewar*-Gefäße) sind im Prinzip Thermobehälter für professionelle Anwendungen. Sie haben eine sehr gute thermische Isolierung und eine sehr geringe eigene Wärmekapazität, sodass sie eine Minimierung des Energieaustauschs nach außen ermöglichen. Wenn in einem solchen Gefäß z.B. ein Transfer von Wärmeenergie stattfindet, kann man anschließend eine Bilanz aufstellen: Wo auch immer die Energie nun hingeflossen ist, *in der Summe* muss sie gleichgeblieben sein!

	vorher	nachher
		
Wärmeenergie im Metallklotz	Q_M	$Q_M - c_1 \cdot (100^\circ\text{C} - 26^\circ\text{C})$
Wärmeenergie im Wasser	Q_W	$Q_W + c_2 \cdot (26^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$

Wenn man einen heißen Metallklotz in ein Wasserbad hängt, erwärmt sich das Wasser und der Metallklotz kühlt sich ab, bis beide die gleiche Temperatur haben, siehe Tabelle 3.3. Dabei sind c_1 und c_2 irgendwelche Konstanten.³ Um die Energiebilanz aufzustellen, setzt man nun voraus, dass während des Vorgangs keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht wurde, und schreibt:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{vorher}} &= Q_{\text{nachher}} \\
 Q_M + Q_W &= [Q_M - c_1 \cdot (100^\circ\text{C} - 26^\circ\text{C})] \\
 &\quad + [Q_W + c_2 \cdot (26^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})] \\
 c_1 \cdot (100^\circ\text{C} - 26^\circ\text{C}) &= c_2 \cdot (26^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})
 \end{aligned}$$

Die letzte Gleichung kann man auch so verstehen: Die Wärme, die aus dem Metallklotz gekommen ist, steckt nun im erwärmten Wasser. Wenn wir noch mehr über die Konstanten c_i erfahren haben, können wir auf diese Weise indirekt bestimmen, wie viel Wärmeenergie in welchen Teilen des Systems ist.

3.3.4 Wärmekapazität

Wie viel Wärmeenergie ΔQ muss man einem Körper zuführen, um eine bestimmte Temperaturänderung ΔT zu erreichen? Dieses Verhältnis heißt

Tabelle 3.3: Verteilung der Wärmeenergie vor und nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes.

³ Hoffentlich! Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass zwischen Wärme und Temperatur ein linearer Zusammenhang besteht. Für viele Materialien stimmt das in guter Näherung; mehr dazu im nächsten Abschnitt.

Material	c [kJ/kg·K]
Wasser (20 °C)	4,18
Ethanol	2,43
Luft	1,01
Aluminium	0,90
Eisen	0,45

Tabelle 3.4: Spezifische Wärmekapazität einiger Stoffe.

(absolute) **Wärmekapazität:**

$$K = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad [K] = \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (3.2)$$

Ein großer Körper wird mehr Energie brauchen, um erwärmt zu werden, als ein kleiner. Die Wärmekapazität ist also eine *extensive* Größe. Es ist sinnvoll, zusätzlich eine *intensive* Größe zu definieren, die **spezifische Wärmekapazität:**

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta T \cdot m} \quad [c] = \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \quad (3.3)$$

Die spezifische Wärmekapazität ist eine Materialeigenschaft, aber sie ist nur innerhalb gewisser Grenzen konstant. Tabelle 3.4 zeigt einige Werte von gebräuchlichen Materialien.

ANWENDUNG

Wasser hat unter allen bei Raumtemperatur festen und flüssigen Stoffen die **höchste Wärmekapazität**. Das ist bemerkenswert, denn unser Planet ist zufällig recht üppig mit Wasser ausgestattet. Die Bedeutung dieses riesigen Wärmepuffers für das Klima und die Entstehung von Leben ist enorm.

3.3.5 Phasenübergänge und latente Wärmen

Zwischen Molekülen gibt es **Anziehungskräfte**.⁴ Dadurch ist es für die Moleküle »günstiger«, sich nah beieinander aufzuhalten (wie in Feststoffen und Flüssigkeiten); sie sind dann in einem energetisch niedrigeren Zustand. Will man diese Bindung wieder aufbrechen, muss man die einst frei gewordene Energie wieder zuführen. Darum kostet Schmelzen und Verdampfen Energie – und zwar gar nicht wenig, wie die folgende Abbildung zeigt:

⁴ ...und bei kleinen Abständen auch abstoßende Kräfte – sonst würde alle Materie einfach ineinander kollabieren.

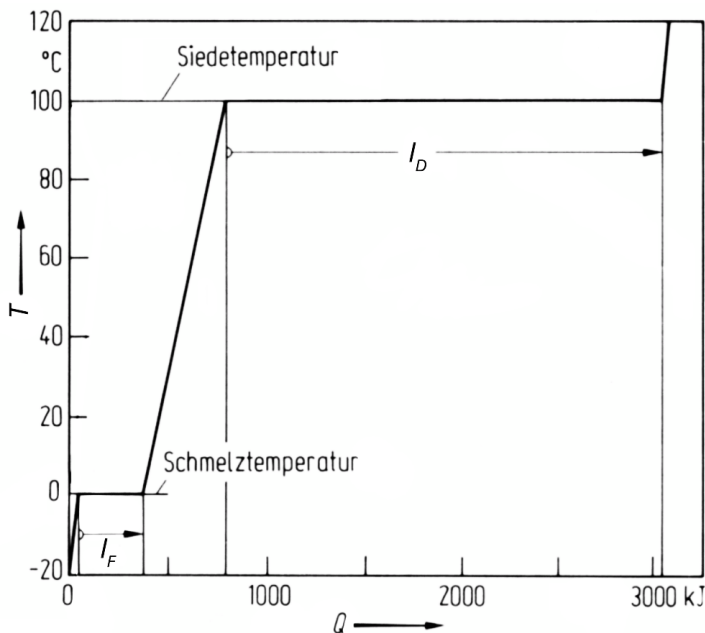


Abbildung 3.4: 1 kg Eis wird kontinuierlich erhitzt, dabei verändert sich die Temperatur T in Abhängigkeit von der zugeführten Wärme Q .

Die Energie, die benötigt wird, um 1 kg Wasser, welches schon Siedetemperatur hat, in Dampf zu verwandeln, heißt **spezifische Verdampfungswär-**

me l_D . Die spezifische Verdampfungswärme von Wasser ist außergewöhnlich groß: Obwohl Wasser auch eine große spezifische Wärmekapazität hat, ist die Verdampfungswärme fast 7-mal so groß wie die Wärme, die benötigt wird, um Wasser von Raumtemperatur zum Sieden zu bringen. Analog für den Übergang von Eis zu Wasser: Die Energie, die benötigt wird, um 1 kg Eis mit $T = 0\text{ °C}$ zu schmelzen, heißt **spezifische Schmelzwärme** l_F . Diese beiden Größen nennt man auch **latente Wärmen**, weil die Energie im Aggregatzustand »verborgen« ist.

Wenn das Wasser Schmelz- oder Siedetemperatur erreicht, liegt es in zwei Aggregatzuständen gleichzeitig vor, bis die nötige Schmelz- bzw. Verdampfungswärme zugeführt wurde. Die Temperatur ändert sich dann nicht, obwohl Wärmeenergie zugeführt wird.

ANWENDUNG

Natürlich ist die Sache mit den **Phasenübergängen** nicht ganz so einfach wie in Abb. 3.4 dargestellt. Der (Partial-)Druck in der Umgebung spielt eine große Rolle, und Wasser kann schließlich auch verdunsten, ohne dass es vorher kocht! Durch geschicktes Ausnutzen dieser Effekte kann man über den Aggregatzustand Energie dahin transportieren, wo man sie haben möchte, z.B. »Hauptsache weg«. So funktioniert die Temperaturregulation unseres Körpers: Schweiß verdunstet im Wind und kühlt dabei die darunterliegende Haut. Kühlschränke funktionieren ähnlich, aber die Kühlflüssigkeit befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf (siehe Abb. 3.5).

Wasser ist auch bei den latenten Wärmen der unangefochtene Spitzenreiter: Von allen bei Raumtemperatur festen oder flüssigen Stoffen hat es die größte spezifische Schmelz- und Verdampfungswärme. Wäre dem nicht so, würden Gewässer, Gletscher, die Polkappen etc. sehr viel empfindlicher auf Temperaturänderungen reagieren.

3.3.6 Thermische Ausdehnung

Stoffe dehnen sich – meistens – aus, wenn ihre Temperatur steigt. Je höher die Temperatur, desto mehr Wärmeenergie, d.h. desto mehr Bewegungsenergie hat jedes Molekül. Welchen Abstand die Moleküle zueinander wählen, hängt in Flüssigkeiten und Feststoffen von den anziehenden und abstoßenden Kräften zwischen den Molekülen und von der Stärke der molekularen Bewegungen ab. Es ist also nicht überraschend, dass der Abstand sich bei insgesamt größerer Aktivität etwas vergrößert.

Wenn die Temperaturänderung nicht zu groß ist, ist die Ausdehnung annähernd linear.⁵ Man kann z.B. für die Änderung einer Länge schreiben:

$$l(T) = l(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (3.4)$$

Dabei ist $l(T_0)$ die Anfangslänge für eine Anfangstemperatur T_0 , und α ist der **Längenausdehnungskoeffizient**. Eine ähnliche Beziehung kann man auch für Volumina finden:

$$V(T) = V(T_0) \cdot [1 + \gamma \cdot (T - T_0)] \quad (3.5)$$

Der Koeffizient ist dann ein anderer, nämlich der **Volumenausdehnungskoeffizient** γ . Wenn man mit Gleichung 3.4 einen Würfel mit Kantenlänge

Latente Wärmen von Wasser:

$$l_D = 2257 \text{ kJ/kg}$$

$$l_F = 333,5 \text{ kJ/kg}$$

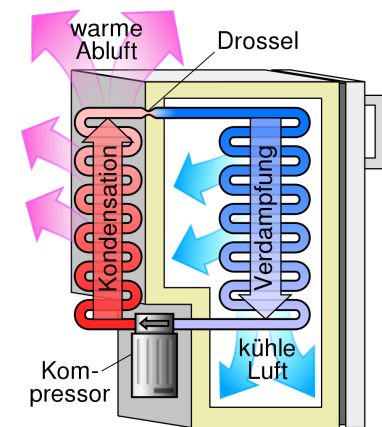


Abbildung 3.5: Kreislauf im Kompressorkühlschrank:

Flüssig, sehr kalt, geringer Druck.

Das Kühlmittel siedet im Verdampfer.

Gasförmig, kühl, geringer Druck.

Der Kompressor verdichtet das Gas.

Gasförmig, heiß, hoher Druck.

Im Verflüssiger gibt das Gas seine Energie an die Umgebung ab.

Flüssig, warm, hoher Druck.

Die Drossel reduziert den Druck.

⁵ Das ist überhaupt nichts Besonderes. Jede Funktion kann **linearisiert** werden (man bestimmt die Tangente, wobei deren Steigung einfach die Ableitung ist), und für kleine Änderungen in der Variable stimmt die Funktion gut mit der linearen Näherung überein. Das ist die zentrale Aussage der Differentialrechnung und der Grund, warum es scheinbar so viele lineare Zusammenhänge in der Physik und der Welt allgemein gibt. Nehmen Sie doch mal ihren grafischen Taschenrechner, plotten Sie eine beliebige »weiche« Funktion und zoomen Sie ganz nah an einen Punkt heran. Was sehen Sie? – eine Gerade. Das Ganze geht übrigens auch mit mehrdimensionalen Funktionen und geometrischen Körpern: Die Erde ist rund, aber aus der Nähe betrachtet ist Norddeutschland in guter Näherung eine Ebene.

l ausrechnet, aus dem Ergebnis alle Terme mit $[(T - T_0)]^2$ und $[(T - T_0)]^3$ streicht – denn wenn die Temperaturänderung klein ist, und das war die Voraussetzung, dann sind diese Terme noch kleiner – erkennt man, wie die Koeffizienten zusammenhängen:

$$\gamma = 3\alpha. \quad (3.6)$$

Es bleibt der geneigten Leserin überlassen, die Formel und den passenden griechischen Buchstaben für Änderungen von Flächen zu erraten.

ANWENDUNG

Wieder verdient Wasser eine lobende Erwähnung. Wasser hat seine höchste Dichte, also seine geringste Ausdehnung bekanntlich bei 4 °C. Damit das möglich ist, muss der Ausdehnungskoeffizient für Temperaturen unter 4 °C negativ werden! Die weitreichenden Konsequenzen dieser **Dichteanomalie** sollten hinlänglich bekannt sein: Gewässer frieren an der Oberfläche zu, die Temperatur am Grund von Gewässern ist konstant, daher kann überhaupt erst Leben entstehen, etc. pp. Man sollte wohl wirklich aufhören, sich über den ständigen Regen zu beschweren und sich stattdessen der wundervollen physikalischen Eigenschaften dieser besten aller Flüssigkeiten erfreuen.

Eisenbahnräder wurden früher auf die Antriebswellen und Achsen **aufgeschumpft**: Dabei wird das Rad erhitzt, wodurch es dank der thermischen Ausdehnung über die Welle passt, und dann abgekühlt. Dieses Verfahren hatte den Nachteil, dass bei einer Bremsung die Räder überhitzen konnten und sich dann (zumindest in Teilen) ablösten. Heute werden die Wellen einfach eingepresst.

3.3.7 Wirkungsgrad

Es gibt verschiedene Arten von Energie: Wärmeenergie, mechanische Energie, elektrische Energie, chemische Energie, ... Viele von diesen *makroskopisch* sehr unterschiedlichen Energieformen haben *mikroskopisch* die gleiche physikalische Grundlage. Dennoch gilt im Allgemeinen: Bei der Umwandlung von einer Energieform in die andere treten Verluste auf. Die Energie kann natürlich nicht vernichtet werden, aber sie verteilt sich meistens als Wärmeenergie in die Umgebung und ist dann nicht mehr nutzbar.

Der Wirkungsgrad η ist definiert als das Verhältnis zwischen nutzbarer und aufgewendeter Energie – wieviel kommt an von dem, was reingesteckt wird?

$$\eta = \frac{E_{\text{nutzbar}}}{E_{\text{aufgewendet}}} \quad (3.7)$$

Der Wirkungsgrad ist also *per definitionem* eine dimensionslose Zahl zwischen 0 und 1. Ein Wert > 1 würde ein sog. *Perpetuum Mobile 1. Art* bedeuten; eine Maschine, die Energie »aus dem Nichts« erschafft. Das würde aber gegen das Prinzip der Energieerhaltung verstoßen.

	η [%]
Kernkraftwerk	33
Solarzelle	5-27
Kohlekraftwerk	25-50
Brennstoffzelle	20-60
Fahrraddynamo	20-65
Glühlampe	3-5
LED	25-40
Gasherd	30-40
Elektroherd	50-60
Lagerfeuer	<15
Wasserkocher	bis zu 98
Photosynthese	35
Biolumineszenz	bis zu 95
Muskulatur	0-30

Tabelle 3.5: Beispielhafte Wirkungsgrade. Welche Energieformen am Eingang und am Ausgang des jeweiligen Prozesses stehen, sollte sich aus dem Kontext erschließen.

3.4 Rechenaufgaben

1. Wieviel Energie braucht man, um 1 kg Eis von 0 °C auf 100 °C zu erhitzen? Wieviel ist es, wenn man Schmelzwasser (ebenfalls 0 °C) dafür nimmt? Der benutzte Gaskocher hat bei Windstille einen Wirkungsgrad von $\eta = 0,5$. Nehmen Sie an, dass die Wärmekapazität von Wasser konstant bei $c_w = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ liegt.
2. Tim ist Biologiestudent und koffeinsüchtig. Leider ist das Bimetall in seinem Wasserkocher schon älter und schaltet den Wasserkocher nicht mehr zuverlässig ab. Eines Tages setzt Tim Leitungswasser ($T = 20 \text{ °C}$) für Kaffee auf und verlässt die Küche, um sich weiter in ein spannendes Physik-Skript zu vertiefen. Das Wasser kocht nach 5 min. Später kommt Tim in die Küche – alles ist voller Dampf, der Wasserkocher leer und kurz vorm Überhitzen! Wie lange war Tim mindestens weg?
3. Ein Kohlekraftwerk hat einen Wirkungsgrad von $\eta_1 = 0,7$. Tims Wasserkocher hat einen Wirkungsgrad von $\eta_2 = 0,9$. Wie groß ist der Wirkungsgrad für das gesamte System »ab Kohle«?

Der Wasserkocher wird sicherlich irgendeine Leistung $P = \frac{Q}{t}$ haben. Welche, sollte unerheblich sein, sonst wäre der Wert in der Aufgabe gegeben.

3.5 Kontrollfragen

- Wie ist die spezifische Wärmekapazität definiert und welche Einheit hat sie?
- Ist die Dichte eine intensive oder eine extensive Größe?

3.6 Experimentelle Aufgaben

3.6.1 Thermische Längenänderung

Metall dehnt sich bei hohen Temperaturen aus. Dieser Effekt ist mit dem bloßen Auge nicht erkennbar, aber mit einer hochempfindlichen Messuhr lässt er sich messen. In diesem Versuch benutzen Sie ein Badthermostat, um ein dünnes Metallrohr zu temperieren, und messen die Änderung seiner Länge.

Geräte: Thermostat, Einspannvorrichtung mit Messuhr, Metallrohr, Messstab

Gemessene Größen: Längenänderung $\Delta l(T)$.

Varierte Größen: Temperatur T in 20°C-Schritten bis ca. 80 °C.

Gegebene Größen: Länge des Metallstabs $l = 600 \text{ mm}$.

Durchführung:

- Es gibt zwei Aufbauten mit verschiedenen Materialien. Wählen Sie einen davon; die Werte für das zweite Material können Sie von Ihren Kommilitoninnen übernehmen.
- Vergewissern Sie sich, dass der Thermostat richtig angeschlossen ist. Das sollte von der technischen Assistenz gemacht worden sein.

Achtung! Falls der Alarm des Thermostaten losgeht und nicht klar ist, worin das Problem besteht, sofort den Stecker ziehen, dann Hilfe holen!

- Stellen Sie den Thermostaten auf eine Temperatur unter Raumtemperatur. Dann heizt er nicht.
- Während der Thermostat Wasser durch das Rohr pumpt, gleicht sich die Temperatur an. Sobald sie sich nicht mehr ändert, stellen Sie die Skala der Messuhr auf die Nullstellung. Lesen Sie die Temperatur am Thermometer ab (nicht am Thermostat) – das ist der erste Messpunkt. Nun stellen Sie eine um etwa 20 °C höhere Temperatur ein und wiederholen den letzten Schritt, bis 80 °C erreicht sind.

3.6.2 Wärmeleitung

Ein Ende eines Kupferrohres steht in flüssigem Stickstoff, das andere wird elektrisch beheizt. Dazwischen nimmt die Temperatur verschiedene Werte an. Dieser Verlauf soll gemessen und dargestellt werden, und die dafür benutzten Temperatursonden (Pt-100) sollen im Vorfeld selbst kalibriert werden.

Geräte: Temperatursensor, Multimeter, Isoliergefäße, Kälte- und Wärmequelle, Metallstab mit Messbohrungen.

Gemessene Größen: Widerstand des Pt-100 an der n -ten Messbohrung R_n , Widerstand für drei bekannte Temperaturen $R(T_i)$.

Varierte Größen: Ort der Messung – Messbohrung Nr. n (ings. 46).

Gegebene Größen: Abstand zwischen zwei Messpunkten $d = 2$ cm, Temperatur von ...

... siedendem Stickstoff: $T_1 = -195,8^\circ\text{C}$

... Eiswasser: $T_2 = 0^\circ\text{C}$

... siedendem Wasser: $T_3 = 100^\circ\text{C}$

Kalibrierung: Die Temperatursonden vom Typ Pt-100 haben einen Widerstand, der sich (in guter Näherung) linear mit der Temperatur verändert. Um sie zu kalibrieren, braucht man mindestens zwei Messungen mit bekannter Temperatur. Messen Sie daher den Widerstand **in Eiswasser und in kochendem Wasser**.

Durchführung: Messen Sie den Widerstand der Pt-100 direkt mit einem **Multimeter** (die Messgenauigkeit des Multimeters ist unerheblich). Im kalten Teil des Aufbaus sind die Messsonden fest verbaut, weil sie festfrieren; im warmen Teil muss ein Sensor umgesteckt werden. Dafür ist eine komfortable **Stecktafel** vorhanden.

3.6.3 Wirkungsgrad

Wie viel von der elektrischen Energie, die man in eine Herdplatte steckt, kommt in dem Wasser an, das man auf ihr kocht? Dieses Verhältnis ist der Wirkungsgrad η . Er soll hier mit einem handelsüblichen »Powermeter« für die Steckdose gemessen werden. Messen Sie entweder mit oder ohne Deckel und erfragen Sie die verbleibenden Messwerte bei einem anderen Team.

Tipp: Bei diesem Versuch bringen Sie Wasser zum Kochen, welches Sie für den Versuch 3.6.4 direkt weiterverwenden können.

Geräte: Kochplatte, Topf mit Deckel, Powermeter, Temperatursonde PT-100, Stoppuhr.

Gemessene Größen: Masse des eingefüllten Wassers m_w , aufgenommene Leistung der Herdplatte P , Wassertemperatur vorher T_0 , Zeit bis die Wassertemperatur 40 °C beträgt t_{40} , Zeit bis zum Sieden t_{100} .

Gegebene Größen: Spezifische Wärmekapazität von Wasser $c_w = 4,182\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Durchführung:

- Befüllen Sie den Topf mit destilliertem Wasser und bestimmen Sie dessen **Masse**.
- Messen Sie die **Temperatur** des Wassers. Bereiten Sie auch die **Stoppuhr** vor.
- Schalten Sie nun die Herdplatte auf die **maximale Leistung** und starten Sie die **Zeitmessung**.
- Notieren Sie die aufgenommene **Leistung**. Kontrollieren Sie ständig die Wassertemperatur. Notieren Sie die **Zeit bis zu einer Temperatur von 40 °C** , ohne die Messung zu stoppen.⁶
- Notieren Sie auch die **Zeit bis zum Kochen** des Wassers.

3.6.4 Spezifische Wärmekapazität eines Festkörpers

In diesem Versuch soll die spezifische Wärmekapazität c eines Metalls bestimmt werden. Dazu wird gemessen, um wie viel ein heißer Metallklotz einen Becher Wasser erwärmen kann.

Geräte: Kalorimetergefäß, Thermometer, Kochgefäß, Festkörper (Metallklotz).

Gemessene Größen: Wassertemperatur vorher T_1 und nachher T_2 , Masse des eingefüllten Wassers m_w , Masse des Metallkörpers m_M .

Gegebene Größen: Temperatur von kochendem Wasser $T_k = 100\text{ °C}$, (absolute) Wärmekapazität des Kalorimeters $K_k = (90 \pm 60)\text{ J/K}$.

Durchführung:

- **Kochen Sie den Metallklotz** auf der Induktionsherdplatte, wie Sie eine Kartoffel kochen würden. Der Klotz liegt dabei auf einem gebogenen Netz. Während das Wasser kocht, können Sie schon das Kalorimeter vorbereiten:
- Stellen Sie das Kalorimeter auf die **Waage** und tarieren Sie sie. Füllen Sie das Kalorimeter nun zu etwa $2/3$ mit destilliertem Wasser und wiegen Sie das so befüllte Kalorimeter.
- Der Metallklotz sollte nun mindestens fünf Minuten im kochenden Wasser gelegen haben und dessen Temperatur angenommen haben. Er muss nun möglichst schnell vom Topf in das Kalorimeter befördert werden, **allerdings darf er auf keinen Fall in das Kalorimeter fallen!**

⁶ Dazu betätigen Sie nicht den Start-/Stop-Knopf, sondern den anderen, »Split/Reset«. Die gestoppte Zeit wird angezeigt, aber die Stoppuhr läuft im Hintergrund weiter. Ein weiterer Druck auf den selben Knopf kehrt zur aktuellen Zeitmessung zurück. Probieren Sie das am besten vorher aus!

Tipp: Es bietet sich an, zunächst Versuch 3.6.3 zu machen, bevor Sie diesen Versuch starten.



Lieber etwas langsamer, aber überlegt handeln. Tupfen Sie das am Klotz anhaftende Wasser zuvor mit einem Küchentuch kurz ab. Hängen Sie den Metallklotz mit dem Draht an den Plastikstab und legen Sie letzteren auf den Rand des Kalorimeters.

- Warten Sie einige Zeit, bis der Metallklotz das ihn umgebende Wasser erwärmt hat. Kontrollieren Sie mit dem **Thermometer**, ob die Temperatur schon konstant ist, ggf. können Sie auch vorsichtig etwas umrühren.
- Notieren Sie die **Endtemperatur**.

3.6.5 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser

Wenn Wasser kocht, verdampft es nicht plötzlich. Obwohl es schon die Siedetemperatur hat, dauert es noch sehr lange (bei steter Energiezufuhr, z.B. in einem Wasserkocher), bis das Wasser vollständig verdampft ist. Das liegt an der großen spezifischen Verdampfungswärme von Wasser.

Ein raffinierter Aufbau erzeugt Wasserdampf mit einer Temperatur von gerade 100 °C. Dieser wird in ein Kalorimeter mit Wasser geleitet und kondensiert dort. Vor allem die dabei abgegebene Kondensationswärme – die genau den gleichen Betrag hat wie die Verdampfungswärme – sorgt dafür, dass sich das Wasser im Kalorimeter erwärmt. Daraus kann man später mit einer Energiebilanz die Verdampfungswärme berechnen.

Geräte: Kalorimetergefäß, Thermometer, Kochgefäß mit Dampfrohr (Schlauch), elektrische Heizplatte.

Gemessene Größen: Wassertemperatur vorher T_1 und nachher T_2 , Masse des Wassers im Kalorimeter vorher m_1 und nachher m_2 .

Gegebene Größen: Temperatur des Dampfes $T_M = 100\text{ °C}$, (absolute) Wärmekapazität des Kalorimeters $K_K = (90 \pm 60)\text{ J/K}$.

Durchführung:

- Füllen Sie das Kalorimeter zu mindestens 2/3 mit destilliertem Wasser. Wiegen Sie das eingefüllte Wasser – ggf. müssen Sie dafür auch die Masse des leeren Kalorimeters bestimmen, weil andere Gruppen an der gleichen Waage arbeiten.
- Messen Sie die Wassertemperatur.
- Schieben Sie das Kalorimeter an das Kochgefäß und tauchen Sie das Ende des Auslassschlauches in das Wasser im Kalorimeter. Das Schlauchende muss einige Zentimeter in das Wasser eintauchen. Dieser Vorgang sollte nicht unnötig lange dauern, weil die Messung sonst verfälscht wird.
- Kontrollieren Sie die Temperatur im Kalorimeter. Bei etwa 70-80 °C können Sie abbrechen.
- Nehmen Sie den Schlauch – einigermaßen zügig – aus dem Kalorimeter, rühren Sie noch einmal vorsichtig um und messen Sie dann die Endtemperatur.

- Anschließend messen Sie noch die Masse des Wassers im Kalorimeter. Sie hat sich durch den kondensierten Wasserdampf etwas erhöht. Falls Sie die Waage tariert hatten und sie es nun nicht mehr ist, müssen Sie auch die Masse des leeren (und trockenen!) Kalorimeters bestimmen.

3.6.6 Wärmekamera

- Suchen Sie ein Lebewesen oder einen Gegenstand mit einer Temperatur zwischen -40 und 200 °C und richten Sie die Kamera darauf.
- Nehmen Sie ein oder mehrere Bilder auf und fügen Sie mindestens eins dieser Bilder später in Ihr Protokoll ein. Beschreiben Sie kurz, was in dem Bild zu sehen ist. Die Tutorin kann Ihnen die Bilddateien schicken, falls Sie keinen Speicherstick dabei haben.

3.7 Wie geht es weiter?

- Es gibt **kein Musterprotokoll**, aber Hinweise zur Auswertung, siehe nächster Abschnitt.
- Es gibt wieder eine **Checkliste** zur Selbstkontrolle. Gehen Sie diese Liste am Ende zusammen durch und unterschreiben Sie anschließend beide, dass das Protokoll den genannten Ansprüchen genügt. **Nehmen Sie diesen Schritt ernst!** Falls Ihr Ergebnis nicht vollständig und plausibel im Sinne der dort aufgeführten Punkte ist, müssen Sie zumindest die Tutorin im Vorfeld per E-Mail kontaktiert haben – andernfalls wird ein solches Protokoll *nicht* testiert.

3.8 Hinweise zur Auswertung

3.8.1 Thermische Längenänderung

Tragen Sie die relative Längenänderung Δ/l über der Temperatur auf. Die Steigung ist der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient α . Um sie zu ermitteln, machen Sie eine lineare Regression im Diagramm und lassen die Formel anzeigen. Ermitteln Sie den Fehler der Regression, wie in Abschnitt 1.7.4 beschrieben.

Finden Sie auch Literaturdaten und vergleichen Sie ihr Ergebnis. Welches Material lag wohl vor?

3.8.2 Wärmeleitung

1. Kalibrierung

Erstellen Sie ein Diagramm, in dem Sie die drei Messwerte mit bekannten Temperaturen auftragen. Machen Sie eine lineare Regression und lassen Sie sich die Gleichung darstellen. Sie brauchen eine Kalibrierfunktion in dieser Form:

$$T(R) = T_0 + a \cdot R \quad (3.8)$$

mit Konstanten T_0 und a . Welche Einheiten haben diese?

Einen **linearen Verlauf** können Sie für $T(x)$ nicht erwarten – die Wärmestrahlung des Rohres und die Konvektion der umgebenden Luft transportieren Wärme ab; die Eiskristalle, die einen Teil des Rohes bedecken, haben eine gewisse Isolationswirkung. Können Sie vielleicht sogar entsprechende Abschnitte im Verlauf erkennen?

2. Rechnen Sie nun mit der Kalibrierfunktion alle gemessenen Widerstände in Temperaturen um. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten beträgt 2 cm, sodass sie die Nummer der Messpunkte in eine Ortskoordinate x umrechnen können. Machen Sie ein Diagramm, in dem Sie T über x auftragen. Eine Fehlerrechnung ist hier nicht sinnvoll.

3.8.3 Spezifische Wärmekapazität eines Festkörpers

Stellen Sie eine Energiebilanz auf für den Zustand *vor* und *nach* dem Einbringen des Metallklotzes. Berücksichtigen Sie dabei auch die kleine, aber nicht unerhebliche Wärmekapazität des Kalorimeters:

Wärmeenergie im...	Vorher	Nachher
Metallklotz	$Q_{M,0} + m_M \cdot c_M \cdot T_M$	$= Q_{M,0} + m_M \cdot c_M \cdot T_2$
Wasser	$+Q_{W,0} + m_W \cdot c_W \cdot T_1$	$+Q_{W,0} + m_W \cdot c_W \cdot T_2$
Kalorimeter	$+Q_{K,0} + K_K \cdot T_1$	$+Q_{K,0} + K_K \cdot T_2$

Tabelle 3.6: Energiebilanz für die Abkühlung des Metallklotzes im Wasser.

Addieren Sie alle Terme eines Zustands und setzen Sie beide gleich. Stellen Sie nach c_M um.

Bei der Berechnung der Zahlenwerte hilft Ihnen die zu diesem Versuchstag bereitgestellte **Excel-Tabelle**. Dadurch entfällt auch die **Fehlerrechnung**.

3.8.4 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser

Stellen Sie wieder eine Energiebilanz auf. Im Vergleich zum vorangehenden Versuch kommt ein zusätzlicher Term ins Spiel: die Energie, die in der Gasphase des Wasserdampfes steckt. Wenn der Dampf kondensiert, verschwindet auch dieser Term – die Energie verteilt sich auf das Wasser und bewirkt eine Erhöhung der Temperatur.

	Vorher	Nachher
Verdampfungswärme	$l_D \cdot m_D$	0
Wärmeenergie im (kondensierten) Dampf	?	?
Wärmeenergie im Wasser	?	?
Wärmeenergie im Kalorimeter	?	?

Tabelle 3.7: Energiebilanz für die Abkühlung des zugeführten Dampfes im Wasser.

Setzen Sie dann beide Seiten gleich und isolieren Sie l_D .

Bei diesem Versuch können Sie mit einer ziemlich guten Genauigkeit messen! Berechnen Sie die Fehlerfortpflanzung, um sich selbst von der Qualität Ihres Ergebnisses zu überzeugen. Alle Massen können Sie als fehlerfrei annehmen. Tun Sie sich selbst einen Gefallen und nutzen Sie für die Rechnung eine Excel-Tabelle wie in 3.8.3. Nehmen Sie für c_w einen konstanten Wert an. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert.

3.8.5 Wirkungsgrad

Berechnen Sie die Energie, die das Wasser bei der jeweiligen Temperaturdifferenz aufgenommen hat, sowie die Energie, die die Herdplatte in der gegebenen Zeit aufgenommen hat. Der Quotient aus beiden ist der Wirkungsgrad. Vergleichen Sie auch mit den gegebenen Literaturdaten! Stellen Sie die Ergebnisse in einer Tabelle dar. Entscheiden Sie selbst, wie Sie den Fehler abschätzen wollen. Welche Messunsicherheiten sind bekannt, welche nicht?

