

Skript zur Vorlesung

Wärmelehre

(Wintersemester 2013/14)

Dieses Geheft enthält in kompakter, manchmal nur stichpunktartig aufzählender Form, die wesentlichen fachlichen und experimentellen Grundlagen, wie sie in der Vorlesung „Wärmelehre“ vorgestellt werden.

Es ist zum Gebrauch neben der Vorlesung gedacht und erhebt nicht den Anspruch, „in sich selbst verständlich“ oder vollständig zu sein.

S. Hilger

Inhaltsverzeichnis

1	Temperatur \oplus	4
1.1	Temperatur — eine Empfindung	4
1.2	Die Temperatur — ein physikalisches Phänomen	4
1.3	Die Temperatur — eine physikalische Größe	5
2	Ausdehnung von Körpern \oplus	6
2.1	Längenausdehnung von Festkörpern	6
2.2	Volumenänderung	9
2.3	Phänomene in Natur, Alltag und Technik	9
2.3.1	Festkörper	9
2.3.2	Flüssigkeiten	10
2.3.3	Gase	10
2.3.4	Anomalie beim Wasser	10
3	Temperaturmessung — Thermometer	12
3.1	Ausdehnung \oplus	12
3.2	Veränderung des el. Widerstands \oplus	13
3.3	Thermoelemente \ominus	14
3.4	Emission elektromagnetischer Strahlung \ominus	15
3.5	Weitere Eigenschaften	15
4	Das Ideale Gas \ominus	16
4.1	Das Gesetz von Boyle und Mariotte	17
4.2	Das Gesetz von Gay–Lussac	19
4.3	Die absolute Temperatur	20
4.4	Volumenausdehnung bei idealen Gasen	21
4.5	Die Allgemeine Gasgleichung	22
4.6	Das Gesetz von Amontons	23
4.7	Das Reale Gas	24
5	Der Energieerhaltungssatz der Wärmelehre	26
5.1	Physikalische Arbeit	26
5.2	Wärme	28
5.3	Die Innere Energie eines Körpers	29
5.4	Der Energieerhaltungssatz der Wärmelehre	30
5.5	Energieumwandlungen	31
5.5.1	... im Dampfkraftwerk	31
5.5.2	... in der Brennstoffzelle	32
5.6	Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre \ominus	33
5.7	Ein Versuch zur Bestimmung des „Wärmeäquivalents“ \ominus	34
5.8	Die Spezifische Wärmekapazität	36
5.9	Anwendung des EES: Mischung \ominus	37
5.10	Verbrennungsenergie und Heizwert	38
5.11	Der Wirkungsgrad bei Energieumwandlungen \ominus	39
5.12	Der Kühlschrank	40

6	Aggregatzustände \oplus	41
6.1	Aggregatzustandsänderungen	42
6.2	Besonderheiten beim Schmelzen und Erstarren	43
6.2.1	Lösungen	43
6.2.2	Druck	43
6.2.3	Volumenänderung	43
6.3	Besonderheiten beim Sieden und Verdampfen	44
6.3.1	Verdunsten	45
6.4	Umwandlungsenergien	46
7	Die Teilchenvorstellung \oplus	49
7.1	Alltagsphänomene zur Teilchenvorstellung	50
7.2	Die Teilchenvorstellung im Unterricht	50
7.3	Didaktische Anregungen	50
7.4	Experimente	51
7.5	Die Deutung der Aggregatzustände im Teilchenmodell	52
8	Übertragung von Wärme	54
8.1	Wärmeleitung	54
8.2	Wärmestrahlung	57
8.2.1	Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung	57
8.3	Wärmeströmung	58
8.4	Zusammenfassung	59
9	Anhang \ominus	60
9.1	Verbrennungsmotoren	60
9.1.1	Der Ottomotor	60
9.1.2	Der Dieselmotor	62
9.1.3	Der Zweitaktmotor	63

1 Temperatur \oplus

1.1 Temperatur — eine Empfindung

Hier handelt es sich um eine schwierige Frage. Wir wollen zur Klärung das Teilchenmodell zunächst außer Acht lassen.

Versuche:

- Es werden Schüsseln mit kaltem, lauwarmem und heißem Wasser aufgestellt. Tauche beide Hände zunächst in das kalte und heiße Wasser, dann beide zugleich in das lauwarmer Wasser.

Man wird feststellen, dass die Hand, die vorher in das heiße Wasser getaucht war, jetzt das lauwarmer Wasser als kühler empfindet als die andere.

- Berührt man nacheinander einen Holz- und einen Metallquader von Zimmertemperatur, so stellt man fest, dass der Metallquader als kühler empfunden.

Erklärung: Die Hautzellen nehmen Energiezufuhr bzw. -entzug wahr. Dieser hängt von der Temperatur, aber auch von der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität des Stoffes ab.

Ist Temperatur nur eine Art Sinnempfinden? Gibt es Messinstrumente?

1.2 Die Temperatur — ein physikalisches Phänomen

V „Tintenwasserthermoskop“.

Körper (allgemein: Physikalische Systeme) haben offenbar eine verborgene (primäre) Eigenschaft, die viele andere offensichtliche (sekundäre) Eigenschaften beeinflusst:

- Das Volumen (und damit Länge, Dichte, Druck, Pendelfrequenzen, Schallgeschwindigkeit),
- den el. Widerstand (und damit bei angelegter Spannung: die Stromstärke),
- äußere el. Spannungen
- den Aggregatzustand (und den Dampfdruck),
- Energieaustausch mit der Umgebung (Hautempfindung, siehe oben),
- Emission elektromagnetischer Strahlung
- Löslichkeit von Stoffen in anderen (V: Schwarzteebeutel in kaltes/heißes Wasser),
- Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen,
- Chemische Eigenschaften oder Gleichgewichte:

Bestimmte Metallsalze (thermochrome Stoffe) zeigen bei einer genau festgelegten Temperatur einen Farbumschlag. Beispiele: Thermochrompapier, Thermochromkreide, Spielzeugautos, ... ([?, S. 53]

Diese Eigenschaft heißt *Temperatur*.

1.3 Die Temperatur — eine physikalische Größe

Nullter Hauptsatz: Bringt man zwei Körper (phys. Systeme) in thermischen Kontakt, so stellt sich nach (sehr) langer Zeit die gleiche Temperatur ein.

Dieser aus der Erfahrung gewonnene Satz ist in gewisser Weise ein Axiom (nicht weiter hinterfragbare Grundaussage) der Wärmelehre.

Die Temperaturskala nach Anders Celsius (1701 – 1744). Als Eichpunkte werden die Temperaturen

- 0°C des schmelzenden Eises und
- 100°C des siedenden Wassers

(jeweils bei Normaldruck $p = 1013\text{ hPa}$) festgelegt.

Diese Eichpunkte eignen sich besonders gut, da während einer Zustandsänderung eine Wärmezufuhr oder ein Wärmeentzug nicht zu Temperaturänderungen führen (siehe später „Umwandlungswärmen“).

Die Differenz dieser beiden Temperaturen wird in diesem Zusammenhang auch Fundamentalabstand genannt. Er kann — je nach Typ des Thermoskops — als Länge, als Spannungsdifferenz oder als Widerstandsdifferenz o.a. realisiert sein.

Kalibrierung: Der Fundamentalabstand wird in 100 Teile geteilt. Jeder Teil entspricht einem Temperaturunterschied von 1°C .

Symbol: ϑ , Einheit $[\vartheta] = 1^\circ\text{C}$.

V Thermoskop: An einem mit Alkohol gefüllten Glasröhrchen können seitlich Markierungen angebracht werden. Es wird einmal in Eiswasser und dann in siedendes Wasser eingetaucht. Der „Fundamentalabstand“ kann ermittelt werden.

Problem: Sind diese Unterteilungen direkt proportional?

Beispiel: Misst man mit zwei verschiedenen solchen Thermometern (Quecksilber, Alkohol) die Temperatur von Badewasser, so könnte es sein, dass das eine 30°C anzeigt, während das andere 29°C anzeigt.

In den Vereinigten Staaten wird die Temperatur in $^\circ\text{F}$ (Grad Fahrenheit) gemessen. Benutzt man hier die Symbole ϑ_F und ϑ_C , so ist der zahlenmäßige Zusammenhang durch

$$\frac{\vartheta_F}{^\circ\text{F}} = \frac{9}{5} \cdot \frac{\vartheta_C}{^\circ\text{C}} + 32 \quad \text{oder umgekehrt:} \quad \frac{\vartheta_C}{^\circ\text{C}} = \frac{5}{9} \cdot \left(\frac{\vartheta_F}{^\circ\text{F}} - 32 \right)$$

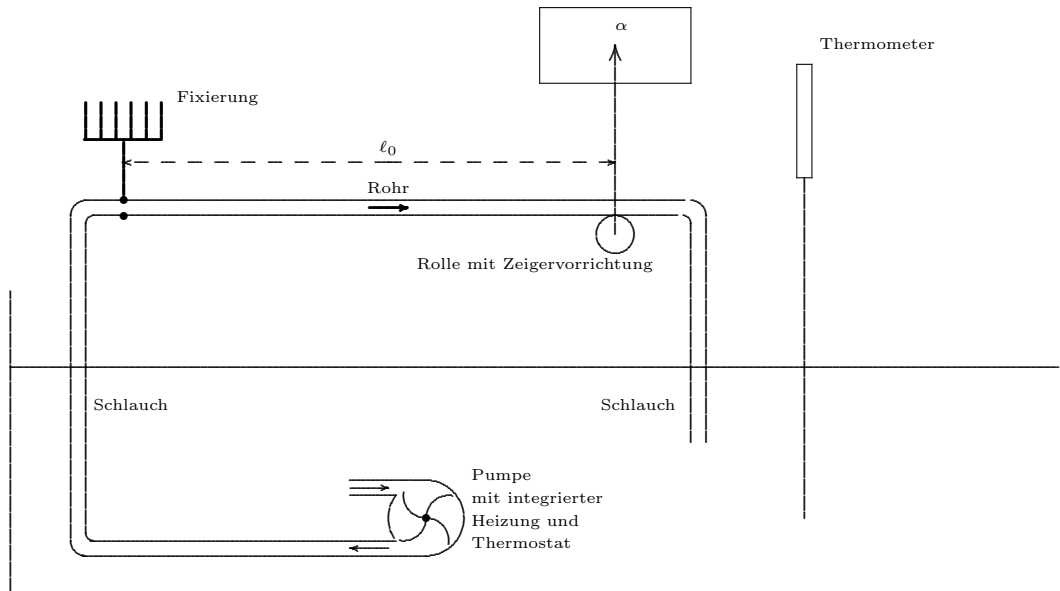
gegeben. Beispiele für zugeordnete Werte sind:

$$-17,8^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{F} \qquad 0^\circ\text{C} \sim 32^\circ\text{F} \qquad 37,8^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{F}$$

2 Ausdehnung von Körpern ⊕

2.1 Längenausdehnung von Festkörpern

V Quantitatives Experiment



Aufbau und Funktionsweise

- Ein aus dem Probe-Material gefertigtes Rohr wird an einem Ende fest eingespannt, am anderen Ende ist es über eine Rolle gelegt.
- Durchströmendes Wasser aus einem Wärmebad mit einer einstellbaren Temperatur sorgt dafür, dass das Rohr diese Temperatur gleichmäßig annimmt.

Die Wasserströmung und Temperaturregelung wird von einem speziellen Gerät, das Pumpe und Heizung mit Thermostat beinhaltet, ermöglicht.

- Eine Bewegung des Rohres über die Rolle hinweg wird durch die Auslenkung eines an der Rollenachse befestigten Zeigers festgestellt. Eine Bewegung um $\Delta\ell$ des Rohrendes führt zu einer Auslenkung des Zeigers um den Winkel

$$\alpha = \frac{\Delta\ell}{2\pi r} \cdot 360^\circ.$$

Dabei ist r der Radius der Rolle. Eventuell ist auf der Skala die Längenänderung direkt ablesbar.

Durchführung:

- Ermittle bei Eintragung in eine Meßwerttabelle die Länge des Rohres bei verschiedenen Temperaturen.

ϑ in °C	vorgegeben	20	30	40	50	60
α in °	gemessen	0				
$\Delta\vartheta$ in °C	berechnet	0				
$\Delta\ell$ in cm	berechnet	0				

- Trage den Zusammenhang in einem $\Delta\vartheta$ - $\Delta\ell$ -Diagramm ein.

Ergebnis:

- Bei günstigen Versuchsbedingungen ergibt sich im Diagramm eine „Ursprungshalbgerade“, die eine direkte Proportionalität bedeutet:

$$\Delta\ell = \alpha' \cdot \Delta\vartheta.$$

- Eine (gedankliche oder tatsächliche) Abänderung der Rohrlänge ℓ zeigt auf, dass die Proportionalitätskonstante wiederum direkt proportional von der Länge abhängt, also

$$\Delta\ell = \alpha \cdot \ell \cdot \Delta\vartheta.$$

- Versuche mit verschiedenen Rohr-Materialien zeigen auf, dass diese zweite Proportionalitätskonstante α von diesem Material abhängt.

Deutung, Weiterführung, Vernetzung

- Die schließlich gefundene Proportionalitätskonstante α heißt Längenausdehnungskoeffizient. Ihre Einheit ist

$$[\alpha] = \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad \text{bzw.} \quad [\alpha] = \frac{1}{\text{K}}$$

- Genauere Messungen zeigen, dass sie selbst i.A. leicht temperaturabhängig ist, die Direkte Proportionalität also nur näherungsweise gegeben ist.

- Wir können die letzte Gleichung der Längenausdehnung weiter umformen:

$$\begin{aligned} \ell &= \ell_0 + \Delta\ell = \ell_0 + \alpha \cdot \Delta\vartheta \cdot \ell_0 \\ &= \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \end{aligned}$$

- Ist ℓ_0 die Länge bei $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$ (Schmelztemperatur des Eises bei Normalbedingungen), so gilt:

$$\ell = \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta).$$

- Die SI-Einheit von α ist

$$[\alpha] = \underbrace{\frac{1}{^\circ\text{C}}}_{\text{schulisch}} = \underbrace{\frac{1}{\text{K}}}_{\text{wissenschaftlich}}$$

Da dieser Wert sehr hoch ist (Verdoppelung der Länge bei 1°C Temperaturerhöhung), benutzt man — wie in der folgenden Tabelle auch — meistens die viel kleinere Einheit $10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$.

Stoff	α
Blei	29
Gold	14
Eisen	12
Aluminium	23
Fensterglas	8
Quarzglas	1
Ziegel	6
Stahl	12
Beton	12
Holz	3

Weitere Werte befinden sich in Formelsammlungen.

V Qualitatives Experiment: Ein Draht wird auf einer Seite fixiert, auf der anderen Seite mit Hilfe einer Rolle und eines Gewichtsstücks gespannt. Wird er dann auf voller Länge durch Teelichte erwärmt, so senkt sich wegen der Ausdehnung das Gewichtsstück.

2.2 Volumenänderung

Wir betrachten einen Modellquader. Bei Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ ändern sich die Länge ℓ_x , die Breite ℓ_y und die Höhe ℓ_z nach dem Längenausdehnungsgesetz. Es gilt:

$$\begin{aligned} V &= \ell_x \cdot \ell_y \cdot \ell_z = \\ &= \ell_{x0}(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \cdot \ell_{y0}(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \cdot \ell_{z0}(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \\ &= \ell_{x0} \cdot \ell_{y0} \cdot \ell_{z0}(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)^3 = \\ &= V_0 \cdot [1 + 3\alpha \cdot \Delta\vartheta + 3\alpha^2 \cdot (\Delta\vartheta)^2 + \alpha^3 \cdot (\Delta\vartheta)^3] \\ &\approx V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta). \end{aligned}$$

Das bedeutet, der *Volumenausdehnungskoeffizient* γ ist drei mal so groß wie der Längenausdehnungskoeffizient: $\gamma = 3\alpha$.

Die Gleichung

$$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\vartheta).$$

ist grundsätzlich für alle Körper, nicht nur für Festkörper, gültig. Der Ausdehnungskoeffizient γ ist bei idealen Gasen „universell“, da hier absolute Temperatur und Volumen direkt proportional sind (Siehe Abschnitt 4.4).

2.3 Phänomene in Natur, Alltag und Technik

Nicht verwechseln mit Phänomenen, die aufgrund von Aggregatzustandsänderungen verursacht werden (Geplatzte Flasche). Die Ausdehnung bei Temperaturänderung wird tritt bei vielen Vorgängen oder Situationen in Natur, Alltag und Technik auf.

2.3.1 Festkörper

- Schmiedekunst, Metalltechnik, Verbindungstechnik.
- Brückenlager.
- Dehnungsbögen in Rohrleitungen.
- Fugen in Eisenbahnschienen: Früher wurden Eisenbahnschienen mit Fugen verlegt, die die Wärmeausdehnung im Sommer aufzufangen hatten. Die Folge war ein Dauerrattern beim Zufahren. Heute werden die Schienen sorgfältig so im Gleisbett fixiert, dass die Ausdehnungskräfte „ausgehalten“ werden und ein Ausweichen der Schienen nach oben und zur Seite verhindert wird.
- Durchhängen von Hochspannungsleitungen im Sommer.
- Schließen von Metalltüren in den verschiedenen Jahreszeiten.
- Membranschalter, Bimetallschalter.

Versuche:

- Bolzensprenger.
VORSICHT! Betrachte die Anordnung von der Seite aus 2 m Abstand.

- Kugel im Ring.
- Münze zwischen Nägeln.
- Bimetall-Schalter aus der Physiksammlung: Schalte mit 6 V-Lämpchen in Reihe. Die sich einstellende Schalt-Frequenz hängt von der angelegten Spannung ab.

2.3.2 Flüssigkeiten

- Volltanken im Sommer,
- Ausgleichsbehälter für das Wasser in der Zentralheizung.
- Schlägt ein Blitz in einen Baum ein, so sprengen die dadurch stark erhitzten (und dann verdampfenden) Flüssigkeiten den Baum.

2.3.3 Gase

- „Wenn sich Luft erwärmt, dann dehnt sie sich aus“: Heiße Luft steigt auf, Heizung Weihnachtspyramide (Siehe Thema Auftrieb in der Mechanik)
- Heißluftballon,
- Die Schallgeschwindigkeit (c : in einem idealen Gas/ Luft) hängt von der Temperatur ab:

$$c_{\text{Luft}} = \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15\text{ °C}}} \cdot 331,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

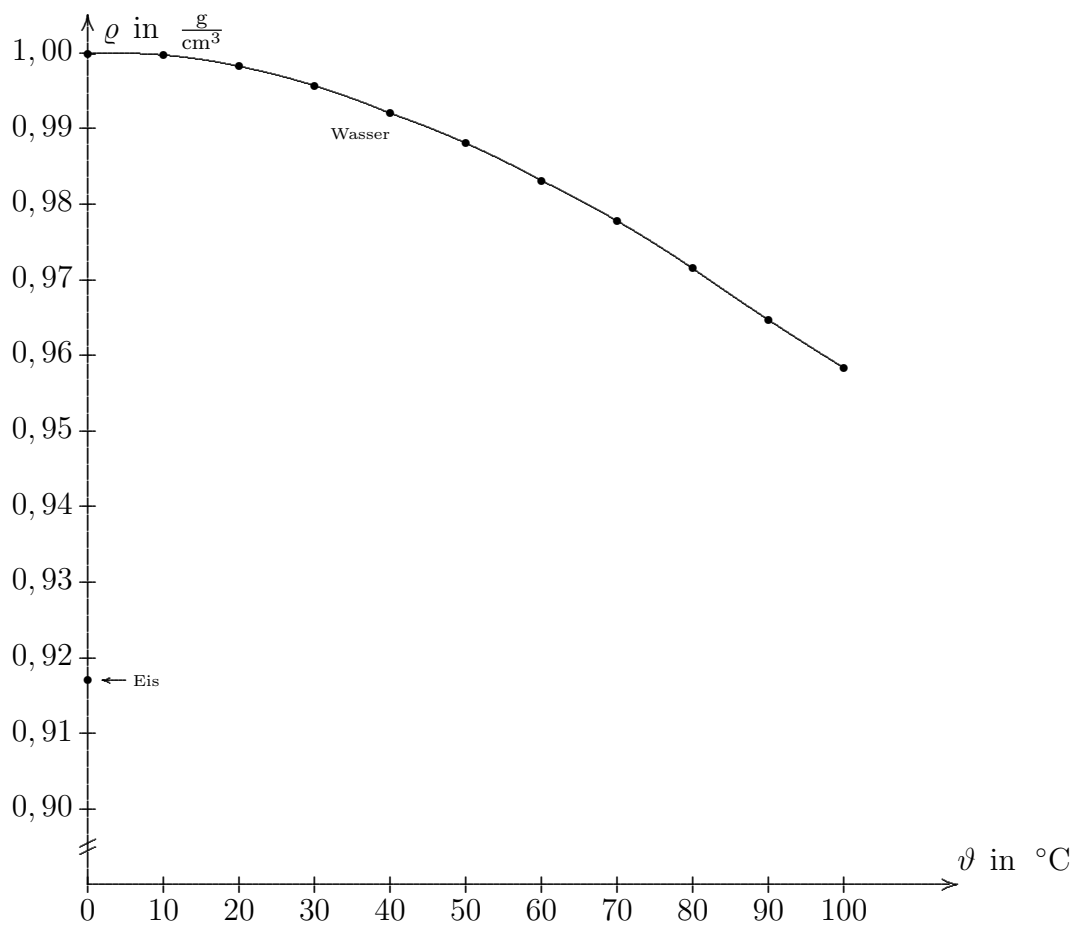
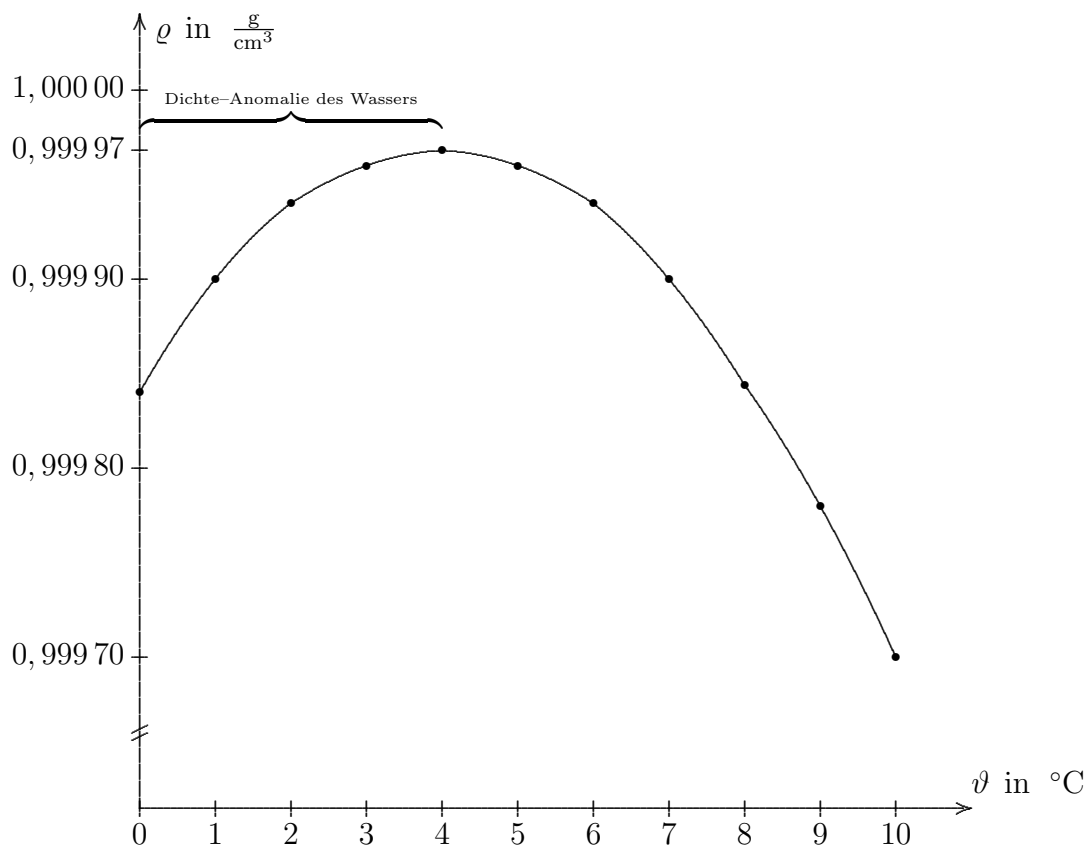
- Land- und Seewind, globale Luft- oder Meeresbewegungen.
- Die mit dem Luftballon verschlossene Flasche.
- Der Luftballon im Kühlschrank.

Bei idealen Gasen kann der Zusammenhang zwischen Veränderung des Volumens und Temperaturveränderung noch „grundsätzlicher“ hergeleitet werden. Dies wird in Abschnitt 4.4 genauer beschrieben.

2.3.4 Anomalie beim Wasser

Auswirkung: Zufrieren von Gewässern im Winter. Überleben der Lebewesen im Wasser.

Die beiden Diagramme auf der nächsten Seite zeigen, dass Wasser im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 4 °C eine Anomalie zeigt: Es zieht sich bei zunehmender Temperatur zusammen.



3 Temperaturmessung — Thermometer

Grundsätzlich wird die Temperatur eines Testkörpers (eines physikalischen Systems) dadurch gemessen, dass das Thermometer in thermischen (= wärmeleitfähigen) Kontakt mit dem Testkörper gebracht wird. Dabei ist hilfreich, dass . . .

- die Masse des Messgerätes im Vergleich zu der des Testkörpers klein ist, da andernfalls Wärme vom Messgerät auf den Testkörper übertragen wird und dadurch die Messung verfälscht wird.
- ein guter Wärmeleitkontakt hergestellt wird, geeignet sind Wasser oder spezielle Wärmeleitpasten.

Grundsätzlich eignen sich zur Temperaturmessung alle Eigenschaften von Körpern oder phys. Systemen, die von der Temperatur beeinflusst werden.

3.1 Ausdehnung \oplus

- Quecksilberthermometer: Gemessen wird die Längenausdehnung von flüssigem Quecksilber ($-39^\circ\text{C} \dots 357^\circ\text{C}$) in einem Glasröhrchen. Heute wegen der Giftigkeit des Quecksilbers nicht mehr gebräuchlich.

Bei Berührung mit einem heißem Testkörper sinkt die Quecksilbersäule zunächst. Warum?

- Alkoholthermometer: Das Quecksilber ist durch gefärbten Alkohol ersetzt. Je nach Art des verwendeten Alkohols ergeben sich unterschiedliche Messbereiche.
- Fieberthermometer: Oberhalb des Kontaktbodens befindet sich eine Verengung in dem Glasröhrchen. Nach dem Steigen der Flüssigkeitssäule reißt sie im Bereich der Verengung ab. Die Oberflächenspannung verhindert ein Zurückfließen nach Beendigung der Messung. Es ist ein „Runterschütteln“ notwendig.
- Bimetallthermometer: Eine Bimetallspirale wickelt sich je nach Temperatur auf oder ein. Über einen Zeiger wird die Temperatur angezeigt (oft in Kühlgeräten). Dieses Prinzip wurde früher auch für Thermostatschalter (in Bügeleisen o.ä.) verwendet.

Ein Bimetall besteht aus zwei unterschiedlichen aufeinandergewalzten oder -gelöteten Metallstreifen.

V Halte einen Bimetallstreifen über die Bunsenflamme!

- Quarzthermometer: Aufgrund der Längenänderung verändert sich die Schwingungsfrequenz eines Quarzkristalls. Diese kann angeregt und elektronisch abgefragt werden (Uhrbaustein notwendig). Durch Programmierung der Eichdaten kann die Temperatur direkt angezeigt werden.
- Galilei-Thermometer: Exakt abgewogene wassergefüllte Glaskugeln befinden sich in einer „Wasserumgebung“. Wird das umgebende Wasser erwärmt, so vermindert sich seine Dichte, während die Dichte der Kugeln gleich bleibt. Wenn die Dichte des umgebenden Wassers kleiner wird als die Dichte einer bestimmten Kugel, so sinkt diese ab. Insgesamt wird eine höhere Temperatur angezeigt.

3.2 Veränderung des el. Widerstands [⊕]

- Widerstandsthermometer bestehen aus dünnem ausgeglühtem Platindraht. Ihre Genauigkeit ist

$$\frac{1}{1000} \text{ K} \quad \text{im Bereich} \quad 0^\circ\text{C} \dots 400^\circ\text{C}.$$

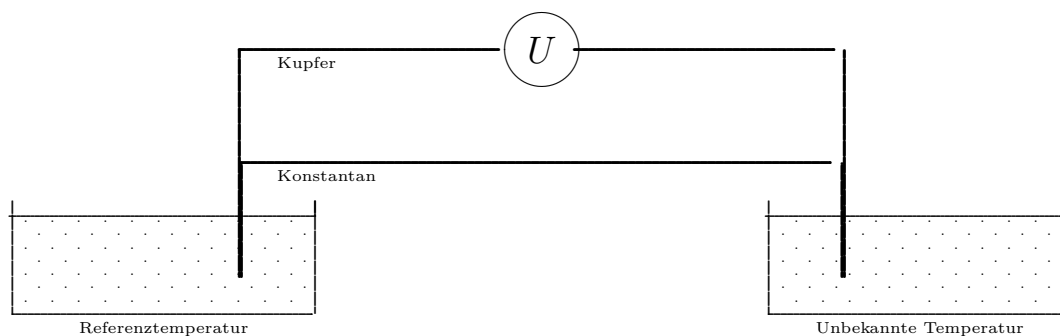
- Auch bei Halbleitertemperaturen wird die Temperatur über die Veränderung des Widerstands bestimmt. Bei Halbleitern sinkt der Widerstand mit steigender Temperatur („Freischüttelung“ von Bindungselektronen, siehe Elektronik-Vorlesung). Man spricht vom NTC-Widerstand (Negative Temperature Coefficient).

Durch Wahl geeigneter Materialien und Dotierung kann man eine sehr hohe Empfindlichkeit erreichen.

Dieses Prinzip findet Anwendung bei den Standard-Digital-Thermometern, es liegt auch den elektronischen Fieberthermometern (Nicht: Ohr-Thermometer) für den Hausgebrauch zugrunde.

V Teste das elektronische Thermometer und das DMM-Thermometer. Es kann beispielsweise die Temperaturverteilung innerhalb einer Kerzen- oder Bunsenbrennerflamme gemessen werden.

3.3 Thermoelemente \ominus



Zwei Drähte aus unterschiedlichen Metallen werden an den beiden Enden verbunden. Ein Voltmeter wird zwischengeschaltet. (Gelegentlich dient als Referenztemperatur-Reservoir das Voltmeter selbst, dann ist das Thermoelement zum Anschluss an das Voltmeter offen.)

Nach einer Kalibrierung kann auf den Temperaturunterschied geschlossen werden. Die Empfindlichkeit liegt im Bereich $10^{-4} \frac{\text{V}}{\text{K}}$. Ein großer Vorteil liegt darin, dass der Fühler keine große Wärmekapazität aufweist.

Haben die Verbindungsstellen eine unterschiedliche Temperatur, so wird zwischen ihnen eine vom Temperaturunterschied abhängige *Thermospannung* U erzeugt.

V Thermoelement.

- Das eine „Doppel-Ende“ des Thermoelements wird an ein empfindliches Voltmeter angeschlossen.
- Erwärme das andere „Doppel-Ende“ über der Flamme eines Feuerzeugs!
- Beobachte die auftretende Thermospannung!

Dieser Effekt heißt *thermoelektrischer Effekt*, er wurde von Seebeck 1821 entdeckt.

Es gibt auch den umgekehrten Effekt (Peltier, 1834): Bei vorgegebener Spannung stellt sich eine Temperaturdifferenz ein. Dies kann für Wärmepumpen (Kühlschrank) ausgenutzt werden.

3.4 Emission elektromagnetischer Strahlung \ominus

Körper haben eine Glühfarbe, die nur

- abhängig von der Temperatur und
- unabhängig von der chemischen Zusammensetzung des Körpers ist.

Beginnende Rotglut	550 °C
Dunkelrotglut	700 °C
Gelbglut	1100 °C
Weißglut	1500 °C

Allgemeiner emittiert jeder Körper bei einer bestimmten Temperatur elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Frequenzverteilung. Der genauere Zusammenhang zwischen Temperatur und Frequenzverteilung (Farbe) wird im *Planck'schen Strahlungsgesetz* angegeben.

Anwendungen:

- Pyrometer,
- Thermographie (vgl. Bilder auf dem Prospekt)
- Ohr-Thermometer.

\boxed{V} Ein Tauchsieder wird in der „Luft“ aufgestellt und eingeschaltet. Nach einer Weile verfärbt er sich rötlich.

3.5 Weitere Eigenschaften

Die Temperatur ist eine *intensive* Größe, d.h. bei einer Zerteilung des Körpers oder einer Zusammenfügung von mehreren Körpern gleicher Temperatur bleibt die Temperatur gleich. Beispiele für intensive (spezifische) Größen sind: Druck, Temperatur, Dichte.

Eine Größe der Thermodynamik heißt *extensiv*, wenn ihre Werte bei Zerteilung oder Zusammenfügung sich entsprechend aufteilen oder addieren. Beispiele für extensive (Bilanz-, Substanz-)Größen sind: Masse, Volumen, Innere Energie, Entropie, . . .

Die theoretische Thermodynamik arbeitet eine „denkästhetische“ Dualität zwischen extensiven und intensiven Größen heraus.

Ein wesentliches Lernziel in diesem Zusammenhang ist das Bewusstsein um den Unterschied zwischen Temperatur (als intensiver Größe) und Wärme (-menge als extensiver Größe).

4 Das Ideale Gas \ominus

Modell-Vorstellung:

- Die Teilchen im Gas haben kein Volumen.
- Es bestehen keine Fernkräfte zwischen den Teilchen.

Diese Idealisierung ist in der Wirklichkeit nicht streng erfüllt, die Ideale-Gas-Gesetze sind aber gut erfüllt (jeweils bei Zimmertemperatur) für ...

- Luft, reinen Sauerstoff, Stickstoff oder Wasserstoff in sehr guter Näherung,
- Helium, Neon und Argon in guter Näherung,

Kohlendioxid ist bei Zimmertemperatur ein Gas, das Abweichungen gegenüber den Ideales-Gas-Gesetzen aufweist.

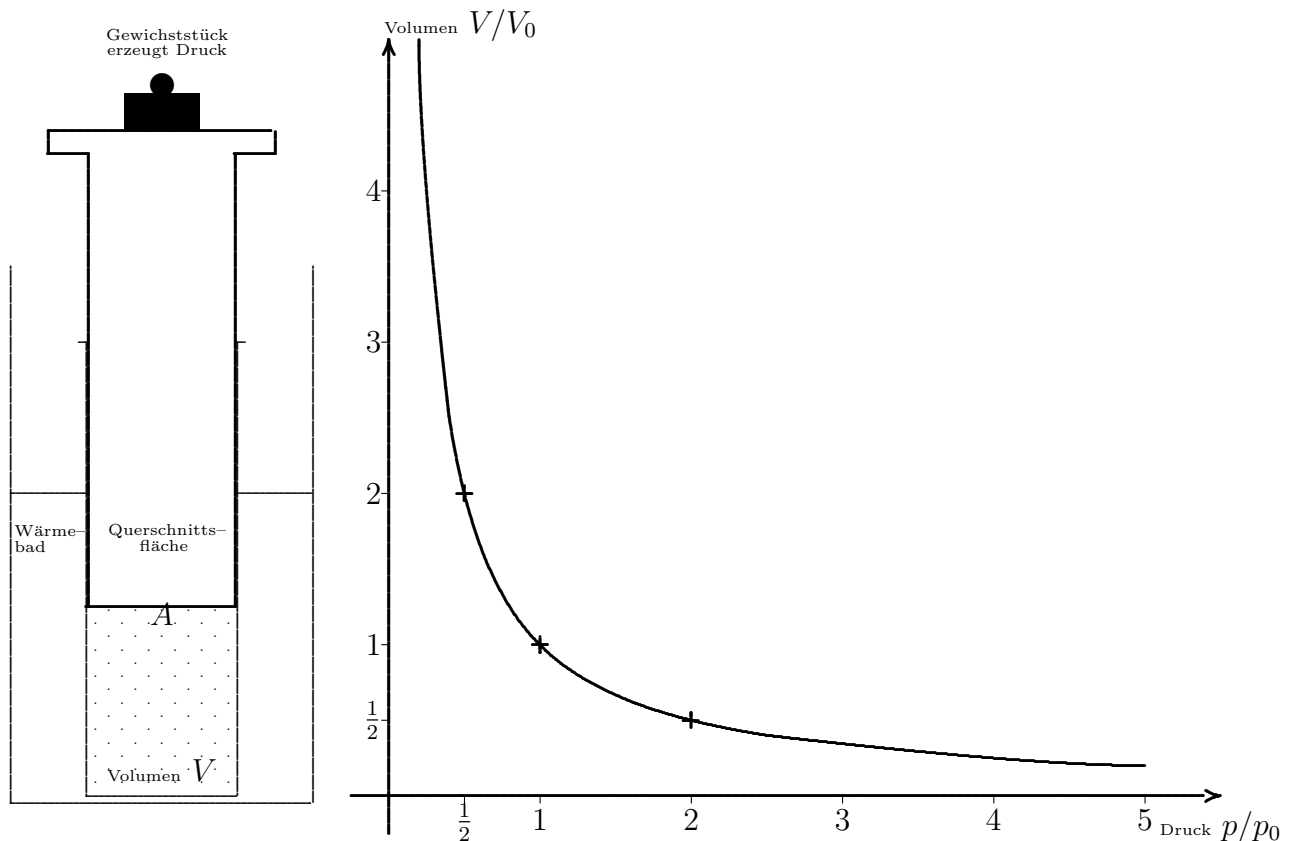
Grundsätzlich kommt ein Gas der Ideal-Gas-Modell-Vorstellung näher, wenn die Temperatur höher oder der Druck geringer ist.

4.1 Das Gesetz von Boyle und Mariotte

Ein Gefäß ist mit einem frei beweglichen Stempel der Querschnittsfläche A verschlossen, auf den Gewichtsstücke der Masse m gelegt werden können. Dadurch kann der Druck

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A}$$

auf das eingeschlossene ideale Gas (beispielsweise Luft) verändert werden. Die Temperatur ϑ wird — beispielsweise durch Eintauchen in ein Wärmebad (einen Thermostaten) — konstant gehalten.



Es wird das Volumen des eingeschlossenen idealen Gases in Abhängigkeit vom Druck bestimmt.

Als Ergebnis erhält man den Zusammenhang der „Indirekten Proportionalität“, der graphisch durch eine Hyperbel repräsentiert ist. Der formelmäßige Zusammenhang ist:

$$V \sim \frac{1}{p} \quad \text{bei } \vartheta = \text{const}$$

oder

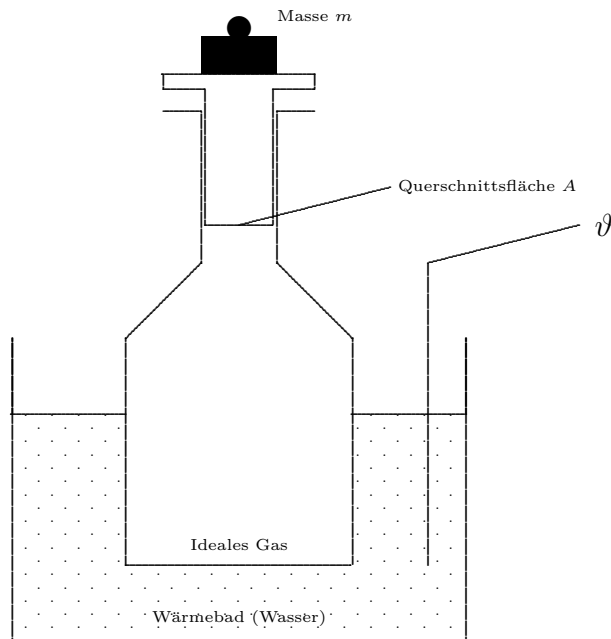
$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \text{bei } \vartheta = \text{const.}$$

Das ist das Gesetz von *Robert Boyle* (1627 – 1691) und *Edme Mariotte* (1620 – 1684).

Das Gesetz von Boyle und Mariotte beschreibt die Vorgänge bei Gas- oder Luftfederungen aller Art

- Luft in Ballons, Bällen, Sitzbällen, Matratzen, Verpackungspolsterfolien.
- Reifen: In Flugzeugreifen befindet sich Helium.
- Stoßdämpfer.

4.2 Das Gesetz von Gay–Lussac



□ Ein Glasgefäß ist wieder mit einem frei beweglichen Stempel verschlossen. Der Druck

$$p = \frac{F_G}{A} = \frac{m \cdot g}{A}$$

wird konstant gehalten. Mit einem Thermometer kann die Temperatur des Wärmebades — und damit des Gases — bestimmt werden.

Das Gas wird (im Wärmebad) erwärmt. In Abhängigkeit von der Temperatur wird das Volumen bestimmt.

Ergebnis:

$$\Delta V \sim \Delta \vartheta \quad \text{bei} \quad p = \text{const}$$

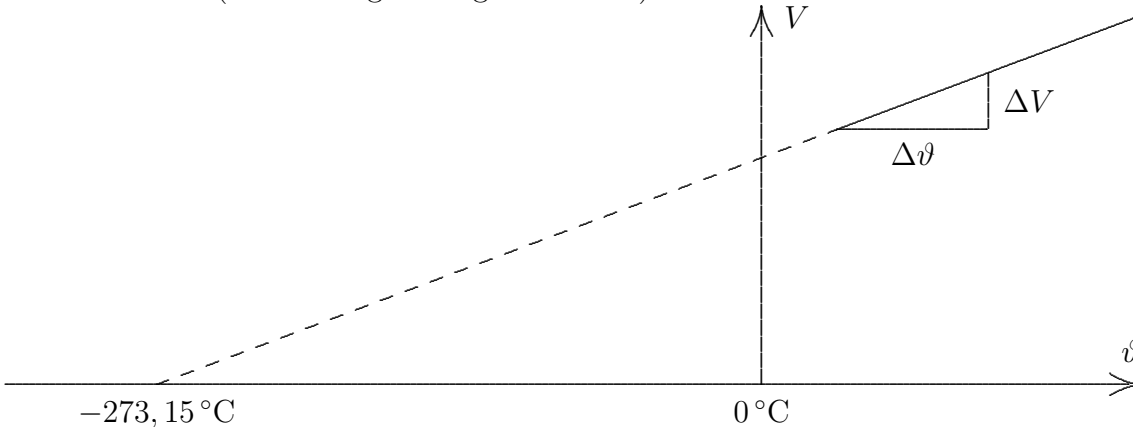
Die **Volumenänderung** ist direkt proportional zur **Temperaturänderung**. Das ist das Gesetz (1802) von Louis–Joseph Gay–Lussac (1778 – 1850). Damit hat man ein Gesetz zur Verfügung, das — unabhängig von einem beliebig gewählten Material — einen Zusammenhang zwischen der Temperatur und einer anderen physikalischen Größe herstellt. Man wählt daher dieses Gesetz zur Kalibrierung der Temperaturskala.

Anwendungen:

- „Wenn Luft erwärmt wird, dann dehnt sie sich aus“.
- Heißluftballon: Die Luft in einem Ballon mittels eines Brenners erhitzt, dadurch wird ihre Dichte geringer, es entsteht ein Auftrieb.
- Beim Blitzschlag dehnt sich die umgebende Luft aufgrund der enormen Temperaturerhöhung sehr stark aus. Dies ist der Grund für den Donnerschlag.
- Eine Flasche wird mit einem Luftballon (oder Seifenblase, Münze) verschlossen und die eingeschlossene Luft — beispielsweise mit den Händen — erwärmt. Es ist eine Wölbung zu erkennen.

4.3 Die absolute Temperatur

Trägt man den Zusammenhang aus dem Gay–Lussac–Gesetz in einem Diagramm auf, so erhält man ein (hier durchgehend gezeichnetes) Geradenstück:



Extrapoliert man diese zu kleineren Temperatur–Werten hin (gestrichelt), so schneidet sie bei einem Wert von

$$\vartheta_0 = -273,15\text{ °C}$$

die Temperatur–Achse. (Diese Extrapolation ist im Versuch nicht nachvollziehbar, da dann das Gas nicht mehr als „ideal“ angesehen werden kann; es würde kondensieren.)

Nichtsdestoweniger ist der obige Temperatur–Wert für die weitere Entwicklung der Wärmelehre von grundsätzlicher Bedeutung. Man definiert ihn als den Nullpunkt der *absoluten Temperaturskala*. Die Kalibrierung (d.h. der Abstand der Skalenwerte) wird von der Celsius–Skala übernommen, so dass man für die absolute Temperatur T die Beziehung

$$T := (\vartheta + 273,15\text{ °C}) \cdot \frac{\text{K}}{\text{°C}} \quad \text{umgekehrt:} \quad \vartheta = (T - 273,15\text{ K}) \cdot \frac{\text{°C}}{\text{K}}$$

erhält. Die neue Einheit $[T] = 1\text{ K}$ ist nach Lord Kelvin (1824 – 1907) benannt.

Da aufgrund der veränderten Temperaturskala die Gerade in dem obigen Diagramm eine Ursprungshalbgerade wird, kann auch das Gesetz von Gay–Lussac jetzt als eine direkte Proportionalität formuliert werden:

$$\frac{V}{T} = \text{const bei } p = \text{const.}$$

V Es wird ein Spargelglas über eine brennende Kerze in einer Wasserschicht gestülpt. Nach dem Erlöschen der Kerze steigt das Wasser in dem Glas auf. Man schätzt grob das Verhältnis der Höhen der Luftsäulen im Glas ab:

$$h_1 = 16\text{ cm (vor...)}, \quad h_2 = 12\text{ cm (nach dem Verlöschen der Flamme)}.$$

Damit kann man das Verhältnis „nachher/vorher“ der Temperaturen berechnen (ϑ_0 ist der „Celsius–Wert“ des absoluten Nullpunkts):

$$\frac{\vartheta_2 - \vartheta_0}{\vartheta_1 - \vartheta_0} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{12\text{ cm}}{16\text{ cm}} = \frac{3}{4}.$$

Kennt man ϑ_1 und ϑ_2 , so kann man damit auf ϑ_0 schließen:

$$\frac{\vartheta_2 - \vartheta_0}{\vartheta_1 - \vartheta_0} = \frac{3}{4} \implies \vartheta_0 = 4\vartheta_2 - 3\vartheta_1.$$

Nimmt man (gutwillig) an, dass $\vartheta_1 = 130^\circ\text{C}$ und $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$, so erhält man

$$\vartheta_0 = 4 \cdot 30^\circ\text{C} - 3 \cdot 130^\circ\text{C} = -270^\circ\text{C}.$$

4.4 Volumenausdehnung bei idealen Gasen

Die Volumenausdehnung eines idealen Gases kann mit Hilfe des Gesetzes von Gay–Lussac genauer beschreiben werden.

- Ausgangspunkt sind das Gesetz von Gay–Lussac

$$\boxed{\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}} \quad (1)$$

(Druck konstant) und die direkte Proportionalität von Volumen- und Temperaturveränderung

$$\boxed{\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta \vartheta} \quad (2)$$

- Als „Vergleichspunkt“ wird die Temperatur $T_0 = 273,15\text{ K}$ (0°C) gewählt.
- Um den Volumenausdehnungskoeffizienten γ aus diesen beiden Gleichungen heraus zu bestimmen, müssen noch die Differenzen in (2) anders geschrieben werden:

$$\Delta V = V - V_0 \quad \Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_0 = \Delta T \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}} = (T - T_0) \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}} \quad (3)$$

- Durch geschickte „Formelmanipulation“ kann jetzt γ berechnet werden:

$$\begin{aligned} \gamma &\stackrel{(2)}{=} \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta \vartheta} \stackrel{(3)}{=} \frac{V - V_0}{V_0} \cdot \frac{1}{(T - T_0) \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}}} \\ &\stackrel{(1)}{=} \frac{T - T_0}{T_0} \cdot \frac{1}{(T - T_0) \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}}} = \frac{1}{T_0 \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}}} = \frac{1}{273,15^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

4.5 Die Allgemeine Gasgleichung

Dies ist eine allgemeingültige Gleichung, der das Modell des „Idealen Gases“ zugrunde liegt.

Für eine fest vorgegebene Gasmenge lauten die Gesetze von Gay–Lussac (in der Formulierung mit der absoluten Temperatur)

$$V \sim T \quad \text{bei } p = \text{const}$$

und von Boyle–Mariotte

$$p \cdot V = \text{const} \quad \text{bei } T = \text{const}$$

Sie können zusammengefaßt werden zu

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const}$$

Berücksichtigt man weiter, das bei sonst gleichen Bedingungen das Volumen direkt proportional zur Stoffmenge ν ist, so kann man weiter formulieren:

$$\frac{p \cdot V}{T} \sim \nu,$$

Die Proportionalitätskonstante R in der zugehörigen Gleichung

$$\boxed{\frac{p \cdot V}{T} = R \cdot \nu \quad (*)}$$

(*Allgemeine-Gas-Gleichung* oder *Ideale-Gas-Gleichung*) ist eine Naturkonstante. Sie heißt *Universelle Gas-Konstante*, ihr Wert ist

$$R = 8,3144 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kmol}}.$$

In der Teilchenphysik (oder Statistischen Physik) weiß man, dass die Teilchenzahl N und Stoffmenge ν eines Körpers über die *Avogadro-Konstante* N_A zusammenhängen:

$$N = \nu \cdot N_A, \quad \text{mit } N_A = 6,022 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{kmol}}.$$

Eingesetzt in die Allgemeine-Gas-Gleichung (*) ergibt:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{N}{N_A} \cdot R = N \cdot k.$$

Die neue Konstante $k = \frac{R}{N_A} = 1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ heißt *Boltzmann-Konstante*. Sie ist eine fundamentale Konstante der Physik.

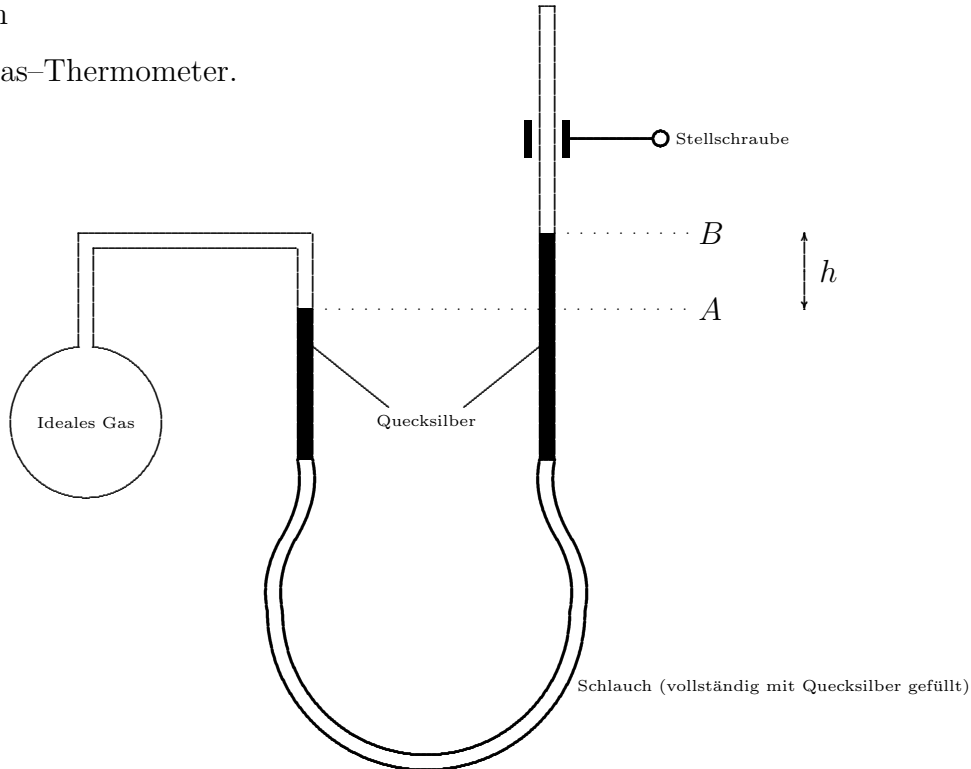
4.6 Das Gesetz von Amontons

Betrachtet man die Allgemeine-Gas-Gleichung für konstantes Volumen, so ergibt sich ein weiterer Spezialfall:

$$p \sim T \quad \text{bzw.} \quad \frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{bei } V = \text{const}$$

Anwendungen

- Jolly-Gas-Thermometer.



In einem Gefäß befindet sich ein ideales Gas (Wasserstoff oder Helium). Es ist mit einer Quecksilber-Säule in einem U-förmigen Gefäß (mit Schlauch) gegenüber dem umgebenden Raum abgeschlossen.

Verändert sich die Temperatur, so regelt man mit einer Stellschraube die Quecksilbersäule so nach, dass das Volumen des Gases konstant (abgeschlossen durch Niveau A) bleibt. Über die Höhendifferenz h der Quecksilbersäule kann man auf den Druck, und damit — nach Amontons — auf die Temperatur, schließen.

Bemerkenswert an diesem Thermometer ist, dass es allein auf dem Prinzip der „Ideal-Gas-Gleichung“ beruht und nicht — wie die bisher besprochenen Thermometer — von Eigenschaften irgendeines Mediums abhängt. Deshalb wird dieses Thermometer auch als *Normthermometer* bezeichnet.

- Diesel-Motor: Im zweiten Takt (Verdichtungstakt) wird die (vorher im ersten Takt) angesaugte reine Luft sehr stark komprimiert, wodurch sie auf etwa 600 °C bis 700 °C erwärmt wird. Das daraufhin eingespritzte Dieselöl entzündet sich dann von selbst.
- Die im Innenraum eines Kühlschranks eingeschlossene Luft wird abgekühlt, weshalb sie sich zusammenzieht. Dies führt zu einem Unterdruck, der die Kühlschranktür geschlossen hält.

4.7 Das Reale Gas

In dem Modell des „Realen Gases“ werden das Eigenvolumen der Teilchen und die zwischen den Teilchen wirkenden Kräfte berücksichtigt.

Ein einfachstes Modell ist dann das des sogenannten *Van-der-Waals* Gases. Die Zustandsgleichung des „Idealen Gases“ wird in diesem Modell wie folgt korrigiert bzw. ergänzt:

$$\left(p + \frac{a}{V_{\text{mol}}^2}\right) \cdot (V_{\text{mol}} - b) = R \cdot T.$$

Dabei bedeuten die Terme

- $\frac{a}{V_{\text{mol}}^2}$ den Binnendruck, der durch die Anziehungskräfte der Teilchen untereinander verursacht wird.

Beim Kohlendioxid: $a = 3,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{bar m}^6}{\text{mol}^2}$.

- b ist das Kovolumen, es ist das eigentliche Gesamtvolumen der Teilchen.

Beim Kohlendioxid: $b = 4,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$.

Bestimmt man für verschiedene fest gewählte Temperaturen den $V_{\text{mol}}-p$ -Zusammenhang, so ergibt sich das Diagramm auf dem Beiblatt.

Innerhalb diese Modells können verschiedene Phänomene geklärt werden, die die Allgemeine-Gas-Gleichung für ideale Gase nicht erfassen kann:

- *Verflüssigung von Gasen* Komprimiert man Kohlendioxid der Temperatur 0°C immer weiter, so wird im allgemeinen nicht die Kurve $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ gemäß der Van-der-Waals-Gleichung durchlaufen, sondern ab A die Strecke $[AE]$. Diese sogenannte *Maxwell-Gerade* ergibt sich aus der Bedingung, dass die zwischen ihr und der Kurve eingeschlossenen Flächen gleich groß sind. Es tritt dabei die Verflüssigung des Gases ein.
- *Dampfdruckkurve* Zu jeder Temperatur $T < T_K$ gibt es also einen Druck p , bei dem die Verflüssigung abläuft. Die $T-p$ -Kurve (in einem entsprechenden Diagramm) wird als *Dampfdruckkurve* bezeichnet.

Anwendung: Der Schnellkochtopf (Papin, ~ 1800):

Ring	Druck in bar	Temperatur in $^\circ\text{C}$
0	1,0	100
1	1,4	109
2	1,8	117

Kann man das Modell des „Idealen Gases“ zugrundelegen?

- *Kritischer Punkt* heißt der Punkt auf einer der Kurven im $V_{\text{mol}}-p$ -Diagramm, der dadurch ausgezeichnet ist, dass er eine waagerechte Tangente besitzt. Oberhalb der ihm zugeordneten Temperatur kann durch Druckerhöhung keine Verflüssigung erreicht werden.

Bei „unseren Gasen“ (O_2 , N_2 , Luft) ist die zugehörige kritische Temperatur weit unterhalb der normalen Temperaturen. Sie können deshalb als ideal angesehen werden. Bei Propan oder Butan liegt sie weit darüber (\rightarrow Flüssiggas).

- *Dampfübersättigung* Läuft die Kompression eines realen Gases ohne innere oder äußere Störungen (Kondensationskeime, Erschütterungen) ab, so kann es doch die Kurve $A \rightarrow B \rightarrow C$ durchlaufen (\rightarrow Kondensstreifen, Wilson Nebelkammer).
- *Siedeverzögerung* Bei vorsichtiger Entspannung einer Flüssigkeit kann es passieren, dass das Sieden ausbleibt oder dann bei einer Störung plötzlich — explosionsartig — auftritt. Ein entsprechender Effekt tritt bei Temperaturerhöhung auf, man kann ihn mit sogenannten *Siedesteinen* verhindern..

Es gibt noch genauere, d.h. auch kompliziertere, Gas-Zustandsgleichungen.

5 Der Energieerhaltungssatz der Wärmelehre

5.1 Physikalische Arbeit

In den verschiedenen anderen Teilgebieten der Physik wird geklärt, was darunter zu verstehen ist, dass ein Körper (*physikalische*) *Arbeit* an einem anderen verrichtet. Man sagt auch — etwas abstrakter —, der eine Körper gibt Arbeit an den anderen ab.

Beispiele:

- Hubarbeit: Wird ein Körper der Gewichtskraft F_G im Schwerfeld der Erde hochgehoben, so wird an ihm die Hubarbeit

$$\Delta W_H = F_G \cdot \Delta h \quad \xrightarrow{\text{falls } F_G = \text{const}} \quad \begin{aligned} W_H &= F_G \cdot (h_2 - h_1) \\ &= mg \cdot (h_2 - h_1) \end{aligned}$$

verrichtet.

- Reibungsarbeit: Wirken bei der Bewegung eines Körpers gegen einen anderen Reibungskräfte, so wird an beiden Reibungsarbeit

$$\Delta W_R = F_R \cdot \Delta s \quad \xrightarrow{\text{falls } F_R = \text{const}} \quad W_R = F_R \cdot (s_2 - s_1)$$

verrichtet: (Bremsen, Werkzeuge, Luft,,widerstand", ..)

- Kompressionsarbeit: Wird ein ideales Gas durch Veränderung des einwirkenden Drucks komprimiert, so wird an ihm Kompressionsarbeit

$$\Delta W_K = p \cdot \Delta V \quad \xrightarrow{\text{falls } p \cdot V = C = \text{const}} \quad W_K = C \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

verrichtet (B: Luftpumpe, Tritt auf Fußball, Kompressor im Kühlschrank).

Umgekehrt: Entspannt sich ein Gas, so gibt es Arbeit nach außen ab. (B: Verbrennungsgase im Motor).

- Spannarbeit: Wird eine Feder der Federhärte D gespannt (oder gestaucht), so wird an eine Spannarbeit verrichtet von

$$\Delta W_S = F_S \cdot \Delta s \quad \xrightarrow{\text{falls } F_S = D \cdot s} \quad W_S = \frac{D}{2} \cdot (s_2^2 - s_1^2)$$

- Strom- oder elektrische Arbeit: Bei Stromfluss durch einen el. Widerstand (Gerät, Bauteil, Leiter) wird an diesem Stromarbeit

$$\Delta W_{\text{el}} = Q \cdot E \cdot \Delta s \quad \xrightarrow{\text{falls } E = \text{const}} \quad W_{\text{el}} = Q \cdot U$$

verrichtet (B: Herdplatte, Tauchsieder). Vergleiche Vorlesung EMG.

- Magnetische Arbeit, Strahlungsarbeit (Photozelle).

In der Mechanik wird die Einheit Joule für die Arbeit definiert als

$$1 \text{ J} \stackrel{\text{def}}{=} 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ VAs}.$$

Andere Einheiten, die im Alltag gebräuchlich sind:

- cal (Kalorie), kcal (Kilokalorie): Diese Einheit war früher sehr gebräuchlich und bis 1.1.1978 zulässig. 1 cal ist die Energie, die für die Erwärmung von 1 g Wasser um 1°C (genauer: von $14,5^\circ\text{C}$ auf $15,5^\circ\text{C}$) aufgebracht werden muss. Es gilt

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}.$$

Diese Einheit wird heute noch für den sogenannten *Brennwert* bei Lebensmitteln verwendet. Oft wird dabei die „Kilokalorie“ einfach als Kalorie bezeichnet (vgl. TicTac-Dose).

Ein Mensch benötigt am Tag etwa 2500 kcal.

- kWh (Kilowattstunde) ist die Energie, die bei der Leistung $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ in einer Stunde umgesetzt wird. Diese Einheit wird benutzt bei der Berechnung der Kosten der el. Energie, wie sie von den Elektrizitätsversorgungsunternehmen ins Haus geliefert wird. Es gilt:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ MJ} \approx 1000 \text{ kcal}.$$

Um die Frage zu beantworten, was man sich unter der Energie von 1 J vorstellen kann, nehmen wir einige Gesetzmäßigkeiten der Wärmelehre vorweg.

- Eine verpackte Tafel Schokolade ($m = 102 \text{ g}$, Gewichtskraft auf der Erde 1 N) wird 1 m hochgehoben.
- Ein Gerät der Leistung 1 W läuft 1 s lang.
- Bei 1 V el. Spannung fließt 1 s lang ein Strom der Stärke 1 A .
- Ein Tropfen (genauer: $\frac{1}{4} \text{ mL}$) Wasser wird um 1°C erwärmt (in etwa).

5.2 Wärme

Ein Körper (physikalisches System) kann Energie in Form von *Wärme aufnehmen* durch thermischen Kontakt mit einem physikalischen System (Wärmebad) höherer Temperatur. Beispiele

- Kartoffeln nehmen Wärme aus dem umgebenden Wasser auf.
- Wasser nimmt Wärme aus den Heizwendeln eines Wasserkochgerätes auf.
- Die Raumluft nimmt Wärme aus den Heizkörpern auf.

Ein Körper (physikalisches System) kann Energie in Form von *Wärme abgeben* durch thermischen Kontakt mit einem physikalischen System („Wärmebad“) niedrigerer Temperatur. Beispiele

- Das Coca-Cola gibt Wärme an die Eiswürfel ab.
- Kühlschrank: Der Kühlschrank-Inhalt gibt Wärme an die (Kühl-)Flüssigkeit ab.

Wie die übertragene Wärme gemessen wird, d.h. als physikalische Größe festgelegt ist, kann erst mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes festgelegt werden.

Die obige Beschreibung zeigt jedenfalls auf, dass die Wärme eine extensive, eine „mengenmäßige“ Größe ist. In der Schule wird daher oft auf die Begriffsbildung *Wärmemenge* zurückgegriffen. Dieser Einbeziehung dieses Begriffs erleichtert auch die Unterscheidung der physikalischen Größen „Temperatur“ und „Wärme“.

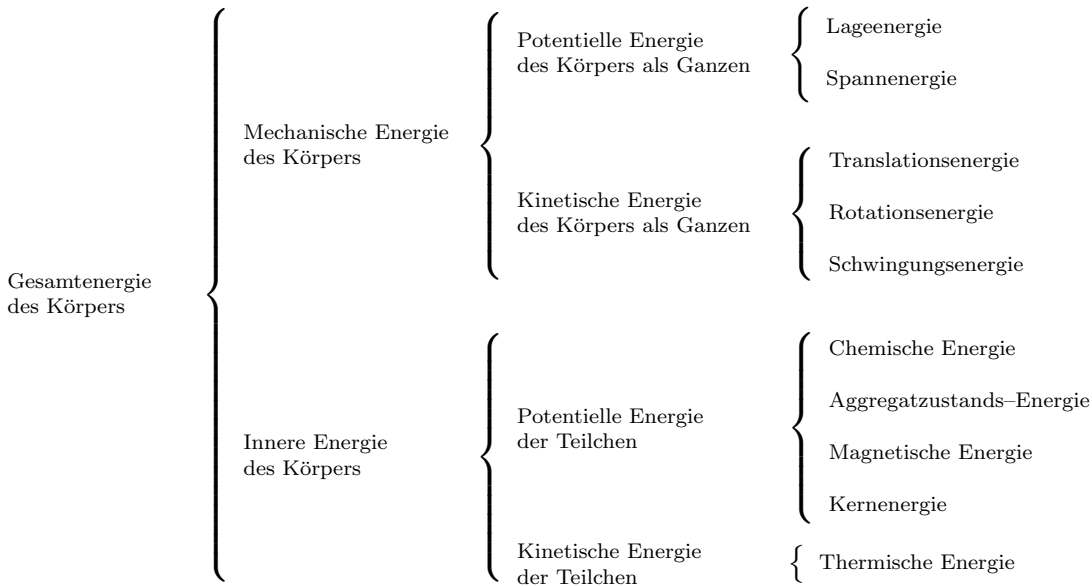
5.3 Die Innere Energie eines Körpers

Definition: Die Summe aller von den Teilchen eines Körpers gespeicherten Energien nennt man seine *Innere Energie*.

Symbol: U oder E_i .

Als Einheit ergibt sich ebenfalls das Joule.

Man kann die folgende Einteilung aller Energien eines Körpers vornehmen:



5.4 Der Energieerhaltungssatz der Wärmelehre

Der *Energieerhaltungssatz* (EES) der Wärmelehre ist eigentlich der Energieerhaltungssatz der gesamten Physik. Innerhalb der Wärmelehre wird er auch als *1. Hauptsatz der Wärmelehre* bezeichnet.

Bei allen Vorgängen (der Welt) ändert sich die innere Energie eines Körpers (physikalischen Systems) ausschließlich durch den Austausch von Arbeit oder Wärme:

$$dU = \delta A + \delta Q$$

Fasse die Symbole d bzw. δ einfach als Δ (Änderung) auf, die genauere Unterscheidung hat tiefere theoretische Gründe. In der Fachphysik werden die Arbeit mit A , die Wärme durch das Symbol Q dargestellt.

Ein physikalisches System heißt *abgeschlossen*, wenn es keine Arbeit und keine Wärme mit anderen Systemen (mit der Umgebung) austauscht, d.h.

$$\delta A = 0 \text{ und } \delta Q = 0.$$

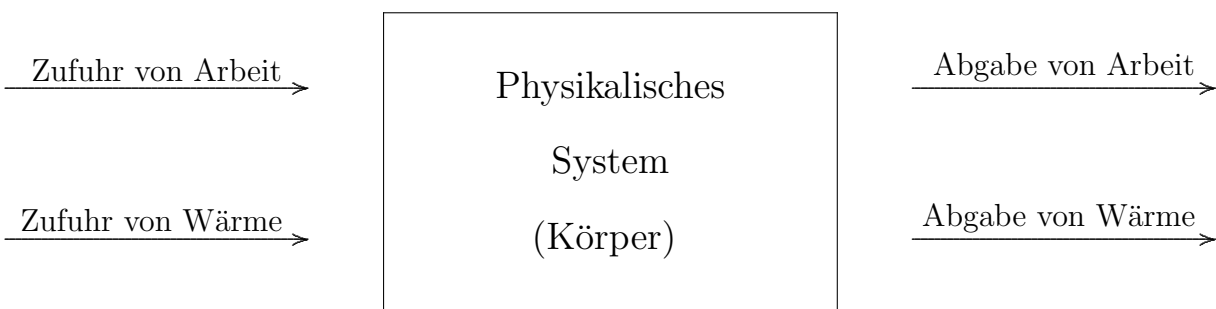
Wärmeisolation wird realisiert durch sehr schlecht wärmeleitende Wände (Styropor), Vakuumkammern, Verspiegelung.

„Arbeitsisolation“ wird — je nach Art der Arbeit — unterschiedlich realisiert, beispielsweise verhindert man den Austausch von Kompressionsarbeit durch Einschluß in ein starres Gefäß ($\Delta V = 0$), den von Reibungsarbeit durch Unterbinden von Reibung, d.h. Polstern, Schmieren o.ä.

Folgerung aus dem EES:

In einem abgeschlossenen System ist die innere Energie konstant.

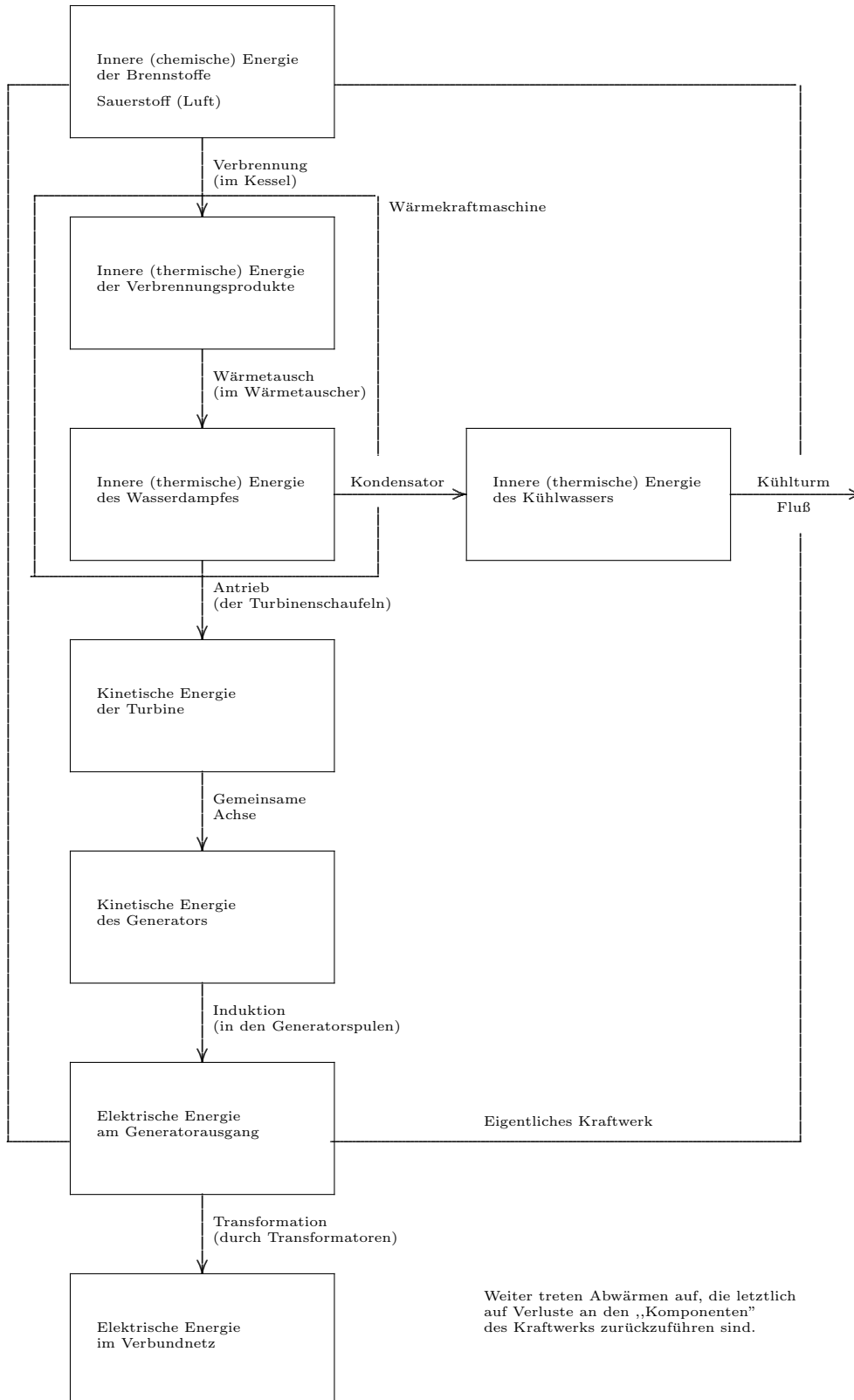
Das bedeutet also, dass Energien weder „aus dem Nichts erzeugt“ werden können noch „im Nichts verschwinden“ können, sie können lediglich umgewandelt werden.

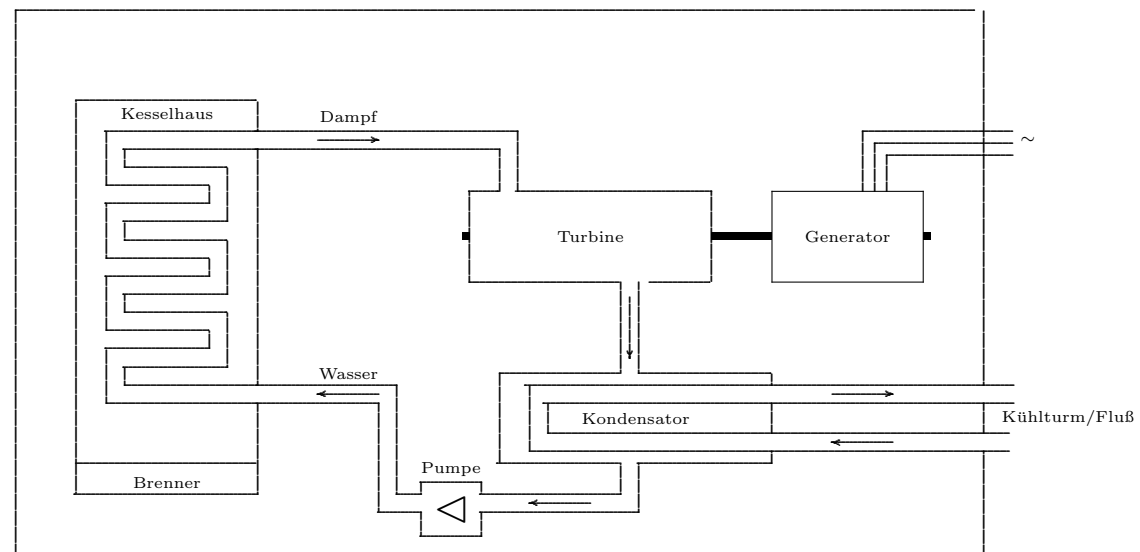


5.5 Energieumwandlungen

5.5.1 ...im Dampfkraftwerk

Energien können lediglich in ihrer Art gewandelt werden. Dies wird am Beispiel eines Dampfkraftwerks aufgezeigt.





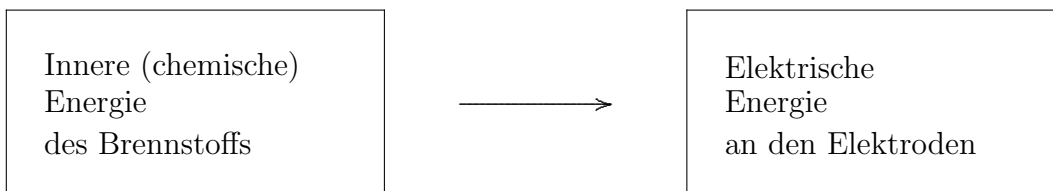
Aufbau (stark schematisch) eines Kohlekraftwerks

5.5.2 ... in der Brennstoffzelle

Zwischen zwei Elektroden,

- der Luftelektrode und
- der Brennstoffelektrode

befindet sich ein Brenngas (H_2 oder CH_4). Durch elektrochemische Prozesse wird die chemische innere Energie des Brenngases **direkt** in elektrische Energie gewandelt.



5.6 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre \ominus

Der *Zweite Hauptsatz der Wärmelehre* ist einer der „schillerndsten“ Aussagen der Wärmelehre bzw. der Gesamtphysik überhaupt. Die quantitative Formulierung des zweiten Hauptsatzes erfordert die Einführung des Begriffs der *Entropie* S . Dies ist eine Zustandsgröße (ähnlich der Inneren Energie), die jedem physikalischen System (im Prinzip) zugeordnet werden kann.

Die Schöpfung des Begriffs der Entropie geht auf Rudolf Clausius (1822 – 1888) zurück. Er formulierte auch den Zweiten Hauptsatz:

In einem abgeschlossenen System wird stets nur Entropie produziert.

$$\delta S \geq 0.$$

Eine Elementarisierung dieses Satzes kann dadurch geschehen, dass man spezielle Beispiele aus der Physik und aus dem (energie-wirtschaftlichen) Alltag herausgreift und die Auswirkungen des 2. Hauptsatzes beschreibt.

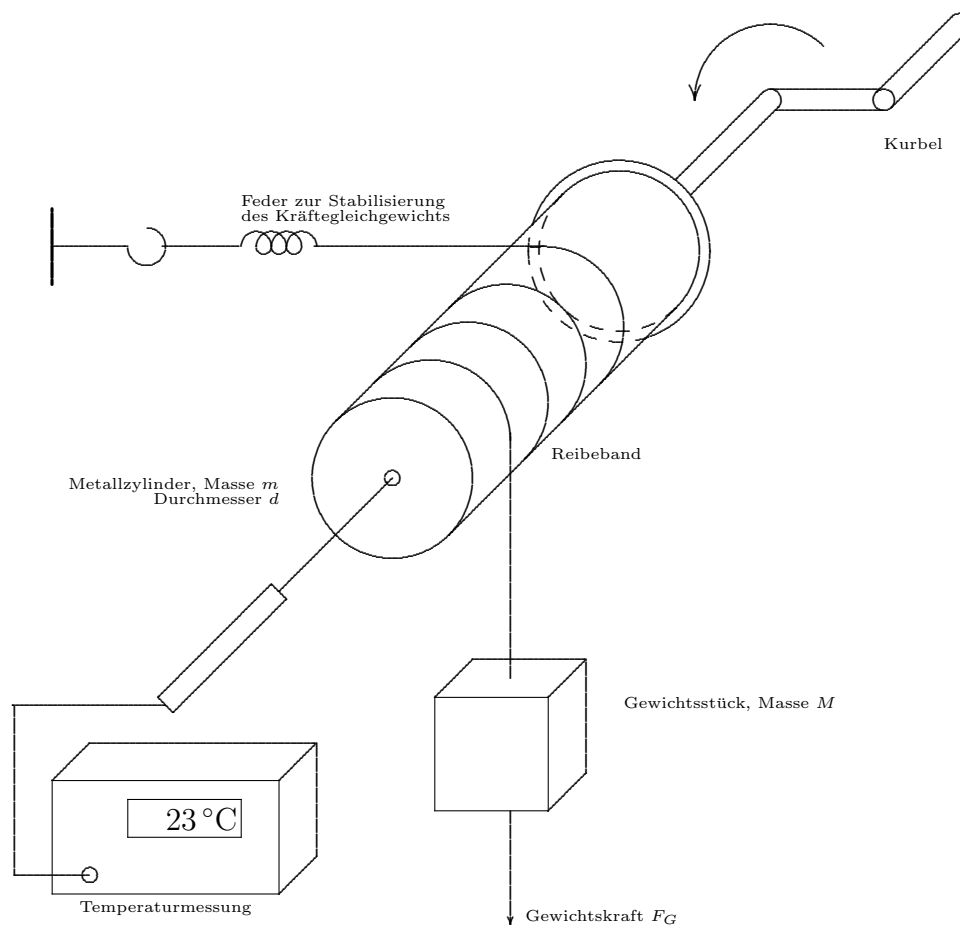
- Der Wärmeübergang zwischen Körpern unterschiedlicher Temperaturen geschieht — falls nicht irgendwie von außen eingewirkt wird — immer in Richtung hoch \rightarrow tief, niemals umgekehrt. Ein sich selbst überlassenes physikalisches System entwickelt sich immer in Richtung Temperaturengleich. Angewandt auf das Weltall sprach Rudolf Clausius auch vom *Wärmetod des Weltalls*.
- Ein Kühlschrank (oder eine Wärmepumpe) kann nicht einfach Wärme von einem kühleren Reservoir zu einem wärmeren Reservoir überführen. Dies ist nur möglich durch Energieaufnahme (El. Strom) von außen.
- Ein Schiff kann nicht dadurch angetrieben werden, dass es dem Meer Wärme entzieht und diese zum Betrieb der Motoren nutzt.
- Die Entstehung von Struktur, Ordnung und Leben in einem (physikalischen) System ist immer daran gebunden, dass ein ständiger Energiefluss durch dieses System erfolgt. Das System muß offen sein.
- Beim Betrieb eines Fahrzeuges wird die aufgewandte Energie letztlich als Wärme an die Luft abgegeben (Erwärmung der Reifen, der Straße, der Bremscheiben, \rightarrow Luft). Es ist umgekehrt nicht möglich, die Wärme der Luft zu entziehen und zum Antrieb zu verwenden.
- Bei Kontakt zweier Fluide unterschiedlicher Temperatur, chemischer Natur oder Konzentration erfolgt — falls nicht irgendwie von außen eingewirkt wird — stets eine Mischung, nie eine Entmischung.
- Der Zweite Hauptsatz zeichnet (als einziger Satz der Physik) eine Richtung der Zeit aus. Wenn Sie beim Betrachten einer Filmszene klar sagen können, dass sie in zeitlicher Vorwärts-Richtung gezeigt ist, so können sie dies naturwissenschaftlich daran festmachen, dass Entropie produziert wird.

Beachten Sie, dass all diese „Verbote“ nicht aus dem Energieerhaltungssatz ableitbar sind.

Es soll hier noch erwähnt werden, dass es auch noch einen *Dritten Hauptsatz der Wärmelehre*, das sogenannte Nernst'sche Wärmetheorem, gibt.

5.7 Ein Versuch zur Bestimmung des „Wärmeäquivalents“[⊖]

Ⓜ (Vgl. Abbildung) Wir führen — gedanklich — einen Versuch durch, mit dem wir den Zusammenhang zwischen Innerer Energie und Temperatur untersuchen wollen.



Über einen drehbar gelagerten Metallzylinder (B: Leybold 388 00) der Masse m ist ein Reibeband (Kupferlitze oder Nylonfaden) gewickelt.

- Wird der Zylinder gedreht (dies geschieht mit einer kleinen Kurbel), so wird an dem Zylinder eine Reibungsarbeit W_R

$$W_R = F_R \cdot s$$

verrichtet.

- Kraft F_R : Das Reibeband bewegt sich nicht, befindet sich also im Kräftegleichgewicht. Im Punkt P heben sich die durch die Masse M des Gewichtsstücks ausgeübte Gewichtskraft F_G und die Reibungskraft F_R gegenseitig auf. Es gilt also (betragsmäßig)

$$F_R = F_G = M \cdot g.$$

- Weg s : Bei n Umdrehungen des Zylinders legt die Zylinderoberfläche gegenüber dem ruhenden Reibband einen Weg von

$$s = n \cdot u = n \cdot \pi \cdot d$$

zurück (d = Durchmesser, u = Umfang des Metallzylinders).

- Insgesamt gilt also:

$$W_R = F_R \cdot s = M \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot d = n \cdot 5 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \pi \cdot 0,047 \text{ m} = n \cdot 7,23 \text{ J}.$$

Bei einer Umdrehung wird an dem Zylinder eine Reibungsarbeit von 7,2 J verrichtet.

- Da wir — idealisierend — annehmen, dass der Metallzylinder während des Experiments keine Wärme abgibt, wird also bei einer Umdrehung die innere Energie des Zylinders um 7,2 J erhöht. Damit können wir einen Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung und der Änderung der Inneren Energie ermitteln.
- Es stellt sich heraus, dass diese beiden Größen direkt proportional zueinander sind:

$$\Delta U \sim \Delta \vartheta \quad \text{oder} \quad \Delta U = C \cdot \Delta \vartheta.$$

Die Proportionalitätskonstante C heißt — nicht ganz glücklich — die *Wärmekapazität* (des „Zylinders“).

- Verwendet man Metallzylinder verschiedener Massen m , so stellt sich bzgl. der Abhängigkeit von der Masse die erweiterte Proportionalität

$$\Delta U \sim m \cdot \Delta \vartheta \quad \text{oder} \quad \Delta U = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta.$$

heraus.

5.8 Die Spezifische Wärmekapazität

Die in der letzten Gleichung auftretende Proportionalitätskonstante heißt *Spezifische Wärmekapazität* (des „Zylindermetalls“). Es handelt sich um eine Stoffkonstante.

Die SI-Einheit und weitere Einheiten sind

$$1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}, \quad 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{g K}} \doteq \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{g } ^\circ\text{C}}.$$

Je nach schulischem Kontext (Elementarisierung) ist die Einheit K für die Temperaturdifferenz durch die Einheit $^\circ\text{C}$ ersetzt.

Die folgende Tabelle listet einige Werte auf (Einheit $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$):

FESTKÖRPER	c	FLÜSSIGKEITEN	c
Blei	0,130	Quecksilber	0,14
Gold	0,130	Terpentinöl	1,8
Eisen	0,452	Äthylalkohol	2,4
Aluminium	0,896	Wasser	4,19
Glas	0,8	GASE	
Porzellan	0,84	Argon	0,32
Eis	2,1	Luft (Druck konstant)	1,00
Kork	2,1	Wasserstoff	14,3
Holz	2,5		

Beachte, dass die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes zwei verschiedene Stoffkonstanten sind.

Wasser hat im Vergleich zu allen anderen Stoffen (mit Ausnahme von H_2 oder He) eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität ($c_{\text{Wasser}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$). Dies hängt mit dem Dipolcharakter der Wassermoleküle zusammen (\rightarrow Viele Freiheitsgrade).

Dies hat in mehrfacher Hinsicht eine immens große Bedeutung für das Klima der Erde. So sind Gewässer „unempfindlich“ gegenüber Temperaturänderungen der Umgebung, sie haben eine puffernde und damit klimamildernde Wirkung.

- Am Bodensee herrscht ein — im Vergleich zu anderen Gebieten Deutschlands — mildes Klima.
- Tiefst- bzw. Höchsttemperaturen treten im tiefen Festland (Wüsten, Sibirien) auf.

Außerdem werden durch Meeresströmungen immense Wärme-Energien auf der Erde transportiert. Der Golfstrom ist maßgeblich für ein vergleichsweise mildes Klima in Westeuropa.

Andere Beispiele für Temperaturerhöhung aufgrund Zufuhr von Reibungsarbeit ...

- Glühende Bremscheiben.
- Heißwerden von Werkzeugen (Sägen, Bohrer, Fräsen, Sandpapier), Maschinen müssen gegebenenfalls gekühlt werden. (Illustration: Absägen eines Metallstabes).
- Reiben von Händen; Seil, das durch die Hand fährt.
- Entzünden eines Streichholzes.

oder Verformungsarbeit:

- Schmied schlägt Stück Metall glühend.
- Wiederholtes Knicken und Strecken eines (genügend weichen) Metallstabs führt zu dessen Erwärmung.

V „Bleischrotversuch“ In einer Zylinder-Röhre der Länge 1 m befindet sich Bleischrot. Die Röhre wird 100 mal gewendet, so dass das Bleischrot 100 mal die Strecke 1 m durchfällt. Die Temperaturerhöhung wird gemessen. Man kann auf die spezifische Wärmekapazität von Blei schließen.

5.9 Anwendung des EES: Mischung \ominus

Zwei Körper (oder phys. Systeme) \mathcal{K}_1 und \mathcal{K}_2 werden in thermischen Kontakt (Berührung oder Mischung) gebracht. Dabei ist gewährleistet, dass kein thermischer Kontakt nach außen besteht.

Aufgrund des EES ist dann die Energie, die \mathcal{K}_1 abgibt, gleich der, die \mathcal{K}_2 aufnimmt (Wir nehmen der Einfachheit halber an, dass \mathcal{K}_1 wärmer ist als \mathcal{K}_2):

$$\begin{aligned}\Delta E_1 &= \Delta E_2 \\ c_1 \cdot m_1 \cdot \Delta \vartheta_1 &= c_2 \cdot m_2 \cdot \Delta \vartheta_2 \\ c_1 \cdot m_1 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_M) &= c_2 \cdot m_2 \cdot (\vartheta_M - \vartheta_2) \quad \vartheta_M \text{ ist die Mischtemperatur}\end{aligned}$$

Dies ist die *Grundgleichung für den Temperatúrausgleich*.

Sie ist Grundlage für „Rechenphysik“ in Realschule und Gymnasium. Vergleiche Aufgaben!

Einfache Versuche:

- Mischung von Wasser der Temperaturen 20 °C (Zimmertemperatur) und 100 °C.
- Eine Bleikugel ($m = 2$ kg, Zimmertemperatur) wird in ein Gefäß mit 80 °C heißem Wasser gelegt.
- Betrachte die Spezialfälle $c_1 = c_2$ (B: Mischung von Badewasser) und $m_1 = m_2$.

5.10 Verbrennungsenergie und Heizwert

Bei Brennstoffen kann ein Teil der chemischen Energie durch Verbrennung (Oxidation = Verbindung mit Sauerstoff) freigesetzt werden. Dieser Anteil heißt *Verbrennungsenergie* E_V des Stoffes.

Aufgrund des Energieerhaltungssatzes verringert sich bei der Verbrennung die innere Energie des Brennstoffes:

$$\Delta U = E_V$$

Für einen fest gegebenen Brennstoff sind die beiden Größen

Verbrennungsenergie und Masse

direkt proportional zueinander:

$$E_V \sim m.$$

Die zugehörige Konstante, der Quotient aus Verbrennungsenergie und Masse, heißt *spezifische Verbrennungsenergie* e_V oder kürzer *Brennwert*.

$$e_V = \frac{E_V}{m}, \quad \text{Einheit: } [e_V] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{g}}.$$

Diese Konstante hängt nur vom Brennstoff ab, sie ist eine Materialkonstante (Vgl. [?, S. 150]).

Bei manchen Brennstoffen, insbesondere Holz, wird ein Teil der Brennenergie dazu benötigt, das im Brennstoff enthaltene Wasser zu verdampfen. Es steht dann nur die

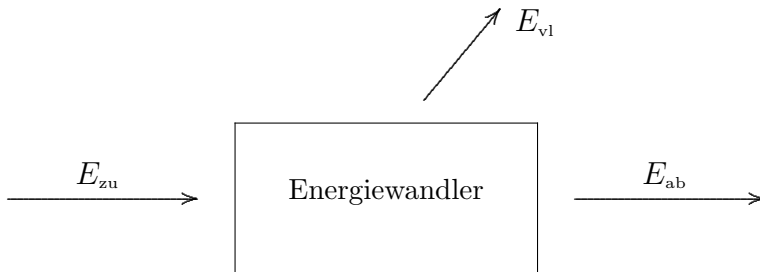
$$\text{Heizenergie} = \text{Brennenergie} - \text{Verdampfungsenergie}$$

als nutzbar zur Verfügung. Dementsprechend gibt der *Heizwert* die spezifische Heizenergie an:

$$\text{Heizwert} = \text{Brennwert} - \text{Spez. Verdampfungsenergie}.$$

5.11 Der Wirkungsgrad bei Energieumwandlungen \ominus

Viele Geräte aus Technik und Haushalt wandeln „irgendwie“ eine Art von Energie in eine andere um. Man kann sie daher als *Energiewandler* (genauer eigentlich: Energieartwandler) bezeichnen.



Das Verhältnis von zugeführter Energie E_{zu} zu abgegebener (genutzter) Energie E_{ab} heißt *Wirkungsgrad* η des Energiewandlers:

$$\eta = \frac{E_{\text{ab}}}{E_{\text{zu}}}.$$

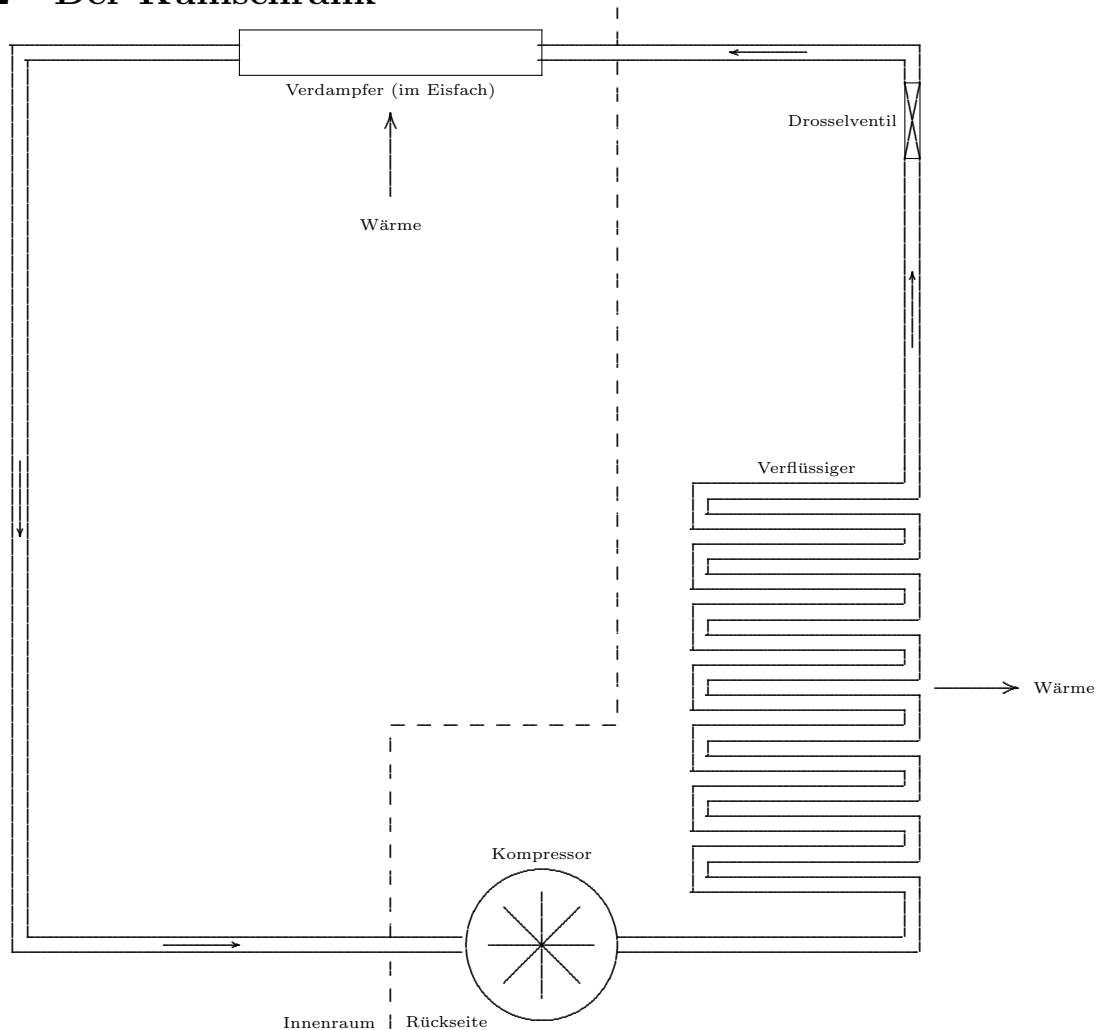
Er wird gewöhnlich in % angegeben: $1\% = \frac{1}{100}$.

Ein *idealer* Energiewandler hat einen Wirkungsgrad von

$$\eta = 100\% = 1.$$

Reale Energiewandler geben einen Teil der zugeführten Energie in einer Form ab, die nicht genutzt werden kann. Diese wird als *Verlustenergie* E_{vl} bezeichnet. Es ergibt sich ein Wirkungsgrad < 1 .

5.12 Der Kühlschrank



Als Kühlmittel eignet sich ein Stoff, der bei Kühlungstemperatur flüssig und bei Normalbedingungen gasförmig ist. Dies ist beispielsweise bei Ammoniak oder Äthylchlorid gegeben.

Es spielt sich folgender Kreislauf ab:

1. Das gasförmige Kühlmittel wird im Kompressor komprimiert.
2. Im Verflüssiger wird das Kühlmittel unter **Abgabe von Wärme** flüssig.
3. Beim Passieren des Drosselventils entspannt sich die Flüssigkeit,
4. was zu einem Verdampfen unter **Aufnahme von Wärme** führt.

Eine *Wärmepumpe* arbeitet prinzipiell nach dem gleichen Prinzip wie ein Kühlschrank. Lediglich ihr Zweck besteht in der Erwärmung anstatt der Abkühlung eines Körpers.

6 Aggregatzustände \oplus

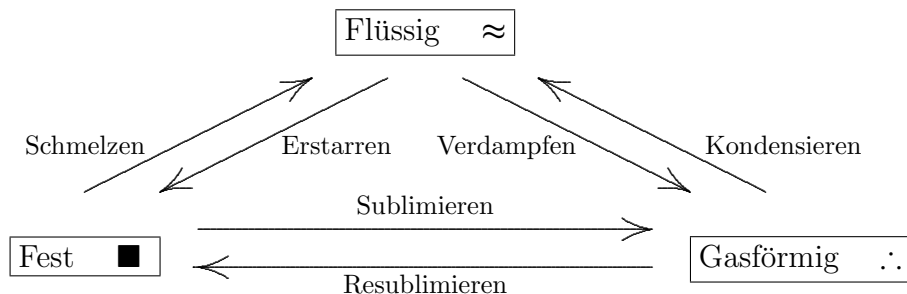
Aggregatzustände werden auch als *Phasen* oder einfach als *Zustandsformen* oder *Zustände* bezeichnet.

Die folgende Tabelle zeigt die kennzeichnenden Eigenschaften der Aggregatzustände auf.

Aggregatzustand	Festkörper ■	Flüssigkeit \approx	Gas \therefore
Beispiele	Klotz, Kristall, Pulver, Styropor, Rauch.	Wasser, Nebeltropfen, Getränke, Quecksilber, Brom, Seifenblasen, Honig, Organismen, Sonderfall: Glas.	Luft, Sauerstoff, Propan, Kohlendioxid, Wasserdampf, Helium
Die inneren Kräfte sind als/wie die äußeren Kräfte.	viel größer (Die Lagen und die Abstände der Teilchen zueinander sind festgelegt)	vergleichbar groß (Die Abstände der Teilchen zueinander sind festgelegt)	viel kleiner (Die Teilchen sind frei gegeneinander beweglich)
Volumen (liegt vor, wenn die inneren Kräfte die Abstände der Teilchen voneinander bestimmen)	ja	ja	nein (wird allein durch äußere Kräfte (Gefäßwand oder Schwerkraft) bestimmt)
Form (liegt vor, wenn die inneren Kräfte die Lagen der Teilchen zueinander bestimmen)	ja Aber: Elastizität (Stahlfeder)	nein (bedingt durch Gefäß oder Schwerkraft), Sonderfall: Glas	nein (bedingt durch Gefäß oder Schwerkraft)
Verhalten bei Fehlen äußerer Kräfte (z.B. Schwerelosigkeit)	behält Form und Volumen	Oberflächenspannung führt zu Kugelgestalt	breitet sich unbeschränkt aus.
Verhalten unter Schwerkraft	—	bildet waagerechte Oberfläche aus	bildet Schichtung aus.
Kompressibilität	nein	sehr gering	hoch
Innere Zähigkeit	sehr hoch (z.B. Geschoß)	groß	gering
Dichte	groß ($0,1 - 20 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	geringer ($0,1 - 13 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) Aber: Anomalie beim Wasser.	sehr gering ($\approx 0,001 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)
Schallgeschwindigkeit	hoch	geringer	klein
(Innerer) Druck	—	Gesetz v. Pascal, Schweredruck mit der Höhe linear abnehmend	Gesetz v. Boyle-Mariotte, Schweredruck mit der Höhe exponentiell abnehmend (Barometrische Höhenformel)
Oberflächenspannung (\Rightarrow Kapillarität)	—	ja Bestreben, eine möglichst kleine Oberfläche zu bilden.	—
Temperatur	geringer (Wolfram Schmelztemperatur: 3700 K)	mittel	höher

6.1 Aggregatzustandsänderungen

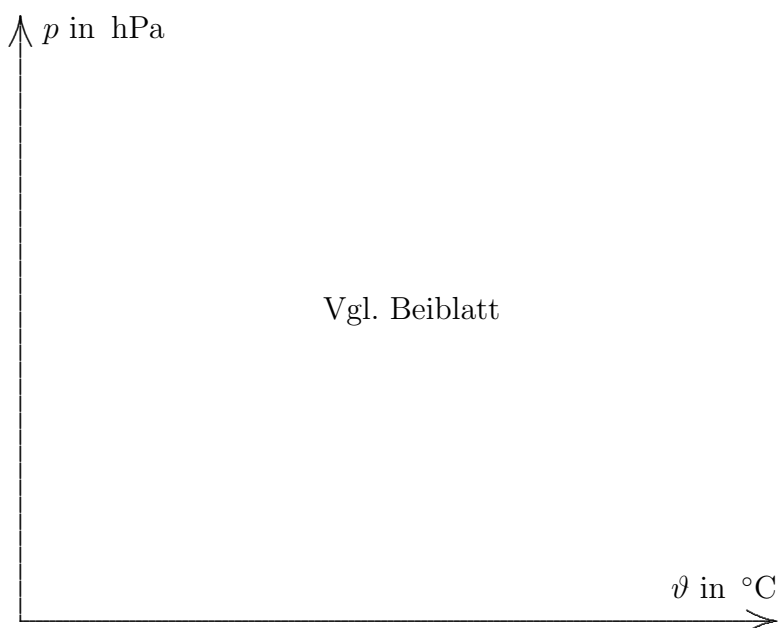
Gemäß unserer Alltagserfahrungen gibt es drei klassischen Aggregatzustände. Das folgende Diagramm zeigt die Bezeichnungen für die einzelnen *Aggregatzustandsänderungen* (Kurz: Zustandsänderungen) auf:



Im Alltag werden Zustandsänderungen bei nur wenigen Stoffen beobachtet: Wasser, Wachs, Zinn (Bleigießen an Sylvester).

Die (Re-)Sublimation wird so gut wie nie beobachtet, dieser Prozeß erfolgt bei diesen „Alltagsstoffen“ nur bei geringeren Drucken als dem Luftdruck.

Welcher der Zustände von einem Stoff eingenommen wird, hängt im allgemeinen von der Temperatur und vom Druck auf diesen Stoff ab. Das folgende Diagramm zeigt dieses am Beispiel von Wasser auf:



6.2 Besonderheiten beim Schmelzen und Erstarren

6.2.1 Lösungen

□ In zwei Schalen werden zwei Eiswürfel aufgestellt, einer der beiden ist mit einer Salzschrift zugedeckt.

Beobachtung: Der salzbedeckte Eiswürfel schmilzt wesentlich schneller als der andere.

Merke: Die Schmelz- bzw. Erstarrungstemperatur eines Stoffes wird herabgesetzt, wenn ein anderer Stoff in ihm gelöst ist.

Anwendung: Streusalz im Winter.

6.2.2 Druck

□ Übt ein über einen Eisblock gespannter Draht einen hohen Druck aus, so „wandert“ er durch ihn hindurch (vgl. ZA Krümpel, S. 65).

Merke: Die Schmelz- (bzw. Erstarrungs-)Temperatur von Wasser wird herabgesetzt, wenn der Druck erhöht wird.

Dies gilt auch noch beispielsweise für Quecksilber oder Bismut. Bei fast allen anderen Stoffen ist es umgekehrt.

Anwendungen:

- Wintersport aller Art: Schlittschuhlaufen, Skifahren,
- Eisstockschießen, Curling.
- Wandern von Gletschern.

6.2.3 Volumenänderung

□ Eine mit Wasser gefüllte Glasflasche wird (besser: in einer Plastiktüte) in das Gefrierfach gelegt. Nach einer Weile bricht die Flasche.

Beobachtung: Eis schwimmt auf dem Wasser.

Merke: Beim Erstarren von Wasser (oder Quecksilber, Bismut) tritt eine Volumenvergrößerung (\iff Dichteverkleinerung) auf. Umgekehrt verkleinert sich das Volumen beim Schmelzen.

Bei den meisten anderen Stoffen ist es genau umgekehrt.

Beispiel: Erstarrendes Glycerin (oder fester Stahl) sinkt in seiner Schmelze ab.

Die Tatsache, dass sowohl bei der Schmelzpunktniedrigung als auch bei der Volumenvergrößerung die gleichen Stoffe eine Sonderrolle spielen, ist kein Zufall. Zwischen den beiden Phänomenen besteht ein Zusammenhang, die sogenannte *Clausius-Clapeyron-Beziehung*.

6.3 Besonderheiten beim Sieden und Verdampfen

□ Mit Hilfe einer Vakuumpumpe wird der Druck auf eine Wassermenge der Temperatur 80°C vermindert. Das Wasser beginnt zu sieden.

□ ZA Krümpel, S. 51,

Merke: Je höher der auf einer Flüssigkeit lastende Druck, desto höher ist die Siede- (bzw. Kondensations-)Temperatur.

Anwendungen:

- Auf dem Mount Everest (Höhe 8.848 m) herrscht ein Luftdruck von etwa 400 hPa. Deshalb siedet dort das Wasser bereits bei etwa 70°C .
- Dampfkochtopf. Das Wasser siedet aufgrund des erhöhten Drucks im Topf erst bei höheren Temperaturen. Damit lassen sich überhaupt höhere Temperaturen im Topf erzielen, was ein Garwerden der Speisen beschleunigt.
- Da auch Eichstätt auf etwa 420 m liegt und deshalb der Druck gegenüber dem Normaldruck verringert ist, ist die Siedetemperatur ebenfalls (geringfügig) verringert.

6.3.1 Verdunsten

☐ Kölnisch Wasser wird auf einen Wattebausch geträufelt und in ein Schälchen gelegt. Es wird der Temperaturverlauf gemessen.

„Verdampft“ eine Flüssigkeit

- an ihrer Oberfläche
- unterhalb ihrer Siedetemperatur,

so spricht man vom *Verdunsten* der Flüssigkeit. Die Flüssigkeit kühlt sich dabei ab.

Im Teilchenmodell kann dies so gedeutet werden: Einige Teilchen in der Flüssigkeit haben Geschwindigkeiten (eine Bewegungsenergie), die deutlich oberhalb des Durchschnitts liegen. Sie können die in der Nähe der Oberfläche herrschenden Kohäsionskräfte überwinden und die Flüssigkeit verlassen. Dies geschieht so lange, bis zwischen den Teilchen in und über der Flüssigkeit ein Gleichgewicht hergestellt ist.

Anwendungen, Beispiele.

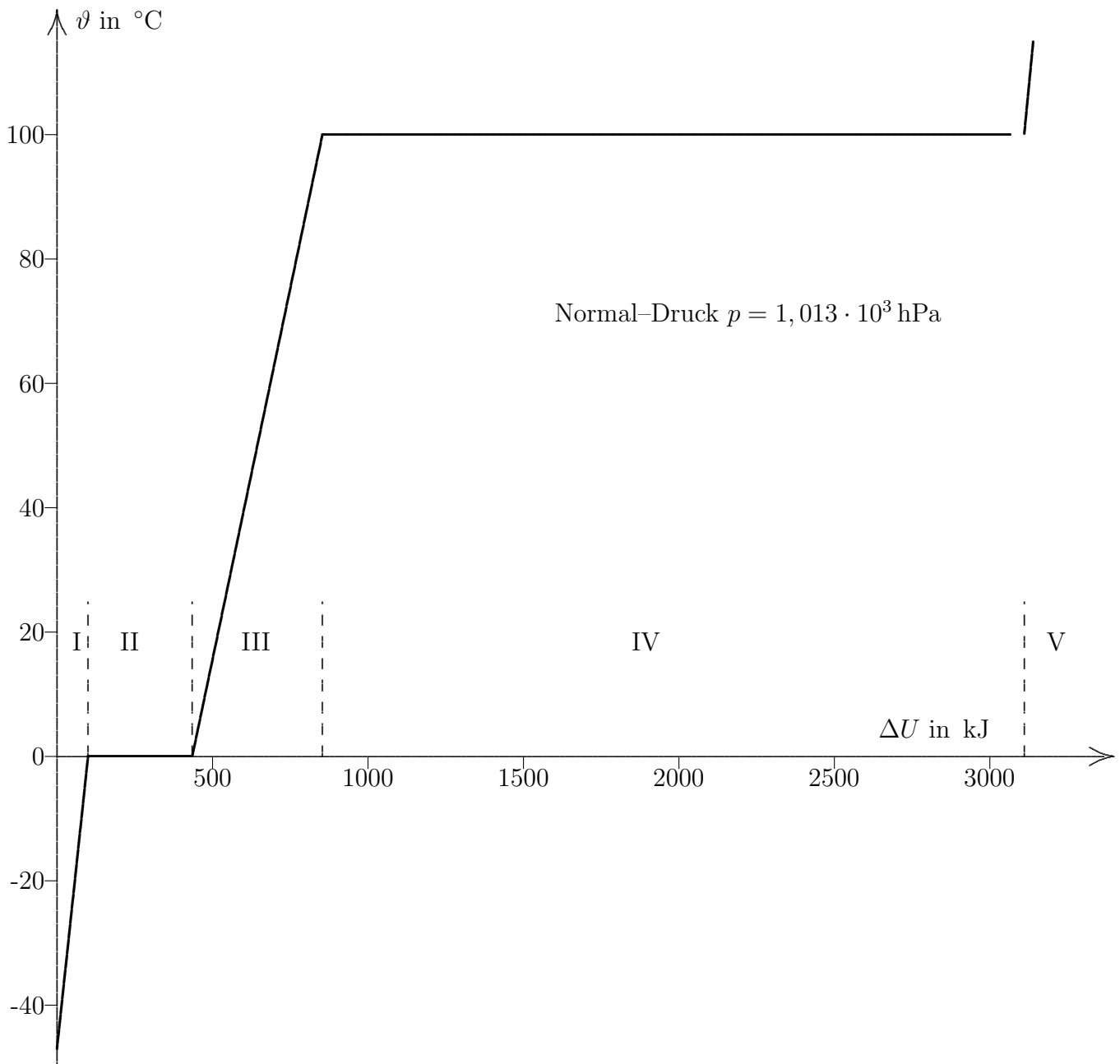
- Wasser, Parfum oder Schweiß verdunsten auf der Haut: Dabei wird der Haut Wärme entzogen, sie kühlt sich ab.
- Verschüttetes Benzin verdunstet.
- Verdunstung von Wasser über Gewässern. Feuchte Wäsche, Schwämme, Tücher trocknen an der Luft besonders gut, wenn Wind geht.
- An der Oberfläche von porösen Gefäßen (Ton) verdunstet Flüssigkeit. Der Inhalt (Getränk, Pflanze) bleibt kühl.
 - Weinkaraffe,
 - Blumentopf.

Der zur Verdunstung umgekehrte Prozess ist für das Beschlagen von kühlen Oberflächen verantwortlich. Auch die Wolkenbildung bedeutet eine umgekehrte Verdunstung.

6.4 Umwandlungsenergien

Umwandlungsenergien werden — nicht ganz korrekt — auch als „latente Wärmen“ bezeichnet.

V Die innere Energie von 1 kg Eis wird kontinuierlich durch Energiezufuhr (mittels Bunsenbrenner) erhöht. Dabei bleiben Stärke und Position der Flamme unverändert. Ergebnis: Es ergibt sich (stark schematisiert) der folgende t - ϑ -Verlauf bzw. ΔU - ϑ -Verlauf mit fünf charakteristischen Phasen:



I Das Eis wird erwärmt. Die Temperaturerhöhung ist direkt proportional zur Änderung der inneren Energie. Als Proportionalitätskonstante ergibt sich die spezifische Wärme von Eis:

$$c_{\text{Eis}} = \frac{\Delta U}{\Delta \vartheta} = \frac{100 \text{ kJ}}{1 \text{ kg} \cdot 47^\circ\text{C}} = 2,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

II Das Eis schmilzt. Obwohl sich während dieses Vorgangs die innere Energie laufend erhöht, bleibt die Temperatur konstant $\vartheta = 0^\circ\text{C}$. Die spezifische Schmelzenergie (= Erstarrungsenergie) ist

$$s_{\text{Eis} \leftrightarrow \text{Wasser}} = 335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

III Die Temperaturerhöhung des (flüssigen) Wassers ist direkt proportional zur Änderung der inneren Energie.

$$c_{\text{Wasser}} = \frac{\Delta U}{\Delta \vartheta} = \frac{419 \text{ kJ}}{1 \text{ kg} \cdot 100^\circ\text{C}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

IV Das Wasser verdampft. Während dieses Vorgangs bleibt die Temperatur — trotz Erhöhung der inneren Energie — konstant $\vartheta = 100^\circ\text{C}$. Die spezifische Verdampfungsenergie (= Kondensationsenergie) ist

$$r_{\text{Wasser} \leftrightarrow \text{Wasserdampf}} = 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

V Eine weitere Erhöhung der inneren Energie bewirkt eine weitere Temperaturerhöhung des Wasserdampfes. Je nach dem, ob diese unter konstantem Volumen (im Gefäß mit starren Wänden) oder bei konstantem Druck (im mit einem Stempel verschlossenen Gefäß) erfolgt, hat die spezifische Wärmekapazität den Wert von

$$c_{\text{Wasserdampf},v} = 1,38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad c_{\text{Wasserdampf},p} = 1,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Deutung im Teilchenmodell:

Während einer Zustandsänderung schlägt die zu- bzw. abgeführte Energie

- nicht für die Erhöhung (Erniedrigung) der Bewegungsenergien der Teilchen (\rightarrow Temperatur), sondern ...
- für die Veränderung der Bindungsenergien zu Buche.

V Der Temperaturverlauf beim Erwärmen, Schmelzen und weiteren Erwärmen von Eis (oder Naphthalin) wird mit Hilfe des computerbasierten Messwerterfassungssystems aufgezeichnet.

Phänomene und Anwendungen:

- Obst–Plantagen: Bei Frostgefahr in der Blütezeit werden die Blüten mit Wasser besprüht. Bei Unterschreiten von 0°C gefriert das Wasser und gibt Erstarrungsenergie an die Blüten ab. Zugleich bildet sich eine (besser) wärmeisolierende Eisschicht. Dadurch werden die Pflanzen geschützt.
- Brennwert–HeizAnlage: Der in den Abgasen enthaltene Wasserdampf wird über das zu erwärmende Wasser geführt. Dabei kondensiert er und gibt noch zusätzliche Energie an das Wasser ab.
- Wasserdampf enthält vergleichsweise hohe innere Energien.
 - Dies ist für den lokalen und globalen Energiehaushalt und -austausch, d.h. das Klima wesentlich.
 - In Kraftwerken wird im Ofen bzw. Reaktor Wasserdampf „erzeugt“, und so Energie zu den Turbinen transportiert,
 - Eierkocher: Der Wasserdampf kondensiert an den Eiern und gibt so Energie an sie ab.
- Verdunsten. Siehe Abschnitt 6.3.1.

Beachte: Treten bei der Mischung von Stoffen Zustandsänderungen auf, so müssen diese in der Energieaustauschbilanz berücksichtigt werden.

Beispiel: Wird ein Eisblock (Temperatur ϑ_1 , Masse m_1) in Wasser (Temperatur ϑ_2 , Masse m_2) gelegt, so erfolgt ein Temperaturnausgleich auf die Mischtemperatur ϑ_M , dem die folgende Bilanzgleichung zugrundeliegt:

$$c_{\text{Wasser}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_M) \cdot m_2 = \underbrace{c_{\text{Eis}} \cdot (0^\circ\text{C} - \vartheta_1) \cdot m_1}_I + \underbrace{s_{\text{Eis} \leftrightarrow \text{Wasser}} \cdot m_1}_{II} + \underbrace{c_{\text{Wasser}} \cdot (\vartheta_M - 0^\circ\text{C}) \cdot m_1}_{III}.$$

Dabei sind die Terme nummeriert entsprechend den Phasen in dem obigen Diagramm:

- I Energie zum Erwärmen des Eisblocks auf 0°C ,
- II Energie zum Schmelzen des Eisblocks,
- III Energie zum Erwärmen des Wassers (geschmolzenen Eises) auf die Mischtemperatur ϑ_M .

Je nach dem, welche der Größen bekannt (gemessen) sind, kann man eine andere berechnen (bestimmen), so zum Beispiel die spezifische Schmelzwärme $s_{\text{Eis} \leftrightarrow \text{Wasser}}$.

7 Die Teilchenvorstellung [⊕]

Unter der *Teilchenvorstellung* versteht man die Auffassung, dass die uns umgebende Materie (Körper) aus abgegrenzten Einheiten, eben den *Teilchen*, besteht.

Wir wollen im folgenden verschiedene Facetten dieser Vorstellung diskutieren.

- Die Teilchenvorstellung wird auch als *Teilchenmodell*, als *Teilchenkonzept* oder *Teilchenhypothese* bezeichnet. Hier kommen geringfügig andere Nuancen dieser Begriffe zum Ausdruck.
- Die gegenteilige Auffassung besteht gerade darin, dass die Materie kontinuierlich (oder homogen) im Raum verteilt ist.
- Die Teilchenauffassung ist heute durch zahlreiche experimentelle Befunde abgesichert und theoretisch ausgezeichnet fundiert.
- Diese Erkenntnis beruht auf einem langwährenden historischen Prozeß.
- Die Chemie hat gezeigt, dass Teilchen entweder *Atome* (griechisch $\alpha\theta\omega\mu\omega\sigma$: unteilbar) oder *Moleküle* (Verbindungen mehrerer Atome) sind.

Die obige These ist sehr allgemein formuliert. Es schließen sich viele weitere Fragen an, bei deren Formulierung man aber beachten muss, dass fragwürdige Begriffe verwendet werden.

1. Sind die Teilchen im Raum dicht verteilt oder gibt es noch Platz zwischen ihnen?
2. Kann man die Teilchen irgendwie klassifizieren? Sind alle gleich oder keine zwei gleich?
3. Was heißt überhaupt gleiche Teilchen? Durch welche Eigenschaften könnten sie als unterschiedlich oder identisch erkannt werden?
4. Welche Beziehungen bestehen zwischen den Teilchen? Was verleiht einem (makroskopischen) Körper seine Struktur?
5. Sind die Teilchen beweglich oder starr in ein „Gerüst“ eingebunden?
6. Wie groß sind Durchmesser, Volumen, Masse, Ladung eines Teilchens?
7. Haben die Teilchen eine innere Struktur? Sind sie teilbar?

Jeder dieser Aspekte wurde in einem historischen Prozess erarbeitet. Der Physiker muss bei der Beantwortung der Fragen darauf achten, dass allein Messungen — und nicht naiv übertragene Vorstellungen aus der Makrophysik — die Grundlage seiner Erkenntnis bilden.

Wir wollen gleich hier einige Antworten auf diese Frage vorwegnehmen.

7.1 Alltagsphänomene zur Teilchenvorstellung

Die folgenden Phänomene können mit Hilfe der Teilchenvorstellung anschaulich geklärt werden und damit die Teilchenvorstellung plausibel, wenn auch nicht: denknotwendig, machen.

- Verdunstung, Beschlagen. (\square Kölnisch Wasser, \rightarrow Geruch von Stoffen).
- Lösen von Stoffen (Ausfällen, Kristallwachstum), (\rightarrow Waschmittel, Putzmittel, Zucker im Tee).
- Spurenweise Verdünnung von Substanzen (Verschmutzung, Vergiftung).
- Geruch: Kaffeeduft im ganzen Haus, Parfum,
- Zunehmende Verkleinerung von Stoffen: Teilen von Butter, Kreide, ...
- Bremsspur, Bleistiftstrich, Ölfilm auf dem Wasser, Blattgold.

7.2 Die Teilchenvorstellung im Unterricht

- Aggregatzustände, Phasenübergänge: Es bestehen Kräfte zwischen den Teilchen (Modellvorstellungen: Federanordnung, Klebrige Gummibänder),
- Temperatur: Die Teilchen sind in ständiger Bewegung (auch in ruhenden, kalten Körpern),
- Innere Energie,
- Magnetisierung in Festkörpern: Elementarmagnete, Weiß'sche Bezirke,
- Chemie: Chemische Reaktionen (Multiple Proportionen),
- Vorgänge im Zusammenhang mit el. Strom: El. Leitung in Festkörpern, Flüssigkeiten, Gasen, Elektrolyse, Galvanische Elemente.

7.3 Didaktische Anregungen

- Wie kann man ein Kind, einen Erwachsenen von der Teilchenvorstellung überzeugen?
- Wo im Alltag wird die Teilchenvorstellung als plausible Erklärung für Phänomene herangezogen?
- Soll die Teilchenvorstellung in der Grundschule herangezogen werden?
- Was versteht man unter den Begriffen

Stoff, Masse, Körper, Materie, Element, Substanz, Menge, Gegenstand, Ding?

Stimmen sie überein? Wie kann man sie gegeneinander abgrenzen?

- Gibt es einen Lichtstoff oder einen Wärmestoff? Wie kann man die Antwort begründen?
- Woran denken Menschen heute bei Nennung des Begriffs „Atom“?

7.4 Experimente

- Verdünnungen aller Art: KMnO_4 -Kristall im Wasser,
- Gelöster Zucker im Wasser oder Tee,
- Teebeutel in heißes bzw. kaltes Wasser.
- Ölfleckversuch: Siehe Vorlesung „Aufbau der Materie“.
- Brown'sche Molekularbewegung: Siehe Vorlesung „Aufbau der Materie“.

7.5 Die Deutung der Aggregatzustände im Teilchenmodell

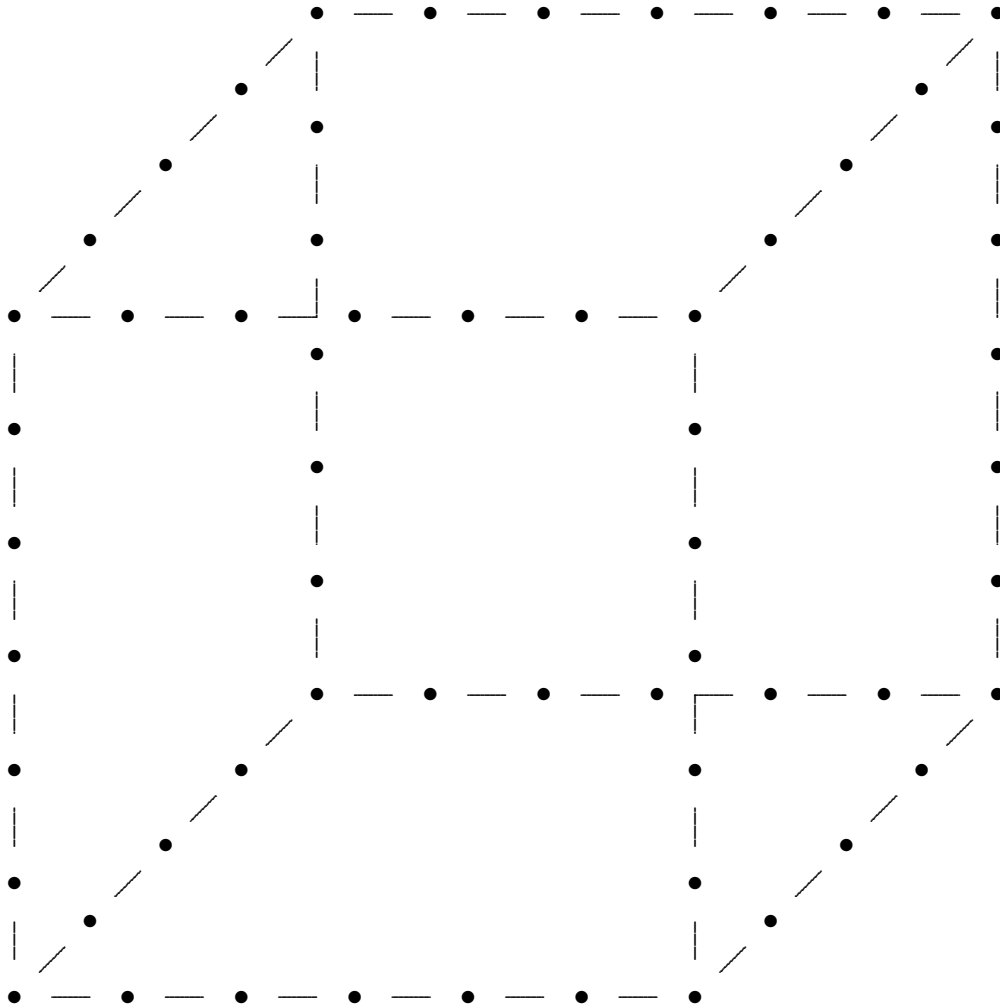
Die Aggregatzustände können innerhalb der Teilchenmodells als Auftreten verschiedener Qualitäten von Bindungskräften zwischen den Teilchen gedeutet werden.

- Festkörper: Die Teilchen unterliegen (im Vergleich zu äußeren Kräften) sehr großen Bindungskräften. Die Lage der Teilchen und die Abstände zwischen den Teilchen sind durch die Bindungskräfte festgelegt. Die Teilchen können lediglich um eine Ruhelage schwingen. Die Stärke der Schwingung ist ein Maß für die Temperatur.
- ≈ Flüssiger Körper: Die Kräfte zwischen den Teilchen sind zu den äußeren Kräften vergleichbar groß. Im wesentlichen sind die Abstände zwischen den Teilchen festgelegt. Sie können aber gegeneinander bewegt werden.
- ∴ Gasförmiger Körper: Die Kräfte zwischen den Teilchen sind gering. Die Teilchen können sich frei im zur Verfügung stehenden Raum (Gefäß, Schwerfeld der Erde) bewegen.

Es gibt verschiedene didaktisch orientierte Modellvorstellungen, die diese Deutung illustrieren:

- Die Teilchen werden durch Kugeln (beispielsweise durch Holzkugeln oder Tischtennisbälle) dargestellt.
 - Die im Festkörper auftretenden Bindungskräfte werden durch Federn modelliert.
 - ≈ Die Deutung des Flüssig-Zustandes bringt aber Schwierigkeiten mit sich.
 - ∴ Die Holzkugeln werden in ein Gefäß gegeben, wo sie wild durcheinander fliegen. Ein Rüttelapparat oder Gebläse zur Aufrechterhaltung der Bewegung kann leider nicht zur Realität in Analogie gesetzt werden.
- Alternativ könnten die Bindungskräfte als „klebrige Gummibänder“, die an den Kugeln befestigt sind, gedacht werden.
 - Der Aggregatzustand fest wird durch „verknottete“ Gummibänder dargestellt.
 - ≈ Die Bindungskräfte im Aggregatzustand flüssig werden durch die Verklebung der Gummibänder modelliert. Werden äußere Kräfte groß, so können sich die Verklebungen lösen, die Gummibänder mehr oder weniger leicht aneinander vorbeigleiten.
 - ∴ Die Gummibänder sind eng an die Kugeln angelegt und können sich deshalb nicht verkleben.

- Die Teilchen werden durch Kinder symbolisiert:
 - Die Kinder verhaken sich (mehr oder weniger stark) mit anderen Kindern in der Nähe.
 - ≈ Die Kinder geben sich locker die Hand und bewegen sich dabei leicht — unter gelegentlichem Loslassen und Wiedergreifen der Hände — gegeneinander.
 - ∴ Die Kinder laufen (mit grösseren Abständen) wild durcheinander.



8 Übertragung von Wärme

8.1 Wärmeleitung

V

- Wachsringe über der Kupferstange,
- Wärmeleitungsapparat,
- Streichhölzer auf dem Metallkreuz.

Breitet sich Wärme innerhalb eines Körpers oder bei „Kontakt“ zwischen zwei Körpern **aufgrund eines Temperaturunterschieds** aus, so spricht man von *Wärmeleitung*.

Das zugrundeliegende physikalische Gesetz (für das Modell eines homogenen Stabes) lautet

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{1}{\ell} \cdot (T_2 - T_1) \cdot t$$

Dabei bedeuten

Q	J	übertragene Wärme
λ	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes
A	m^2	Querschnittsfläche des Stabes
ℓ	m	Länge des Stabes
$T_2 - T_1$	K	der Temperaturunterschied
t	s	die Zeitspanne

- Lies aus der Formel ab, welche Maßnahmen man ergreifen kann, um die Wärmeleitung gering zu halten!
- Beachte die Analogie zum Gesetz über die el. Leitfähigkeit:

$$\frac{Q}{t} = \varrho \cdot \frac{A}{\ell} \cdot \underbrace{(\varphi_2 - \varphi_1)}_U$$

- Es ergeben sich daraus — wie immer — die verschiedensten Möglichkeiten für Elementarisierungen (verbal: direkt proportional, je — desto).
- Die Wärmeleitfähigkeit korrespondiert mit der el. Leitfähigkeit. Auffällig ist dies besonders bei Metallen. Hier sorgen die freien Elektronen für die gute Wärme- bzw. el. Leitfähigkeit.

- Bei Baustoffen (Styroporplatten, Glaswollschichten, Ziegelsteinmauern) sind im allgemeinen der Stoff und die „Dicke“ (= Länge des Materials ℓ) vorgegeben. Mit der Definition des „ k -Werts“ (Wärmedurchgangskoeffizient)

$$k := \frac{\lambda}{\ell} \quad [k] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

ergibt sich das Gesetz:

$$\frac{Q}{t} = k \cdot A \cdot \Delta T.$$

Frage: Wie verhält sich der k -Wert bei ...

- „Parallelschaltung“ (Zwei Schichten nebeneinander)?
- „Hintereinanderschaltung“? (Zwei Schichten hintereinander)?

Einige Werte für Wärmeleitfähigkeiten:

Stoff	λ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$
Diamant	2000
Silber	417
Kupfer	384
Eisen	70
Aluminium	234

Stoff	λ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$
Stein	250
Ziegel	100
Beton	100
Glas	80
Holz	15

Stoff	λ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$
Glaswolle	4
Styropor	4
Wasser	0,6
Luft	0,025

Anwendungen von „guter“ Wärmeleitfähigkeit:

- Tauchsieder: Die Wendel besteht — von innen nach außen betrachtet — aus einem Draht, einer Keramikhülle und einem Metallmantel. Keramik ist nicht el. leitfähig und halbwegs gut wärmeleitfähig.
- (Gerippte) Kühlkörper bei Motoren oder elektronischen Bauteilen.
- Kochgeräte und Kochgeschirr: Über den Boden muss ein guter Wärmekontakt zur Herdplatte hergestellt werden.
- Meßfühler von Thermostaten.
- Flüssiges Natrium wird zur Kühlung bei Bremsen oder Hochtemperaturreaktoren verwendet.

Anwendungen von „schlechter“ Wärmeleitfähigkeit (\rightarrow Wärmeisolierung, Energiesparen):

- Baustoffe:
 - Baumaterial mit eingelagerter Luft: Styropor, Glaswolle, Ziegelsteine mit Luftkammern.
 - Doppel- oder Dreifachverglasung bei Fenstern.

– Klebesteine zur Vermeidung von Mörtelfugen (= Kältebrücken).

- Thermosgefäße aller Art: Kühlboxen, Kühlgeräte, Thermosflaschen, Dewargefäße in Labors.
- Griffe an Gefäßen werden aus schlecht wärmeleitfähigen Stoffen (Holz, Kunststoff) gefertigt, um das Anfassen zu erleichtern. Die Wärmeleitfähigkeit wird auch dadurch herabgesetzt, dass man die Kontaktflächen verkleinert und die Griffe verlängert. Dies verringert aber die Stabilität.
- Kleidung: Sie hat die Aufgabe, eine Luftschicht um den Körper zu halten.
- Fettaugen auf der Suppe verhindern ein rasches Abkühlen.
- Eine Suppe kühlt am Tellerrand schneller ab als in der Tellermitte.
- Ein Metallöffel im heißen Tee erhöht die Wärmeleitung zwischen Tee und Luft. Der Tee kühlt schneller ab.

8.2 Wärmestrahlung

□ Stelle eine Wärmelampe (Wärmestrahler, mit Hohlspiegelreflektor) auf. In etwa 2 m Entfernung wird die Temperatur gemessen.

- Der Wärmestrahler ist ausgeschaltet $\vartheta \approx 20^\circ\text{C}$.
- Der Wärmestrahler wird eingeschaltet. In Richtung der Abstrahlung stellt man eine Temperaturerhöhung auf $\vartheta \approx 30^\circ\text{C}$ fest, seitlich tritt keine Temperaturerhöhung auf. Dies kann man auch qualitativ fühlen, indem man die beiden Hände in die bzw. außerhalb der Abstrahlrichtung hält.
- In Richtung der Abstrahlung wird ein Hohlspiegel aufgestellt, in seinem Brennpunkt („halber Radius“) kann man eine Temperatur von etwa $\vartheta \approx 50^\circ$ messen.

Wird Wärme — ähnlich wie Licht — durch Strahlung übertragen, so spricht man von *Wärmestrahlung*. Sie breitet sich auch im Vakuum aus.

Als Gesetz liegt das Planck'sche Strahlungsgesetz zugrunde: Es gibt das Spektrum der ausgesandten elektromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von der Temperatur des aussendenden Körpers an. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich der Körper mit dem umgebenden Strahlungsfeld im thermodynamischen Gleichgewicht befindet, insbesondere also keine Strahlung von außen beteiligt ist („Schwarzer Körper“).

Phänomene und Anwendungen:

- Wärmestrahlung der Sonne aus dem All.
- Auch der Wärmetransport innerhalb der Sonne (vom Kern zum Mantel) erfolgt hauptsächlich durch Wärmestrahlung, die anderen Arten der Wärmeübertragung sind auch beteiligt.
- In klaren Nächten wird es sehr kalt, da die Erdoberfläche Wärme in den Weltraum abstrahlen kann.
- Treibhauseffekt: Die Kohlendioxidanreicherung hält einen Teil der von der Erde abgestrahlten Wärme zurück. → Die Temperaturen auf der Erde steigen, das Polareis schmilzt, Klimaveränderungen, Verschiebung von Klimazonen.
- Wärmestrahler, Wärmelampen (IR-Lampen, nicht UV-Lampen),
- Bei der Isolation von Bauten oder Gefäßen werden spiegelnde Oberflächen verwendet: Rettungsdecke, Alufolie oder Stanniolpapier zur Verpackung (Schokolade, Mohrenköpfen, . . .), Thermosflasche, Dewar-Gefäß, Abdeckung von Schwimmbecken, Auskleidung von Schlafsäcken, Rollos.

8.2.1 Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung

□ Ein Blatt weißes glattes Papier und ein Blatt dunkles Schleifpapier werden mit einer Wärmelampe bestrahlt. Das Schleifpapier erwärmt sich schneller.

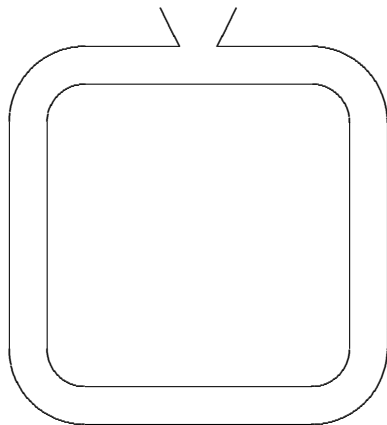
Je dunkler, rauher und größer die Oberfläche eines Körpers, desto besser kann er Wärmestrahlung absorbieren (aufnehmen) oder emittieren (aussenden).

Beispiele:

- Araber tragen helle Kleidung.
- Solarwärmekollektoren oder Solarzellenfelder sind dunkel ausgekleidet.
- Der Schnee auf einem dunklen Acker schmilzt eher als der auf der hellen Wiese.
- Kühlkörper in Elektrogeräten werden schwarz lackiert, um eine bessere Abstrahlung (Emission) von Wärmestrahlung zu erreichen.

8.3 Wärmeströmung

V Das Zentralheizungsmodell ist ein rechteckig geformtes Glasrohr mit einer seitlichen Öffnung.



In das sicher aufgehängte Glasgefäß wird Wasser eingefüllt. Einige Körner Kaliumpermanganat (KMnO_4) zur Sichtbarmachung der Wasserströmung werden eingestreut. Erwärmt man das Glasrohr an einer unteren Ecke (sie wird zur Sicherheit mit einem Drahtgeflecht umhüllt), so kommt es zur Strömung des Wassers.

Wird Wärme durch Bewegung flüssiger oder gasförmiger Körper übertragen, so spricht man von *Wärmeströmung* (= *Konvektion*).

Phänomene, Anwendungen

Äußerer Antrieb:

- Fön, Ventilator.
- Kühlung von Motoren, Maschinen, Transformatoren oder Prozessoren durch Luft, Öl oder Wasser.
- Kühlkreisläufe (Wasser, flüssiges Natrium) in Kraftwerken, Maschinen, Autos,...
- Umwälzpumpen in Heizungsanlagen.
- Umrühren von Flüssigkeiten.

Innerer Antrieb: Der Mechanismus besteht in der Wirkungskette

Höhere Temperatur \longrightarrow Höheres Volumen \longrightarrow Geringere Dichte \longrightarrow Auftrieb
in der Umgebung.

- Flammen, Kletterfunken.
- Zimmerluft zirkuliert aufgrund der Heizung.
- Thermiken, sie ermöglichen den Segelflug.
- Kamin (Freihandexperiment mit Pappkarton).
- Weihnachtspyramide
- Seewind — Landwind
- Galilei-Thermometer
- Lava-Lampe

Globale Meeres- oder Luftströmungen (Passatwinde, Golfstrom) werden durch verschiedene Mechanismen angetrieben.

8.4 Zusammenfassung

Bei der Übertragung von Wärme handelt es sich um irreversible Vorgänge: Ein Ungleichgewichtszustand (Verschiedene Temperaturen) soll ausgeglichen werden. Diese Vorgänge laufen spontan nur in einer Richtung ab. In ihrer physikalischen Beschreibung spielt die Zeit eine Rolle.

9 Anhang [⊖]

9.1 Verbrennungsmotoren

V Modellversuch Benzinverbrennung in einer Pappröhre. (Vorsicht!):

- In einer Pappröhre (zum Versenden von Posters) befindet sich seitlich — etwa 5 cm vom Boden entfernt — ein Loch von etwa 5 mm Durchmesser.
- Es werden mehrere mit Benzin beträufelte Korkstückchen in die Pappröhre gelegt. Diese wird dann senkrecht auf den Boden gestellt und mit dem zugehörigen Plastikdeckel verschlossen.
- Führt man ein brennendes Streichholz in die seitliche Öffnung, so entzündet sich das inzwischen verdunstete Benzin innerhalb der Pappröhre. Der Deckel schießt senkrecht nach oben.

9.1.1 Der Ottomotor

VERGLEICHE ABBILDUNG AUF DEM BEIBLATT.

Technische Begriffe: Hubraum, Vergaser, Drosselklappe, Nockenwelle, Kurbelwelle, 4-Zylinder, Zündkerze, Einspritzer, Kolben, Pleuelstange, Zündverteiler.

Während zwei Umdrehungen (unterteilt in vier Takte) geschehen folgende Prozesse:

1. Takt Ansaugtakt: Ein Gas-Gemisch aus Luft und Benzin wird aus dem Vergaser in den Zylinder angesaugt.

KB Nach unten EV Offen AV Geschlossen

2. Takt Verdichtungstakt: Das Gemisch wird zusammengepreßt.

KB Nach oben EV Geschlossen AV Geschlossen

3. Takt Arbeitstakt: Der Funke der Zündkerze entzündet das Gemisch (Fremdzündung). Es entstehen hohe Temperaturen und Drücke. Innere (chemische) Energie des Benzins wird in Bewegungsenergie (des Kolben) umgesetzt.

KB Nach unten EV Geschlossen AV Geschlossen

4. Takt Auspufftakt: Die Verbrennungsgase werden aus dem Zylinder gedrückt.

KB Nach oben EV Geschlossen AV Offen

9.1.2 Der Dieselmotor

Ein Dieselmotor arbeitet sehr ähnlich wie ein Otto–Benzin–Motor. Hier werden deshalb nur die entscheidenden Unterschiede beschreiben:

1. Takt Ansaugtakt: Es wird reine Luft angesaugt.
2. Takt Verdichtungstakt: Die Luft wird sehr stark komprimiert. Sie erwärmt sich auf ca. $600\text{ }^{\circ}\text{C} - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Takt Arbeitstakt: Es wird fein zerstäubtes **flüssiges** Dieselöl eingespritzt, das sich infolge der hohen Temperatur selbst entzündet (Eigenzündung). Es entsteht ein sehr hoher Druck.
4. Takt Auspufftakt: Wie oben.

Vorteile: Ein Dieselmotor braucht keinen Vergaser und keine Zündkerzen einschließlich Steuerung. Der Motor ist sehr robust und kräftig, weshalb er in Lokomotiven, Schiffen oder Traktoren Verwendung findet. Der Kraftstoff ist weniger gefährlich. Die Abgase sind weniger giftig, sondern „schmutzig“.

Nachteile: Der Motor muß wesentlich robuster, d.h. schwerer, gebaut werden. Er ist weniger flexibel (spritzig) als ein Otto-Motor. Bei niedrigen Temperaturen im Winter kann es passieren, dass der Kraftstoff ausflockt und die Leitungen verstopft.

9.1.3 Der Zweitaktmotor

VERGLEICHE ABBILDUNG AUF DEM BEIBLATT.

Während einer Umdrehung (unterteilt in zwei Takte) geschehen folgende Prozesse:

Beginn

1. Takt Der Kolben befindet sich ganz unten. In diesem Moment wird das im vorigen Takt verbrannte Benzin durch den Auslaßkanal ausgestoßen. Gleichzeitig fließt durch den Überströmkanal ein (unverbrauchtes) Benzin-Luft-Gemisch vom Kurbelgehäuse (unterhalb des Kolbens) in die Verdichtungskammer (oberhalb des Kolbens). Ein kleiner Teil des neu eingeströmten Benzins verläßt dabei gleich wieder durch den Auslasskanal die Verdichtungskammer (\rightarrow Stinken und Qualmen der Zweitaktmotoren, siehe Rasenmäher oder Trabi). Die Nase auf dem Kolben verhindert (zum Teil) diesen unerwünschten Effekt.

EK Geschlossen ÜK Offen AK Offen

1. Takt Der Ansaug- und Verdichtungstakt.
In der Kammer oberhalb des Kolbens wird das Benzin-Luft-Gemisch zusammengedrückt.
In der Kammer unterhalb des Kolbens wird durch den Einlaßkanal ein (neues) Benzin-Luft-Gemisch eingesaugt.

KB Nach oben EK Offen ÜK Geschlossen AK Geschlossen

2. Takt Der Arbeitstakt: In der Kammer oberhalb des Kolbens wird das Benzin-Luft-Gemisch durch einen Zündfunken entzündet. Der Kolben wird nach unten gedrückt.
In der Kammer unterhalb des Kolbens wird weiter durch den Einlasskanal (neues) Benzin-Luft-Gemisch eingesaugt.

KB Nach unten EV Offen ÜK Geschlossen AV Geschlossen

Vorteile: Bei diesem Motor ist keine komplizierte und mechanisch aufwändige Steuerung von Ventilen notwendig. Die Ein- und Auslaßregelung übernimmt direkt der Kolben. Der Motor ist weniger anfällig und billiger.

Nachteile: Die teilweise Durchmischung von unverbrauchtem und verbranntem Benzin verursacht eine Leistungsminderung. Der Ausstoß von unverbranntem Benzin ist umweltschädlich.