Thermodynamik

in 12 Stunden

Ein Crash-Kurs für Leistungskurse

unter besonderer Berücksichtigung

des eigenverantwortlichen

Lesens und Lernens

von G. Heinrichs und A. Dämbkes

Version 04.05.2008

Übersicht

0. Einführung: Qualitative Überlegungen anhand eines einfachen Heißluftmaschinenexperiments - Anweisungen zum Umgang mit dem Material (Arbeitsmappe)

1. Gesetze für ideale Gase

2. Die universelle Gasgleichung

3. Druck und Teilchenbewegung

4. Innere Energie
   Die Untersuchungen beschränken sich auf ideale Gase und auf Prozesse mit V=konst. Nur diese werden bei der HLM benutzt. Dementsprechend werden cp und cV auch nicht explizit erwähnt.

5. 1. Hauptsatz
   Experiment: 1. Phase der HLM; Ausdehnungs- bzw. Volumenarbeit, Wärme, 1. Hauptsatz

6. 2. Hauptsatz
   Experimente mit der HLM und der Wärmepumpe: Untersuchungen zum Kreisprozess bei HLM und Wirkungsgrad

7. Entropie und Dissipation

8. Ergänzung (fakultativ)

Anweisungen

Lege für diesen Thermodynamik-Kurs eine gesonderte Mappe an. In diese Mappe sollen die Blätter dieses Skripts, aber auch die eigenen Beiträge dazu abgeheftet werden. Führe die Mappe konsequent und ordentlich – sie wird am Ende (und ggf. auch zwischendurch) eingesammelt und bewertet werden.

Zu jedem Lesetext gibt es Fragen und Aufgaben. Mithilfe der Fragen kannst du überprüfen, ob du den Text verstanden hast. In den Aufgaben sollst du dein erworbenes Wissen anwenden. Häufig gibt es auch einen Abschnitt, der Ergänzungen zum Grundwissen liefern soll. Manchmal musst du auch eigene Recherchen betreiben. Denke dabei daran, dass es neben dem Internet auch andere Informationsquellen gibt.

Zu dem Skript gibt es auch eine CD mit Videos von Experimenten zur Thermodynamik.

1. Gesetze für ideale Gase

1.1 Lies den folgenden Lehrbuchtext (aus: Klett: Impulse 2, S. 295) sorgfältig durch! Ziel: Zusammenhänge verstehen und wiedergeben können.

Zustandsgrößen und das ideale Gas

Gase nehmen immer den für sie verfügbaren Raum ein. Darin unterscheiden sie sich von Flüssigkeiten und Festkörpern. Im Gegensatz zu ihnen lassen sich Gase durch äußeren Druck stark komprimieren. Dabei erwärmt sich das Gas, was sich z. B. beim Pumpen mit der Luftpumpe beobachten lässt. Diese Beobachtungen legen es nahe, die Größen Volumen, Temperatur und Druck zur Beschreibung des Zustandes eines Gases zu nutzen, sie heißen deshalb ***Zustandsgrößen.***

Experimente zeigen, dass bei konstantem Druck das Volumen V einer eingeschlossenen Gasmenge linear von ihrer Temperatur ϑ abhängt (Abb. ► 1a). Wird das Anfangsvolumen V_0 verändert, so ändert sich die Steigung der Geraden. Denkt man sich diese Geraden in den Bereich negativer Temperaturen verlängert, so schneiden alle Geraden die Temperaturachse im gleichen Punkt bei $\vartheta = -273$ °C.

Wird in einer anderen Versuchsreihe die Änderung des Druckes p einer Gasmenge bei konstantem Volumen in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ gemessen, so ergeben sich ebenfalls Geraden, die alle die Temperaturachse im gleichen Punkt bei $\vartheta = -273$ °C schneiden (Abb. ► 1b).

Die Temperatur $\vartheta = -273$ °C (genauer $-273{,}15$ °C) heißt ***absoluter Nullpunkt.*** Wird diese Temperatur als Nullpunkt einer Skala mit der gleichen Einteilung für Temperaturunterschiede wie auf der Celsiusskala gewählt, so spricht man von der ***absoluten Temperatur*** T mit der Einheit 1 Kelvin (K). Bezeichnet ϑ die Temperatur in °C, so gilt:
$T = (273 + \vartheta/°C)$ K

Mit der absoluten Temperatur ausgedrückt werden die Geraden Abschnitte von Ursprungsgeraden. Hiermit gelten folgende Beziehungen (Abb. ► 3):

$V =$ Konstante $\cdot\, T$,
wenn der Druck p konstant bleibt.
Dies ist das ***Gesetz von Gay-Lussac.***

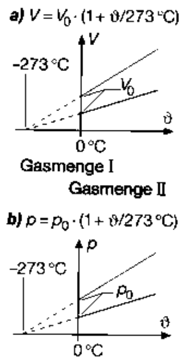
$p =$ Konstante $\cdot\, T$,
wenn das Volumen V konstant bleibt.
Dies ist das ***Gesetz von Amontons.***

Beim Komprimieren von Gasen bei konstanter Temperatur T gilt ferner das ***Gesetz von Boyle und Mariotte:***
$p \cdot V =$ Konstante

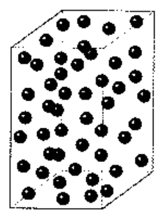
Die Gesetze von Gay-Lussac und Amontons werden experimentell für einen kleinen Temperaturbereich bestätigt. Die Extrapolation der Geraden bis zum absoluten Nullpunkt ist nur theoretisch. Sie setzt voraus, dass die Gasteilchen kein eigenes Volumen haben und eine betrachtete Gasmenge theoretisch das Volumen null annehmen kann.

Weiter wird vorausgesetzt, dass keine Kräfte zwischen den Gasteilchen wirken, alle Stöße vollkommen elastisch sind und die gesamte Energie als kinetische Energie der Teilchen vorliegt. Ein gedachtes Gas mit solchen Eigenschaften heißt ***ideales Gas.***

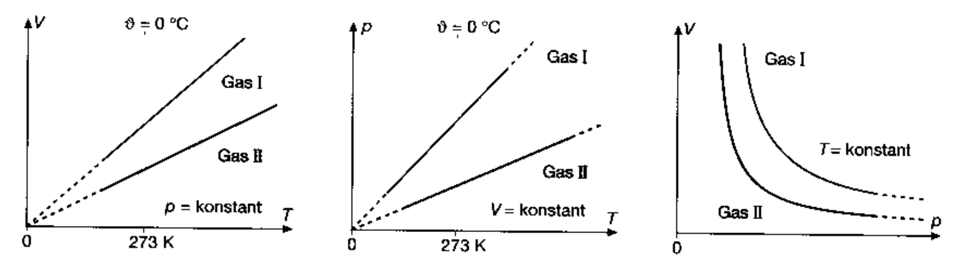
Reale Gase nähern sich bei niedrigem Druck, hinreichend großem Volumen und nicht zu tiefer Temperatur in ihrem Verhalten dem idealen Gas an.



1 Thermische Änderungen von Zustandsgrößen



2 Teilchen im Gas



3a) Gesetz von Gay-Lussac *b)* Gesetz von Amontons *c)* Gesetz von Boyle und Mariotte

Thermodynamik **295**

1.2 Alles klar?

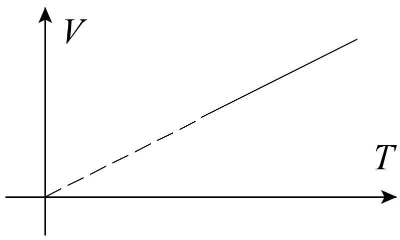
1.2.1 Nenne die drei zur Beschreibung eines Gases benutzten Zustandsgrößen:

1.2.2 Auf welche 2 Weisen gelangt man zur Vorstellung des absoluten Nullpunktes?

1.2.3 Ergänze die Tabelle:

Temperatur in °C	-250	0	30	100	
Temperatur in K					2 000 000

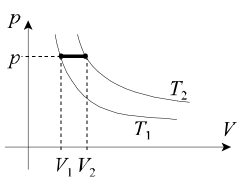
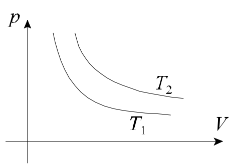
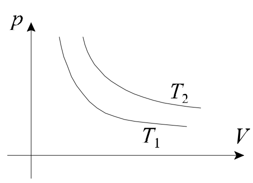
1.2.4 Skizziere in das rechts stehende *V*-*T*-Diagramm den Graphen eines realen Gases



1.3 Ergänzungen

1.3.1 Recherchiere die Begriffe *isobar*, *isochor* und *isotherm*.

1.3.2 Fülle die folgende Tabelle aus:

Zustandsänderung	isobar		
konstante Zustandsgröße		T	
Gesetz			
Beispiel *)			
Darstellung im p-V-Diagramm			

*) Wähle hier aus: langsames Betätigen einer Luftpumpe an einem Fahrradschlauch - Erwärmen eines Gases in einer Gasflasche - Erwärmen der Luft in einem Wohnraum

1.4 Aufgaben

1.4.1 Musteraufgabe (aus PAETEC: Physik, S. 195)

Bei 15 °C beträgt der Druck im Reifen eines Pkw 240 kPa. Durch schnelle Autobahnfahrt auf sonnenbeschienener Strecke erhöht sich die Temperatur im Reifen auf 50 °C.
Auf welchen Wert vergrößert sich der Reifendruck?

Analyse:
Ein Pkw-Reifen ist so konstruiert, dass sich sein Volumen bei Druckänderung im normalen Betriebsbereich kaum verändert. Man kann deshalb von einer isochoren Zustandsänderung (V = konst.) ausgehen.

Da sich Luft annähernd wie das ideale Gas verhält, kann das Gesetz von AMONTONS angewendet werden.

Gesucht: p_2
Gegeben: $p_1 = 240\ \text{kPa}$
$T_1 = 288\ \text{K}$
$T_2 = 323\ \text{K}$

Lösung:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Umstellen nach p_2 ergibt:

$$p_2 = T_2 \cdot \frac{p_1}{T_1}$$

$$p_2 = \frac{323\ \text{K} \cdot 240\ \text{kPa}}{288\ \text{K}}$$

$$\underline{p_2 = 269\ \text{kPa}}$$

Ergebnis:
Bei einer Temperaturerhöhung um 35 K erhöht sich der Reifendruck von 240 kPa auf etwa 270 kPa, also um etwa 10 %.

1.4.2

Ein Autoreifen wird bei 15 °C bis zum Druck von 210 kPa aufgepumpt. Während der Fahrt erwärmt sich die Luft im Reifen auf 40 °C. Welcher Bruchteil der Luft müsste nun abgelassen werden, damit wieder der ursprüngliche Druck im Reifen herrscht? (Warum sollte man dies jedoch nicht tun?)
Hinweis: Betrachte 3 geeignete Situationen S_1, S_2 und S_3. Um welche Art von Übergang handelt es sich bei den Vorgängen $S_1 \rightarrow S_2$ bzw. $S_2 \rightarrow S_3$?

2. Die universelle Gasgleichung

2.1 Lies den folgenden Lehrbuchtext (aus: Klett: Impulse 2, S. 296) sorgfältig durch! Ziel: Wesentliche Ergebnisse für ideale Gase angeben und anwenden können.

> ***Die universelle Gasgleichung***
>
> Die drei Gasgesetze lassen sich mathematisch zu einer Formel mit gleicher physikalischer Aussage vereinigen:
>
> $p \cdot V = c \cdot T$ mit c als neue Konstante
>
> Die Überprüfung mit Versuchen zeigt, dass die Konstante c proportional zur betrachteten Stoffmenge ist. Aus der Annahme, dass das Gas aus Teilchen besteht, folgt, dass der Quotient $p \cdot V/T$ proportional zur Anzahl N der Gasteilchen ist. Damit gilt eine ***universelle Gasgleichung,*** die alle Zustandsgrößen eines idealen Gases erfasst:
>
> Für ein ideales Gas mit dem Volumen V und der Teilchenzahl N, dem Druck p und der Temperatur T gilt:
>
> $p \cdot V = k \cdot N \cdot T$ mit $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K
>
> Die Proportionalitätskonstante k heißt ***Boltzmann-Konstante.***
>
> Wird die Anzahl N der Teilchen, wie in der Chemie üblich, in der Einheit der Stoffmenge 1 mol $= 6{,}022 \cdot 10^{23}$ Teilchen angegeben, dann ergibt sich:
>
> $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
>
> Dabei ist n die Anzahl der Gasteilchen in mol. $R = k \cdot N/n$ heißt ***Gaskonstante.*** Es ist $R = 8{,}31$ J/(K · mol).
>
> Das Verhalten ***realer Gase*** wird besser erfasst, wenn man nach ***van der Waals*** in der universellen Gasgleichung das Eigenvolumen b der Gasteilchen und die Drucksenkung a/V^2 infolge gegenseitiger Anziehung beachtet. a und b sind von der Gasart abhängig. Es gilt:
>
> $\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = C \cdot T$ mit $C =$ konst.

2.2 Alles klar?

2.2.1 Wie groß ist die Teilchenzahl bei 10 mol eines Gases?

2.2.2 Die universelle Gasgleichung für ideale Gase gibt es in zwei Varianten. Wodurch unterscheiden sich diese?

2.3 Ergänzungen

2.3.1 Wiederhole/Recherchiere: Was versteht man unter 1 mol? Welche Größe wird in dieser Einheit angegeben? Wie viel mol entsprechen 36 g Kohlenstoff (^{12}C)?

2.3.2 Berechne die Gaskonstante aus der Boltzmann-Konstanten.

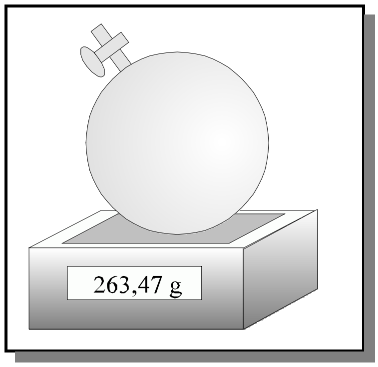
2.3.3 Bei allen idealen Gasen hat jeweils 1 mol bei 1013 hPa (***Normaldruck***) und 0 °C (***Normaltemperatur***) dasselbe Volumen. Bestimme dieses.
Achtung: In der Chemie werden meist andere *Normalbedingungen* benutzt!

2.3.4 Die Masse von 1 mol eines Stoffes bezeichnet man als ***Molmasse***. Bestimme die Molmasse von H_2, CH_4, O_2, Cl_2. Benutze das Periodensystem!

2.3.5 Welche Eigenschaften von realen Gasen werden bei idealen Gasen vernachlässigt?

2.4 Aufgaben

2.4.1 In der 1-Liter-Glaskugel befindet sich O_2 bei Normaldruck und Normaltemperatur. Die Waage zeigt 264,90 g an. Nun wird die Glaskugel evakuiert. Jetzt zeigt die Waage 263,47 g. Bestimme daraus die Gaskonstante.



2.4.2 Die Luft in einem Wohnhaus habe ein Volumen von 600 m^3. Wie groß ist ihre Masse bei 0 °C und 1013 hPa? Nun steigt die Temperatur um 25 °C an. Welche Masse hat die dabei ausströmende Luft?
Recherchiere zuerst die Zusammensetzung der Luft; du brauchst nur die beiden wichtigsten Gase berücksichtigen.

2.4.3 Im Anhang eines Physikbuchs (PAETEC Physik GO, S. 569) findet man folgende Definition für das MOL: *Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso viel Einzelteilchen (Atome, Moleküle, Ionen) besteht, wie Atome in dem Kohlenstoffnuklid* ^{12}C *vorhanden sind.*
Entdecke den Fehler!

3. Druck und Teilchenbewegung

3.1 Lies die beiden folgenden Lehrbuchtexte (aus: Klett: Impulse 2, S. 296 f) sorgfältig durch! Ziel: Zusammenhänge verstehen und wiedergeben können.

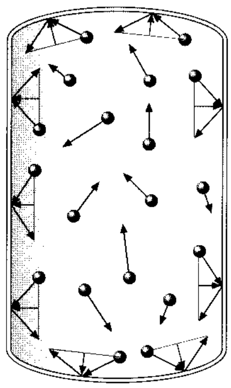
Druck und Teilchenbewegung

Druck und Temperatur sind im Modell der Teilchen statistische Größen, die nur für eine große Anzahl von ihnen sinnvoll sind. Dem einzelnen Teilchen kann man weder Druck noch Temperatur zuordnen.

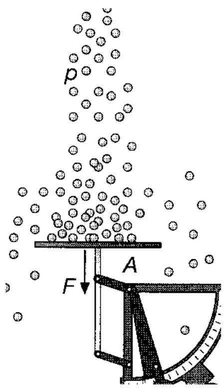
Der Druck einer in einem Behälter eingeschlossenen Gasmenge macht sich durch Kräfte senkrecht zu den Begrenzungsflächen bemerkbar. Dieser Druck ist als Folge einer ungeordneten Teilchenbewegung zu erklären (Abb. ► 1).

In der Zeitspanne Δt prallen sehr viele Teilchen auf ein Wandstück und werden reflektiert. Dadurch erfährt jedes Teilchen eine Impulsänderung Δp. Der Quotient aus der Summe aller Impulsänderungen und der Zeitspanne Δt ergibt, nach dem Wechselwirkungsprinzip, die Kraft auf das Wandstück.

Die Impulsübertragung vieler Teilchen auf eine Gefäßwand ist als Druck des Gases messbar.



1 Gasdruck entsteht durch Impulsübertragung beim Stoß gegen die Gefäßwand.



2 Aufprallende Stahlkugeln wirken wie Druck auf die Wand eines Behälters.

Dies veranschaulicht z. B. der Aufprall vieler auf die Platte einer Briefwaage fallender Stahlkugeln (Abb. ► 2). Folgen die Stahlkugeln schnell genug aufeinander, dann zeigt die Waage eine konstante Kraft an.

Bei der großen Anzahl der Teilchen eines Gases ist es unmöglich, die Bewegung jedes einzelnen Teilchens zu verfolgen, um daraus seinen Anteil zum Druck berechnen zu können. Mit Hilfe der Begriffe Mittelwert und Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit sind jedoch folgende Aussagen möglich:

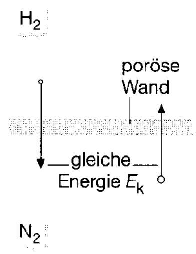
Bezeichnet $\overline{E_k} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$ die mittlere kinetische Energie eines Gasteilchens, wobei $\overline{v^2}$ den Mittelwert der Quadrate der Geschwindigkeiten aller Teilchen ***bezeichnet, dann gilt:***

Das Produkt aus Druck p und Volumen V eines Gases ist proportional der mittleren kinetischen Energie der Teilchen:
$p \cdot V = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \overline{E_k}$

Mit der universellen Gasgleichung $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ lässt sich ein Zusammenhang zwischen der absoluten Temperatur T und der mittleren Bewegungsenergie $\overline{E_k}$ der Gasteilchen herstellen. Es ist: $N \cdot k \cdot T = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \overline{E_k}$
Die Teilchen idealer Gase haben bei der Temperatur T die mittlere Bewegungsenergie $\overline{E_k} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$.

Daraus ergibt sich für jede der drei Raumrichtungen im Mittel eine mittlere kinetische Energie der Teilchen von $\overline{E_k} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot T$.

Aus $\overline{E_k} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$ folgt, dass die Gasteilchen verschiedener Gase mit gleicher Temperatur, also für gleiche mittlere Energie, umso langsamer sind, je größer ihre Masse ist. Deshalb durchdringen z. B. zwei Gase mit Teilchen unterschiedlicher Masse ein poröses Tongefäß verschieden schnell (Abb. ▶ 1). Ein Experiment, bei dem sich außerhalb des Tongefäßes Wasserstoff, innerhalb Stickstoff befindet, zeigt zunächst einen raschen Druckanstieg im Gefäß. Durch die Poren des Tongefäßes gelangen die leichteren, im Mittel schnelleren Wasserstoffteilchen rascher hinein als die schwereren und damit im Mittel langsameren Stickstoffteilchen gleichzeitig nach außen dringen können. Dieser Vorgang heißt ***Diffusion.*** Folglich befinden sich anfangs mehr Teilchen im Zylinder, der Druck steigt. Erst nach einiger Zeit, wenn sich die Gase auf beiden Seiten durchmischt haben, besteht kein Druckunterschied mehr.



1 Das leichtere Gas gleicht Konzentrationsunterschiede schneller als das schwerere aus.

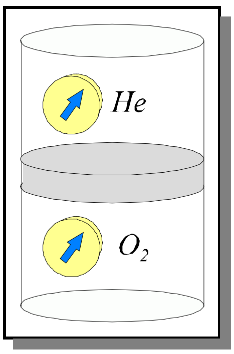
3.2 Alles klar?

3.2.1 Gliedere den gesamten Text in 4 Abschnitte und formuliere passende Überschriften.

3.2.2 Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Kraft auf einen Körper und seiner Impulsänderung?

3.2.3 Was ist falsch an der folgenden Aussage: “Die mittlere Bewegungsenergie eines He-Atoms ist $\overline{E_k} = \frac{1}{2} k T$.“

3.2.4 Die Gase in der rechts stehenden Abbildung sind durch eine poröse Wand getrennt. Wo wird der Druck ansteigen? Welche stillschweigende Annahme wird dabei gemacht?



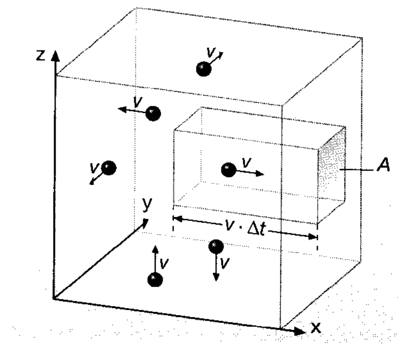
3.2.5 An welcher Stelle hat der zweite Lehrbuchtext eine Lücke in der Argumentation?

3.3 Ergänzungen

3.3.1 Hier kannst du eine Herleitung zur Formel $p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \overline{E_k}$ nachlesen:

Zur Vereinfachung der Rechnung wird Folgendes angenommen (Abb. ▶ 2):

1. Ein würfelförmiges Gasvolumen V konstanter Dichte enthalte N Teilchen, die alle gleiche Masse m und Geschwindigkeiten mit gleichem konstanten Betrag v haben.
2. Je ⅙ der Teilchen bewegen sich in der positiven bzw. in der negativen Richtung der *x*-, der *y*- und der *z*-Achse.
Eine Herleitung ohne diese Annahmen führt bei den hier dargelegten Aussagen zu gleichen Ergebnissen.
Die Teilchen treffen nach diesen Voraussetzungen senkrecht auf die Wände des Quaders und ändern dabei ihren Impuls.



2 Zum Druckgesetz eines Gases

Nach dem Impulserhaltungssatz überträgt jedes Teilchen seine Impulsänderung als Impuls $m \cdot \Delta v = 2 \cdot m v$ auf die Wand (Abb. ▶ 3). In der Zeitspanne Δt treffen alle Teilchen auf die Fläche A, die zu Beginn der Zeitspanne höchstens um die Strecke $v \cdot \Delta t$ von ihr entfernt waren. Es sind dies ⅙ der Anzahl N' aller Teilchen im Quader mit dem Volumen $V' = A \cdot v \cdot \Delta t$. Wegen der konstanten Dichte gilt:

$$\frac{N'}{V'} = \frac{N}{V} \quad \Leftrightarrow \quad N' = \frac{N \cdot V'}{V} = \frac{N \cdot A \cdot v \cdot \Delta t}{V}$$

In der Zeitspanne Δt wird der Wand der Impuls

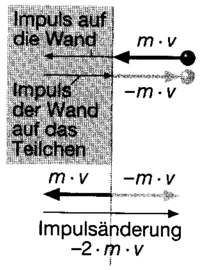
$$\frac{1}{6} \cdot N' \cdot 2 m v = \frac{1}{3} \cdot \frac{N \cdot A \cdot v \cdot \Delta t}{V} \cdot m v$$

übertragen. Für den Druck p folgt dann:

$$p = \frac{\text{Impulsübertragung pro Zeit}}{\text{Fläche}} = \frac{1}{3} \frac{N}{V} \cdot m v^2$$

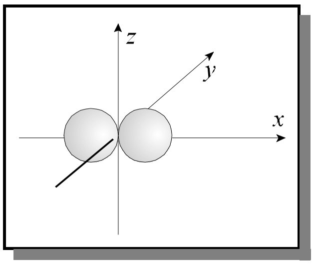
In einer genaueren Betrachtung, bei der die Teilchen unterschiedliche Geschwindigkeiten haben, wird das Quadrat der konstanten Geschwindigkeit v^2 durch den Mittelwert der Quadrate $\overline{v^2}$ der unterschiedlichen Geschwindigkeiten ersetzt.
Das Produkt $p \cdot V$ ergibt, ausgedrückt mit Hilfe der mittleren kinetischen Energie $\overline{E_k} = ½ \cdot m\overline{v^2}$:

$$p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \overline{E_k}$$



3 Impulsänderung bei Reflexion. Vereinfachend wird angenommen, dass der Impuls senkrecht zur Wand gerichtet ist.

3.3.2 Die Teilchen eines idealen Gases können sich nicht nur in die drei Raumrichtungen bewegen, sie können auch Rotationsbewegungen durchführen. Genauere Überlegungen zeigen: Für jede der drei Rotationsachsen ist die mittlere kinetische Energie ebenfalls $\frac{1}{2}kT$. Allerdings zählen nur die Rotationsachsen, die keine Symmetrieachsen der Teilchen darstellen. Bei dem zweiatomigen Molekül in der rechts stehenden Abbildung ist die *x*-Achse eine Symmetrieachse; deswegen ist die gesamte Bewegungsenergie hier $\frac{5}{2}kT$.



3.4 Aufgaben

3.4.1 Berechne die mittlere Bewegungsenergie und Geschwindigkeit eines He-Atoms bei Raumtemperatur (300 K).

3.4.2 Bei Raumtemperatur haben die Teilchen eines Gases eine Geschwindigkeit von einigen Hundert m/s. Warum dauert es trotzdem manchmal mehrere Minuten, bis man riecht, dass in einer Ecke eines Raumes eine Parfumflasche geöffnet wurde?

4. Innere Energie eines idealen Gases

4.1 Lies den folgenden Lehrtext sorgfältig durch!
Ziel: Zusammenhänge verstehen und wiedergeben können.

Die Summe der Bewegungsenergien der Teilchen einer Gasmenge bezeichnet man als deren **innere Energie** E_i. Nach den Ergebnissen des Kapitels 3 gilt z. B. für ein-atomige Gase wie Helium:

$E_i = N \cdot \frac{3}{2} k T$ (N = Anzahl der Teilchen)

Für zwei-atomige Gase wie O_2 hingegen ist $E_i = N \cdot \frac{5}{2} k T$.

Die innere Energie einer Gasmenge ist also in jedem Fall proportional zu seiner absoluten Temperatur T:

$$E_i \sim T$$

Wegen $m \sim N$ ist die innere Energie E_i auch proportional zur Masse m der Gasmenge:

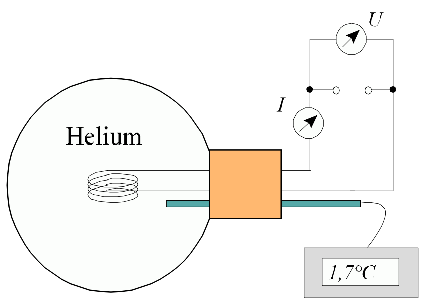
$$E_i \sim m$$

Insgesamt gilt also

$$E_i = c \cdot m \cdot T \tag{1}$$

Dabei bezeichnet man die Proportionalitätskonstante c als **spezifische Wärmekapazität**. Sie ist materialabhängig.

Wie man c experimentell bestimmen kann, obwohl sich die innere Energie E_i direkten Messungen entzieht, zeigt der folgende Versuch: Eine Gasmenge wird bei Normalbedingungen abgeschlossen; anschließend führen wir ihr (bei konstantem Volumen) die elektrische Energie $W_{el} = U \cdot I \cdot \Delta t$ zu (s. Abb. rechts). Man beobachtet dann eine Temperaturerhöhung $\Delta T = T_2 - T_1$. Sie wird darauf zurückgeführt, dass die zugeführte elektrische Energie zu einer gleich großen Erhöhung der inneren Energie des Gases, hier also des Heliums, führt:



$V = 1\ l$; $\Delta t = 5$ s; $U = 2{,}0$ V; $I = 0{,}1$ A; $\Delta T = 1{,}7$ K.

$$W_{el} = \Delta E_i = E_{i,2} - E_{i,1} = c\,m\,T_2 - c\,m\,T_1 = c\,m\,(T_2 - T_1) = c\,m\,\Delta T$$

Damit lässt sich die spezifische Wärmekapazität aus den gemessenen Werten ausrechnen:

$$c = \frac{W_{el}}{m \cdot \Delta T} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta T}$$
$$= \frac{2{,}0\,\mathrm{V} \cdot 0{,}1\,\mathrm{A} \cdot 5\,\mathrm{s}}{0{,}18\,\mathrm{g}\; 1{,}7\,\mathrm{K}} = 3{,}3\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{gK}}$$

Die spezifische Wärmekapazität lässt sich auch mithilfe der Gaskonstanten bestimmen. Die Menge n = 1 mol Helium hat die Masse m = 4 g; damit gilt:

$$c = \frac{E_i}{m\,T} = \frac{\frac{3}{2} N k T}{m\,T} = \frac{3\,n R}{2\,m} = \frac{3 \cdot 1\,\mathrm{mol} \cdot 8{,}31 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol} \cdot \mathrm{K}}}{2 \cdot 4\,\mathrm{g}} = 3{,}1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{g\,K}}$$

Die beiden Werte stimmen gut überein.

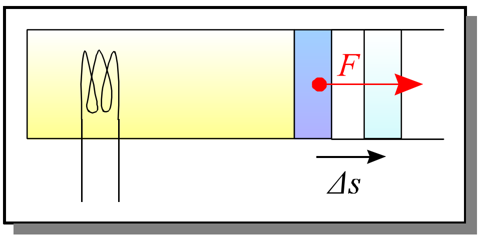
4.2 Alles klar?

4.2.1 Die absolute Temperatur eines Gases wird verdoppelt [um 10% erhöht]. Wie verhält sich dabei die innere Energie der Gasmenge?

4.2.2 Warum darf das Gas in unserem Versuch nur kurzzeitig erwärmt werden?

4.2.3 Berechnet man für 1 mol eines Gases den Quozienten $\frac{E_i}{T}$, erhält man eine Aussage über die Molekülstruktur dieses Gases. Erläutere dies.

4.3 Ergänzung



Kann sich das Gas wie rechts abgebildet während der Erwärmung ausdehnen (bei konstantem Druck), so wird nicht die gesamte zugeführte Energie in innere Energie umgesetzt: Ein Teil der zugeführten Energie wird nämlich benötigt, um den Kolben gegen den äußeren Luftdruck zu verschieben; dabei ist $\Delta E_i = W_{el} - F \cdot \Delta s$.

Bei gleicher Zufuhr von elektrischer Energie ist die Temperaturerhöhung von Gasen also bei konstantem Volumen stets größer als bei konstantem Druck.

4.4 Aufgaben

4.4.0 *Musteraufgabe*

Aufgabe: 1,6 g Sauerstoff sollen um 5 K erwärmt werden; dabei soll sich das Volumen nicht ändern. Welche Energie ist dazu erforderlich?

Lösung: Es ist:

$$\begin{aligned}\Delta E_i &= c \cdot m \cdot \Delta T \\ &= 0{,}65\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 1{,}6\ \text{g} \cdot 5\ \text{K} \\ &= 0{,}65\ \frac{\text{J}}{\text{g K}} \cdot 1{,}6\ \text{g} \cdot 5\ \text{K} \\ &= 5{,}2\ \text{J}\end{aligned}$$

Alternativ kann die Aufgabe auch mit der Boltzman-Konstanten gelöst werden.

4.4.1 3,2 g Stickstoff wird eine Energie von 14,7 J zugeführt. Um wie viel K steigt seine Temperatur (bei konstantem Volumen)?

4.4.2 Mit derselben Messapparatur wie beim Helium wird nun Sauerstoff erwärmt. Bei gleicher Energiezufuhr beobachtet man eine Erhöhung der Temperatur um 1,1 K. Berechne aus diesen Messwerten die spezifische Wärmekapazität von Sauerstoff.

4.4.3 Bestimme die spezifische Wärmekapazität von Sauerstoff aus der Gaskonstanten R.

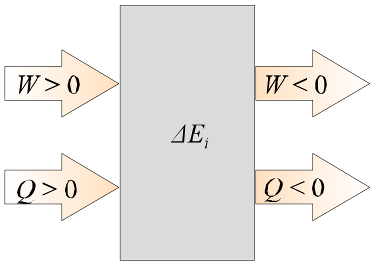
4.4.4 In der Praxis wird die Temperaturerhöhung einer Gasmenge häufig auf eine Druckmessung zurückgeführt. Beschreibe, wie man dabei verfahren muss. Gib dabei *auch* an, wie man aus den gemessenen Größen ΔT bestimmen kann. Erläutere den Vorteil dieser Methode.

5. Wärme, Arbeit und 1. Hauptsatz der Thermodynamik

5.1 Lies den folgenden Lehrtext sorgfältig durch!
Ziel: Zusammenhänge verstehen und wiedergeben können.

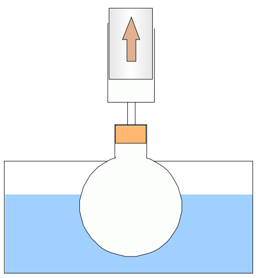
Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die innere Energie eines Körpers zu erhöhen. Zum einen kann man an ihm **Arbeit** $\boldsymbol{W}$ verrichten; dies kann elektrische Arbeit wie im Fall des Peltier-Elements sein oder auch mechanische wie beim pneumatischen Feuerzeug. Kennzeichnend für diese Art von Energieübertragung ist, dass eine **makroskopische** Energieübertragung stattfindet.
Zum anderen kann man den Körper in Kontakt mit einem weiteren Körper bringen, welcher eine höhere Temperatur besitzt. In diesem Fall wird durch die ungeordnete Bewegung der Teilchen Energie an den Körper niedrigerer Temperatur übertragen. Diesen **mikroskopischen** Energieübergang bezeichnet der Physiker als **Wärme** $\boldsymbol{Q}$.

Die Vorzeichen von W und Q zeigen jeweils an, ob Energie zu- oder abgeführt wird:



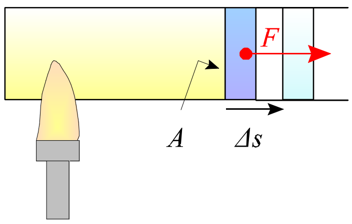
Nach dem Energieerhaltungsprinzip ergibt sich dann der **1. Hauptsatz der Thermodynamik**:

> Wird einem System beim Übergang vom Zustand 1 zum Zustand 2 Energie als Arbeit W und Wärme Q zugeführt, so gilt:
>
> $$\Delta E_i = E_{i,2} - E_{i,1} = W + Q.$$
>
> Dabei können W oder Q auch 0 sein.



Bei dem rechts abgebildeten Versuch wird z. B. dem Gas im Kolben Wärme von dem umgebenden heißen Wasser zugeführt ($Q > 0$). Gleichzeitig dehnt sich das Gas aus und hebt den Kolben dabei an; es verrichtet also Hubarbeit an dem Kolben ($W < 0$). Erhöht sich dabei die Temperatur des Gases, d. h. steigt E_i, so bedeutet dies, dass die Wärme vom Betrag her größer ist als die Arbeit. Ist die Zustandsänderung isotherm, sind W und Q vom Betrag her gleich.

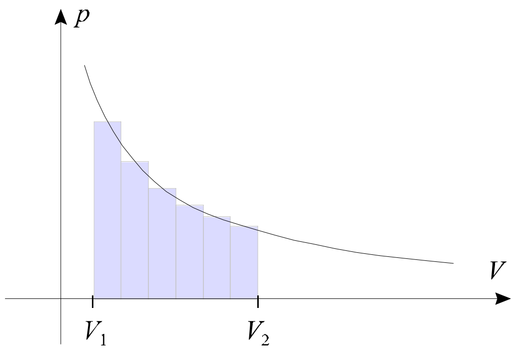
Dieser Versuch ist typisch für alle Wärmekraftmaschinen: Arbeit wird verrichtet, indem sich ein Gas ausdehnt. Diese Volumenarbeit soll nun formelmäßig erfasst werden.



Zunächst betrachten wir den einfachen Fall, dass das Gas den Kolben mit der Kraft F um die Strecke Δs verschiebt, während der Druck p konstant bleibt:

$$W = -F \cdot \Delta s = -F \cdot (s_2 - s_1) = -(p \cdot A\, s_2 - p \cdot A\, s_1)$$
$$= -(p \cdot V_2 - p \cdot V_1) = -p \cdot (V_2 - V_1) = -p \cdot \Delta V$$

Häufig ist der Druck bei dieser Arbeit aber nicht konstant, sondern hängt vom Volumen der Gasmenge ab (vgl. Boyle-Mariottesches Gesetz). In diesem Fall zerlegen wir den Prozess in viele kleine Teilprozesse, in denen der Druck als nahezu konstant angesehen werden kann. Dann lässt sich die gesamte Volumenarbeit als Integral oder näherungsweise als Summe der Teilarbeiten $\Delta W_i = -p_i \cdot \Delta V$ berechnen. Der erhaltene Wert ist umso genauer, je kleiner die Volumenintervalle ΔV sind. Diese Teilarbeiten lassen sich auch als Flächen von schmalen Rechtecken unter dem Graphen im p-V-Diagramm deuten:



$$\sum_i (-p_i \cdot \Delta V) \approx -\int_{V_1}^{V_2} p(V)\, dV = W$$

Die Volumenarbeit ist also vom Betrag her gleich der Fläche unter dem Graphen im p-V-Diagramm.

5.2 Alles klar?

5.2.1 Gib den 1. Hauptsatz der Thermodynamik an und erläutere alle darin auftauchenden Größen.

5.2.2 Recherchiere die beiden Begriffe **Prozessgröße** und **Zustandsgröße**. Ordne die Größen p, T, W, V, E_i und Q diesen Begriffen passend zu.

5.2.3 Auch Physiker verwechseln gelegentlich die Begriffe Wärme und innere Energie. Gib den entscheidenden Unterschied an.

5.3 Ergänzungen

5.3.1 Zustandsänderungen, bei denen keine Wärme ausgetauscht wird, heißen **adiabatisch**. Da die Wärmeübertragung i. A. recht langsam ist, sind rasch ablaufende Prozesse häufig adiabatisch. Typische Beispiele sind das pneumatische Feuerzeug oder der Dieselmotor, bei dem ein Brennstoff-Luft-Gemisch durch schlagartiges Verdichten zur Explosion gebracht wird.

5.3.2 In einen geheizten Ofen kann man problemlos mit der Hand hineinreichen. Schmerzhaft wird es erst dann, wenn man die Ofenwand oder ein Backblech berührt. Das erscheint auf den ersten Blick merkwürdig, denn Luft und Blech haben in etwa dieselbe Temperatur. Überlege selbst oder recherchiere: Auf welche physikalische Größe reagieren die Sinneszellen in der Haut, welche “kalt” und “heiß” melden? Erkläre damit die Beobachtung.

5.4 Aufgaben

5.4.1 ***Musteraufgaben***

Aufgabe: Eine Gasmenge von 0,1 mol verdoppelt bei einem isothermen Prozess (T = 520 K) sein Volumen.

1. Berechne die von dem Gas dabei verrichtete Volumenarbeit.
2. Bestimme die dazu benötigte Wärme.

Lösung:

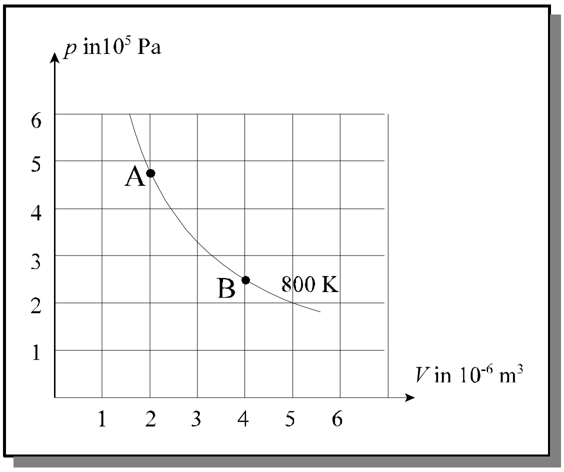
1.

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} p(V)\,dV = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{n\,R\,T}{V}\,dV = -n\,R\,T\int_{V_1}^{V_2}\frac{1}{V}dV$$
$$= -n\,R\,T\,[\ln(V)]_{V_1}^{V_2} = -n\,R\,T\,[\ln(V_2) - \ln(V_1)]$$
$$= -n\,R\,T\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = -n\,R\,T\ln(2)$$
$$= -0{,}1\text{ mol}\cdot 8{,}31\,\frac{\text{J}}{\text{K mol}}\cdot 520\text{ K}\cdot\ln(2) = -300\text{ J}$$

2. Da es sich um einen isothermen Vorgang handelt, muss ΔE_i = 0 sein. Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik muss dann die Wärme entgegengesetzt gleich der verrichteten Arbeit sein, also 300 J betragen.

Aufgabe:	Ein ideales Gas dehnt sich bei konstanter Temperatur langsam aus und verrichtet dabei die Arbeit von 200 J. Bestimme die Änderung der inneren Energie und die an das Gas abgegebene Wärme.
Lösung:	Nach dem 1. Hauptsatz gilt: $\Delta E_i = W + Q$. Hier ist $\Delta E_i = 0$, weil die Temperatur konstant ist ($\Delta E_i \sim \Delta T$), und W = - 200 J. Also ist Q = + 200 J.

5.4.2 Schätze die Arbeit ab, die das Gas in der rechts stehenden Abbildung beim Übergang von A nach B verrichtet.

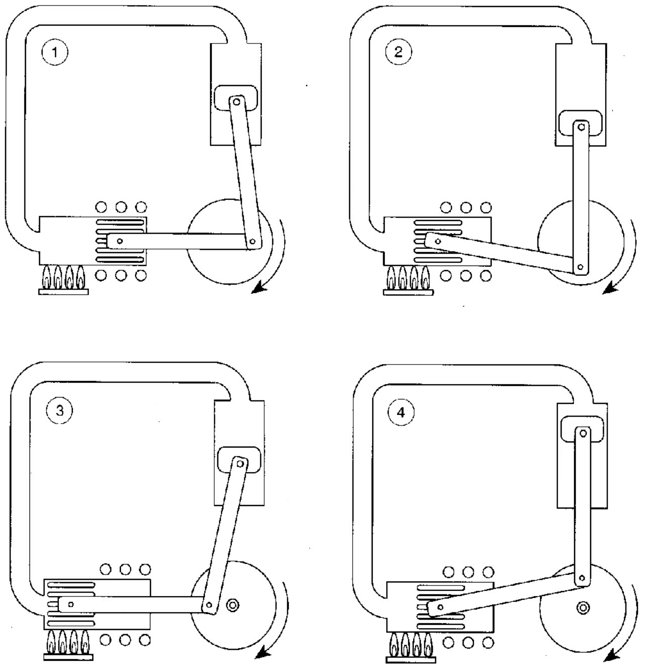


5.4.3 Ein ideales Gas wird bei konstanter Temperatur langsam auf die Hälfte seines Volumens verdichtet. Dabei wird vom Gas die Wärme 300 kJ abgegeben. Bestimme die am Gas verrichtete Arbeit sowie die Änderung seiner inneren Energie.

6. Wärmekraftmaschinen und der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

6.1 Der Stirlingmotor (Folie und Arbeitsbogen)

A) Erkläre zunächst die Funktionsweise des Stirlingmotors anhand der 4 Abbildungen (Dorn-Bader, Sonderheft):



B) Führe nun eine energetische Betrachtung durch: Fülle dazu folgende Tabelle aus:

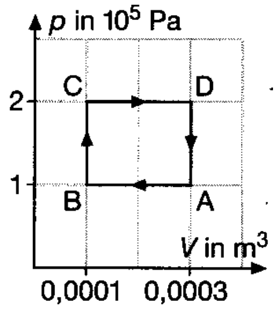
Phase	Verhalten von p, V, und T	Verhalten von Q, W und ΔE_i
1		
2		
3		
4		

6.4 Aufgaben

6.4.1 *aus: Klett, Impulse 2, S. 320, Ü12*

⑫ Ein ideales Gas durchläuft den im Bild am Rand angegebenen Kreisprozess: A → B → C → D. Vervollständigen Sie die nachfolgende Tabelle!

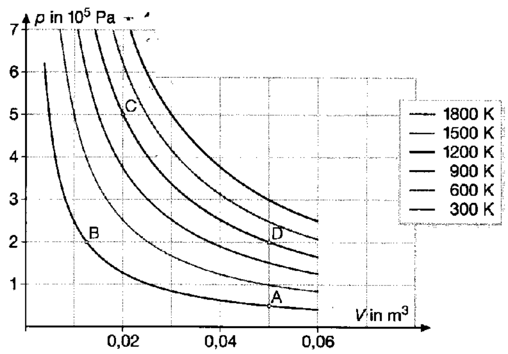
	Zunahme der inneren Energie des Gases in J	dem Gas zugeführte Wärme in J	am Gas verrichtete Arbeit in J
A → B	– 50		
B → C	25		
C → D		140	
D → A			



6.4.2 *aus: Klett, Impulse 2, S. 320, Ü13*

⑬ Das folgende *V*-*p*-Diagramm gibt die Zustände für 1 mol eines idealen Gases bei verschiedenen, konstanten Temperaturen wieder.

a) Bestimmen Sie aus mindestens vier Punkten die Gaskonstante *R*!
b) Welche Gasgesetze gelten bei den Zustandsänderungen C → D, D → A bzw. A → B, D → B ?
c) Schätzen Sie die Arbeit ab, die am Gas beim Übergang C → D verrichtet wurde!



6.4.3 In einer Broschüre der Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b. H. ist der rechts stehenden Abschnitt zu finden. Offensichtlich wird behauptet, da aus 1 J elektrischer Energie 2,5 bis 3 J innere Energie gewonnen werden können.
Lassen sich dadurch unsere Energieprobleme lösen oder ist das nur ein Scherz?

zu nutzen. Dabei genügt eine Kilowattstunde elektrischer Energie, um die 2,5 bis 3fache Energie in Form von Wärme zu gewinnen.

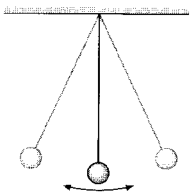
Anwendungsreife Technik

Seit den 60er Jahren, insbesondere

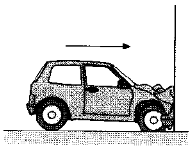
6.4.4 Wie lässt sich der Inhalt der Fläche des Rechtecks ABCD in Aufg. 6.4.1 deuten? Verallgemeinere diesen Sachverhalt.

7. Entropie

7.1 Lies den folgenden Lehrbuchtext (aus: Klett: Impulse 2, S. 306) sorgfältig durch! Ziel: Zusammenhänge verstehen und wiedergeben können.



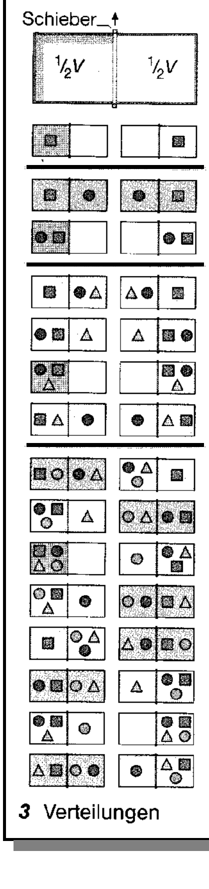
1 Reversibel



2 Irreversibel

Definition von Wahrscheinlichkeit

$$p = \frac{\text{Anzahl günstiger Fälle}}{\text{Anzahl aller möglichen Fälle}}$$



3 Verteilungen

Entropie und Dissipation

Die Abb. ► 1 und 2 beschreiben physikalische Vorgänge. Wird ein Film vom reibungsfrei schwingenden Pendel (Abb. ► 1) rückwärts laufend betrachtet, so ist der gezeigte Bewegungsvorgang vom wirklichen nicht zu unterscheiden. Solche Vorgänge heißen ***reversibel.*** Ohne Reibung ist die Umsetzung von Energie der Lage in Energie der Bewegung reversibel.

Abb. ► 2 beschreibt einen ***irreversiblen*** Vorgang, d. h. seine zeitliche Umkehrung beschreibt einen unmöglichen Vorgang. Die Verformung eines Autos bei einem Aufprall ist irreversibel, ebenso sind es die Energieumsetzungen bei einem Pendel mit Reibung.

Die Unmöglichkeit, irreversible Prozesse umzukehren, steht nicht im Widerspruch zur Erhaltung der Energie, d. h. die Größe „Energie" bestimmt nicht die Richtung im Ablauf des Naturgeschehens.

Ein Beispiel für irreversible Vorgänge ist die Diffusion eines Gases (Abb. ► 3).
Ein Kasten mit dem Volumen V ist durch einen Schieber in zwei gleiche Volumina $V_1 = \frac{1}{2}V$ und $V_2 = \frac{1}{2}V$ geteilt. V_1 enthält die Gasmenge, V_2 ist leer. Wird der Schieber geöffnet, so füllt das Gas nach kurzer Zeit den ganzen Raum, niemals sammelt es sich von selbst wieder in der linken Hälfte.
Jedes einzelne Teilchen bewegt sich bei gegebener Temperatur regellos und wird sich zu einem bestimmten Zeitpunkt mit gleicher Wahrscheinlichkeit in einer der beiden Hälften befinden. Für jedes Teilchen ergibt sich $p_l = \frac{1}{2}$ als die Wahrscheinlichkeit, es in der linken Hälfte anzutreffen. Bei zwei Teilchen A und B gibt es nun vier Möglichkeiten der Verteilung, wovon nur eine günstig ist, beide gleichzeitig links anzutreffen:
Es ist $p_l = (\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$
Für N Teilchen erhält man $p_l = (\frac{1}{2})^N$.

Bei 100 Teilchen wird $p_l = (\frac{1}{2})^{100} \approx 10^{-30}$, d. h. bei Beobachtung im Sekundenabstand dürfte man etwa alle 10^{22} Jahre einmal alle Teilchen in der linken Hälfte antreffen. Das Alter des Universums beträgt etwa 10^{10} Jahre.
Die Umkehrung irreversibler Vorgänge ist also extrem unwahrscheinlich, so dass sie praktisch nicht vorkommt.
Abb. ► 3 zeigt auch, dass für die Gleichverteilung die meisten Möglichkeiten bestehen. Dieser Zustand ist also am wahrscheinlichsten. Ihn wird das Gas einige Zeit nach Öffnung des Schiebers einnehmen. Dies entspricht den Beobachtungen.
Aus den vorangegangenen Betrachtungen folgt:
Zustandsänderungen eines Systems laufen von selbst stets so ab, dass der neue Zustand wahrscheinlicher als der alte ist.

In der Physik gibt man bei den Vielteilchenproblemen der Materie nicht die Wahrscheinlichkeit selbst an, sondern eine Größe S, die proportional zur Wahrscheinlichkeit ist. Sie heißt ***Entropie.***

Da ein im Behälter befindliches Gas mit dem Universum weder Materie noch Energie austauscht, geht bei dem Vorgang, dass eine leere Hälfte des Behälters durch Diffusion gefüllt wird, gleichzeitig das ganze Universum in einen wahrscheinlicheren Zustand über. Es ergibt sich:
Die Entropie des Universums nimmt ständig zu.

Wird einem Körper etwa durch Reibung oder elektrischen Strom Energie zugeführt, so wird die kinetische Energie einiger Teilchen erhöht. Durch Wechselwirkung mit Nachbarteilchen wird diese Energie auf immer mehr Teilchen verteilt. Die Gleichverteilung ist am wahrscheinlichsten. Diesen Vorgang der Verteilung von Energie auf die regellose Teilchenbewegung nennt man ***Dissipation.***

Die sichtbare Bewegung eines Körpers in eine bestimmte Richtung bedeutet eine geordnete Bewegung aller seiner Teilchen. Es ist extrem unwahrscheinlich, dass sich diese ohne äußeren Eingriff aus der regellosen Teilchenbewegung ergibt. Die auf die einzelnen Teilchen verteilte Energie der Bewegung wird nicht als nutzbare kinetische Energie des Körpers zur Verfügung stehen.
Durch Dissipation wird Energie entwertet.

Die Verteilung der gleichen kinetischen Energie auf mehr Teilchen bedeutet eine Abnahme ihrer durchschnittlichen Energie. Dem entspricht eine niedrigere Temperatur. Innere Energie ist also umso wertvoller, je höher die Temperatur ist, denn dann lässt sich ein umso größerer Bruchteil davon als Bewegungsenergie entnehmen und auf das Gesamtsystem übertragen.

7.2 Alles klar?

7.2.1 Gliedere den Text sinnvoll in 4 Abschnitte und gib ihnen geeignete Überschriften.

7.2.2 Nenne 3 reversible und 3 irreversible Prozesse.

7.2.3 In der Abb. 3 des Lehrtextes sind unten alle möglichen Verteilungen von 4 (unterscheidbaren) Teilchen auf zwei Raumhälften dargestellt. Stelle die Wahrscheinlichkeit p, null, eins, zwei, ...dieser Teilchen in der linken Hälfte anzutreffen, in einem (EXCEL-)Diagramm dar. Warum ist dieses Diagramm symmetrisch?
[Erstelle auch ein entsprechendes Diagramm für 5 Teilchen. Wie groß ist insbesondere die Wahrscheinlichkeit dafür, dass alle Teilchen in der linken Hälfte sind?]

7.2.4 Im Lehrtext heißt es, dass die **Entropie (Formelzeichen: *S*)** proportional zur Wahrscheinlichkeit p sei. Das ist nicht korrekt; vielmehr wird die Entropie folgendermaßen definiert:

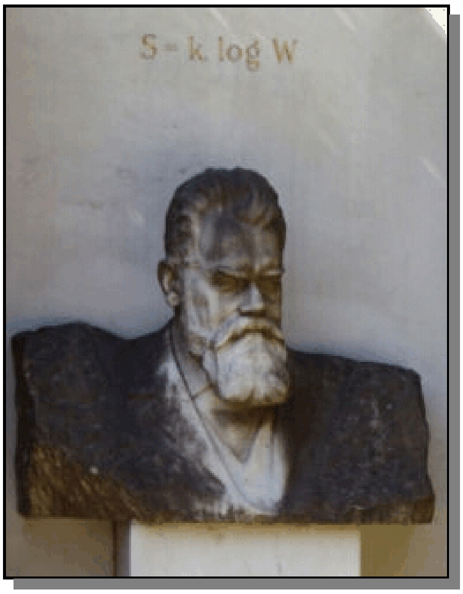
$\boxed{S = k \cdot \ln(\Omega)}$; dabei bezeichnet Ω die Anzahl der Möglichkeiten der Verteilung

In der Abb. 3 des Lehrtextes gilt z. B. für die Anzahl der Möglichkeiten einer Gleichverteilung bei 4 Teilchen: $\Omega = 16$. Begründe, dass sich trotz des Fehlers die restlichen im Lehrtext stehenden Aussagen nicht ändern.

7.2.5 Was versteht man unter Dissipation? Erläutere den Begriff anhand einer Eisenkugel, die auf den Boden fällt. Wo überall findet sich am Ende die Energie der geordneten Bewegung aller Kugelteilchen?

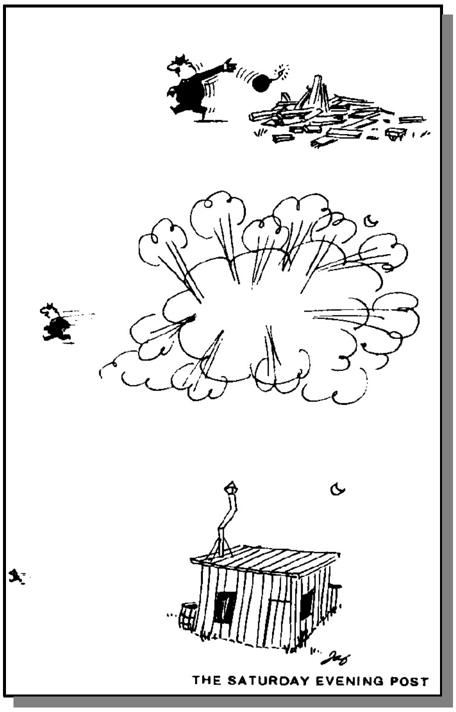
7.3 Ergänzungen

Der im Lehrtext dargestellte Entropiebegriff geht auf Ludwig Boltzmann zurück. Recherchiere eine Kurzbiographie. Versuche insbesondere etwas über die Umstände seines Todes herauszufinden.



L. Boltzmann (aus: Wikipedia)

7.4 Aufgaben



Aus: berkeley physics course (5)

7.4.1 Ist der in dem rechten Cartoon dargestellte Prozess physikalisch unmöglich? Nimm kritisch Stellung! Worin liegt bei diesem Cartoon eigentlich der Witz? Beantworte diese Frage mit physikalischen Fachausdrücken!

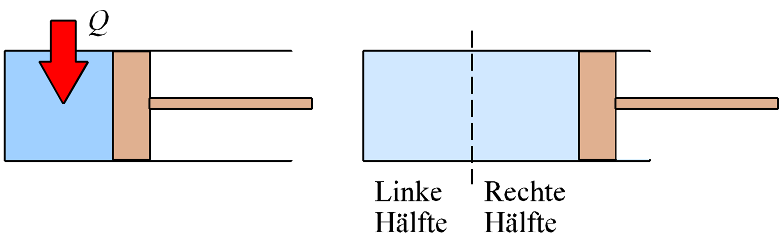
7.4.2 Wie verhält sich der Wert der Entropie bei dem im Cartoon dargestellten Prozess?

7.4.3 Aus einem Reservoir R1 mit der Temperatur 1000 K und einem Reservoir R2 mit der Temperatur 500 K werden jeweils 100 J entnommen und bei einer Umgebungstemperatur von 300 K mithilfe einer Heißluftmaschine in Arbeit umgesetzt. Bestimme die jeweils verrichteten Arbeiten. Welches dieser beiden Reservoire ist demzufolge wertvoller?

7.4.4 Wir betrachten das Beispiel mit den 4 Teilchen aus Abb. 3 des Lehrtextes. In Situation 1mögen sich alle Teilchen im linken Raumbereich befinden, in Situation 2 soll eine Gleichverteilung vorliegen. Bestimme die Entropien für beide Situationen sowie den Entropiezuwachs beim Übergang von 1 nach 2. Benutze die Formel aus 7.2.4.

8. Quantitative Betrachtung der Entropie (fakultativ)

Der Entropiebegriff ist ähnlich wie der Energiebegriff von großer Bedeutung nicht nur für die Physik, sondern auch für die anderen Naturwissenschaften. Weiterhin lassen sich wegen der engen Verbindung zum Informationsbegriff Brücken zur Informatik schlagen. Trotzdem soll hier die quantitative Behandlung der Entropie nur am Beispiel des Stirlingmotors erfolgen. Genauer gesagt schauen wir uns eine isotherme Volumenvergrößerung an, wie sie in der ersten Phase des Stirling-Kreisprozesses auftaucht.



Zur weiteren Vereinfachung soll ferner davon ausgegangen werden, dass sich das Volumen bei diesem Prozess verdoppelt. Dann liegt die in Abb. 3 des Lehrtextes von Kapitel 7 dargestellte Situation vor.

Wir betrachten zunächst die Anfangssituation (*a*): Alle Teilchen befinden sich noch in der linken Hälfte desjenigen Raums, der am Ende den Teilchen zur Verfügung steht; dafür gibt es nur eine Möglichkeit: $\Omega_a = 1$.

Für die Endsituation (*e*), in der sich alle Teilchen in der linken *oder* der rechten Hälfte befinden können, gibt es $\Omega_e = 2^N$ Möglichkeiten; dabei bezeichnet N die Anzahl der Teilchen in dem Zylinder. (In der erwähnten Abb. 3 gibt es insgesamt 16 Möglichkeiten dafür, dass sich die 4 Teilchen irgendwo, in der linken oder rechten Hälfte befinden, aber nur 1, dass sich alle in der linken Hälfte befinden!)

Da die Werte für Ω sehr groß werden können, benutzt man ein logarithmisches Maß zur Beschreibung:

> Unter der Entropie S versteht man den Ausdruck $S = k \ln(\Omega)$; dabei bezeichnet hier k wieder die Boltzmann-Konstante.

Warum hier der zusätzliche Faktor k auftaucht, wird weiter unten deutlich gemacht.

Wie groß ist bei unserem Beispiel die Entropie am Anfang und am Ende?

$$S_a = k \ln(\Omega_a) = k \ln(1) = 0$$
$$S_e = k \ln(\Omega_e) = k \ln(2^N) = k N \ln(2)$$

Die Änderung der Entropie bei diesem Vorgang ist also $S_e = k$ N ln(2) > 0; d. h. die Entropie nimmt zu.

Diese mikroskopische Betrachtung der Entropie hat einen Nachteil: Sie entzieht sich in vielen Fällen einer direkten experimentellen Untersuchung.

Schon vor Boltzmann war von Clausius auf andere Art und Weise der Entropiebegriff eingeführt worden: Er betrachtete die Quozienten $\frac{Q}{T}$, die so genannten ***reduzierten Wärmemengen***. Die Summe der bei einem Prozess übertragenen reduzierten Wärmemengen gibt die Entropie*änderung* an, genauer:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Diese Definition der Entropie hat den Vorteil, dass sie auf die makroskopische Größen Wärme und Temperatur zurückgreift; diese lassen sich in vielen Situationen einfach bestimmen.

Wir zeigen nun am Beispiel der isothermen Volumenverdopplung, dass die beiden Entropiedefinitionen übereinstimmen:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = -\int \frac{dW}{T} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p\,dV}{T} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{n\,R\,T}{T\,V} dV$$
$$= n\,R \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = n\,R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = N\,k \ln(2)$$

Das Ergebnis stimmt mit dem aus der mikroskopischen Betrachtung überein.

Historisch wurde zunächst der makroskopische Entropiebegriff geprägt; daraus erklärt sich auch das Auftauchen des Faktors *k*.

Zusammenfassung

In dem folgenden Überblick (Paetec: Physik, S. 239) tauchen einige (wenige) Sachverhalte und Formeln auf, die nicht behandelt wurden; streiche sie. Außerdem werden einige Größen durch andere Symbole bezeichnet; ändere sie entsprechend ab. Ferner fehlt an einer Stelle ein Δ; wo?

Hauptsätze der Thermodynamik und Kreisprozesse

Die **Hauptsätze der Thermodynamik** sind grundlegende physikalische Gesetze, die weit über die Thermodynamik hinaus von Bedeutung sind.

Der **1. Hauptsatz der Thermodynamik** lautet: Für ein thermodynamisches System ist die Änderung der inneren Energie ΔU gleich der Summe aus der mechanischen Arbeit W und der ausgetauschten Wärme Q. Es ist der Energieerhaltungssatz für thermische Vorgänge.

$$\boxed{\Delta U = W + Q}$$

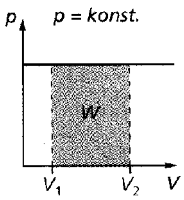
Wendet man den 1. Hauptsatz auf spezielle Zustandsänderungen an, dann ergibt sich:

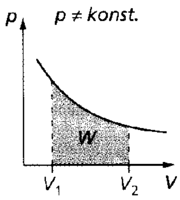
isobarer Vorgang (p = konstant)	**isochorer Vorgang (V = konstant)**
$\Delta U = W + Q$ $m \cdot c_v \cdot \Delta T = -p \cdot \Delta V + m \cdot c_p \cdot \Delta T$	$W = 0$ $\Delta U = Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T$
isothermer Vorgang (T = konstant)	**adiabatischer Vorgang ($Q = 0$)**
$\Delta U = 0$ $W = -Q$ oder $Q = -W$	$Q = 0$ $\Delta U = W$

Für die mechanische Arbeit (Volumenarbeit) gilt

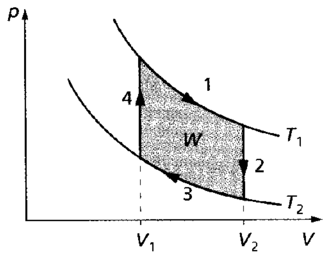
allgemein: $W = -\int_{V_1}^{V_2} p\,(V)\, \mathrm{d}V$

für p = konst.: $W = -p \cdot \Delta V$





Bei **Wärmekraftmaschinen** (z. B. Ottomotor, Dieselmotor, Dampfturbine, Gasturbine, Dampfmaschine) wird eine Abfolge von Zustandsänderungen durchlaufen, bis jeweils wieder der Ausgangszustand erreicht ist.



Bei einem solchen **Kreisprozess** ist die nutzbare Arbeit gleich der eingeschlossenen Fläche (s. Skizze). Der **maximale thermische Wirkungsgrad** einer Wärmekraftmaschine beträgt:

$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ oder $\eta = 1 - \frac{|Q_{ab}|}{Q_{zu}}$

Er wird beim carnotschen und stirlingschen Kreisprozess erreicht.

Der **2. Hauptsatz der Thermodynamik** lautet: In einem abgeschlossenen System kann sich die Entropie S niemals verkleinern. Es gilt: $S \geq 0$.
Die Entropieänderung beträgt $\Delta S = \frac{Q}{T}$ bzw. $\Delta S = k \cdot \ln W$.

Der **3. Hauptsatz der Thermodynamik** besagt: Es ist unmöglich, durch irgendeinen Vorgang den absoluten Nullpunkt zu erreichen.

Didaktischer Kommentar

0. Vorbemerkungen

In diesem Crashkurs zur Thermodynamik werden Sie keine neuen Ideen finden! Manchmal dachten wir zwar, auf etwas Neues gestoßen zu sein, aber dann fanden wir es einige Tage später in anderen Büchern.

Wir sind auch keine Spezialisten für Thermodynamik! Vielleicht haben wir dadurch aber auch keine Scheu gehabt, viele "interessante Dinge" links oder rechts liegen zu lassen und uns - zumindest was den inhaltlichen Aspekt angeht - auf ein einziges Ziel zu konzentrieren: das quantitative Verständnis der Heißluftmaschine. Wir fahren sozusagen auf einer Autobahn, sehen ab und zu rechts und links interessante Dinge, verlassen die Autobahn aber nicht!

Allerdings verfolgen wir in diesem Kurs einen zusätzlichen methodischer Aspekt: Lesen lernen! (Auch das ist nicht neu: Als wir mitten in der Arbeit an diesem Konzept waren, erschien Heft 95 von Unterricht Physik, indem dieser Aspekt systematisch behandelt wird!)

1. Konzentration und Reduzierung

1.1 Ziel: Heißluftmaschine quantitativ verstehen; alles andere sekundär. Vorstellung: Hauptstraße führt zur HLM; Begriffe wie "adiabatisch", c_p und c_V, als Stichstraßen! Nur Stirling-Kreisprozess!

1.2 Innere Energie nur bei idealen Gasen, keine Betrachtung von Bindungsenergien etc., $U = E_i$; nur c_V, keine Änderung von Aggregatzuständen, keine Schmelzwärme, keine chemischen Prozesse...

1.3 Entropie (2. Hauptsatz und irreversible Prozesse)
2. Hauptsatz wird hier mithilfe des Wirkungsgrades als Erfahrungssatz betrachtet (Klett Impulse 2, alt). Entropie wird nicht quantitativ behandelt. Dass es zwei verschiedene äquivalente Definitionen gibt ($S = \int \frac{dQ}{T}$ oder $S = k \ln \Omega$ bzw. $\Delta S = k \ln W$)), von denen keine durch die Vorgaben des ZAbi favorisiert wird, sind m. E. quantitative Aufgaben zur Entropie im Zentralabitur nicht möglich!

Bei Paetec und anderen findet man: $\Delta S = k \ln (W)$ mit $W = p_e/p_a$. W gibt also das Wahrscheinlichkeitsverhältnis an. Da der Endzustand (e) i. d. R. wahrscheinlicher als der Anfangszustand (a) ist, gilt $W > 1$, d. h. $\Delta S > 0$. Stimmt das mit der Schreibweise von berkeley überein? Ja: Es ist $p_e/p_a = \Omega_e/\Omega_a$, also $k \ln(W) = k \ln(\Omega_e)$-k $\ln(\Omega_a) = S_e - S_a = \Delta S$. Da es mehr Endzustände gibt als Anfangszustände, ist auch hier $\Delta S > 0$. Drückt man S mithilfe von p aus, muss man beachten, dass $\ln(p)$ negativ ist!

2. Methodische Ziele: Umgehen mit Texten

2.1 Eigenständiges und eigenverantwortliches Arbeiten, Lesen lernen, Verständnis kontrollieren

2.2 Methoden des Lesens: Überblick (Orientierungswissen) oder tieferes Verständnis?! Die Ziele sollten dem Schüler deutlich gemacht werden.
Anderes Beispiel (Anwendung RT): $W=mc^2$ und Masse-Energie-Äquivalenz: Massendefekt bei Kernfusion in der Sonne. Umgang mit dem Buch Dorn-Bader.

2.3 Einige Methoden der Kontrolle
- Fragen zum Text beantworten
- Text in Tabelle oder Grafik (Mindmap) umsetzen
- Fragen zum Text selbst stellen und beantworten lassen (Karteikarten -> Interview eines Partners)
- Text gliedern und Abschnitte mit Überschriften versehen

3. Quellen

3.1 Bücher und Zeitschriften

Impulse Physik 2 (Gesamtband), Klett, Stuttgart, 1997

Kuhn: Physik III B Energie und Entropie, Westermann, Braunschweig, 1982

Metzler Physik, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1991

statical physics, berkeley physics course (volume 5), mcgraw-hill, New York, 1967

Dorn-Bader: Physik SII (Gesamtband), Schroedel, Hannover, 2003

Physik Gym. Oberstufe, PAETEC, Berlin, 2003

Unterricht Physik, Heft 95, Friederich Verlag, Seelze

3.2 Videos zu Versuchen von ProSieben (Galileo), G. Heinrichs, Carl Aero GmbH.

3.3 Experimentiermaterial

Niedrigtemperatur-Stirlingmotor: Carl Aero GmbH - www.ltd.stirling.de
Pneumatisches Feuerzeug: 3B Scientific Online Shop - www.3bscientific.com
Peltier-Element (TECI 12705): Conrad - www.conrad.de

4. Konkrete Umsetzung im Unterricht

4.1 ***Vorgehensweise***: Die Schüler erhalten in der Regel 1 Woche Zeit zur Bearbeitung der Aufgaben. Die Thermodynamik-Reihe findet also parallel zu einer anderen Reihe statt. Das gibt den Schülern genügend Zeit für Recherchen, zusätzliche Gelegenheiten zum Gedankenaustausch untereinander oder auch dazu, kurze Fragen in den anderen Unterrichtsstunden zu stellen. Insbesondere bietet sich diese Vorgehensweise natürlich auch für Kombi- oder Huckepack-Kurse an.

Die Schüler führen eine spezielle Mappe zu dieser Reihe; diese wird zwischendurch zur Kontrolle eingesammelt.

Alle Teile, *auch die Ergänzungen*, stellen verbindliche Aufgaben dar - es sei denn, es wird explizit darauf hingewiesen, dass auf die Erarbeitung verzichtet werden kann.

0. Einführung
   Qualitative Überlegungen anhand eines einfachen Heißluftmaschinenexperiments
   Anweisungen zum Umgang mit dem Material (Arbeitsmappe); insbesondere auf die Leseziele hinweisen!
   Kapitel 1 als HA aufgeben.
   (1 Stunde)

1. Gesetze für ideale Gase besprechen; Kapitel 2 als HA aufgeben. (weniger als 1 Stunde)

2. Die universelle Gasgleichung besprechen; Kapitel 3 als HA aufgeben. (weniger als 1 Stunde)

3. Druck und Teilchenbewegung besprechen; Kapiel 4 als HA aufgeben (1 Stunde)

4. Innere Energie
   Die Untersuchungen beschränken sich auf ideale Gase und auf Prozesse mit V = konst. Nur diese werden bei der HLM benutzt. Dementsprechend werden c_p und c_V auch nicht explizit erwähnt.
   Kapitel 5 als HA aufgeben (Weniger als 1 Stunde)

5. 1. Hauptsatz
   Experiment: 1. Phase der HLM; Ausdehnungs- bzw. Volumenarbeit, Wärme, 1. Hauptsatz; (1 Stunde)

6. 2. Hauptsatz
   Experimente mit der HLM und der Wärmepumpe durchführen; Untersuchungen zum Kreisprozess bei HLM und Wirkungsgrad (Arbeitsblatt, Frag. Entw. Unterricht)
   (Block von 3 - 4 Stunden)

Anschließend: Kapitel 7 als HA

7. Entropie und Dissipation besprechen; abschließende Übung und Zusammenfassung als HA (1 Stunde)

8. Besprechung der HA (1 Stunde)

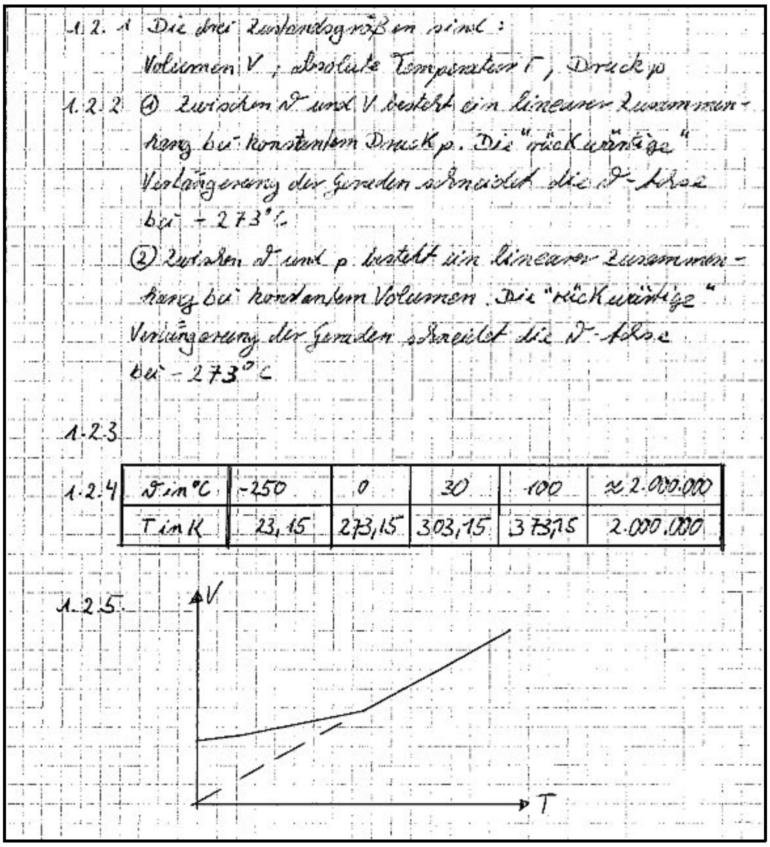
4.2 Hinweise und Lösungen

4.2.1 Hinweise und Lösungen zu Kapitel 1

Didaktische Bemerkung: Die Reihenfolge, in welcher die (gedachten) Prozesse hier ausgeführt werden, ist egal; diese Tatsache muss m. E. nicht problematisiert werden.

Lösungen:

4.2.1.2 Alles klar?



1.2.1 Die drei Zustandsgrößen sind:
Volumen V; absolute Temperatur T, Druck p

1.2.2 ① Zwischen ϑ und V besteht ein linearer Zusammenhang bei konstantem Druck p. Die "rückwärtige" Verlängerung der Geraden schneidet die ϑ-Achse bei −273°C

② Zwischen ϑ und p besteht ein linearer Zusammenhang bei konstantem Volumen. Die "rückwärtige" Verlängerung der Geraden schneidet die ϑ-Achse bei −273°C

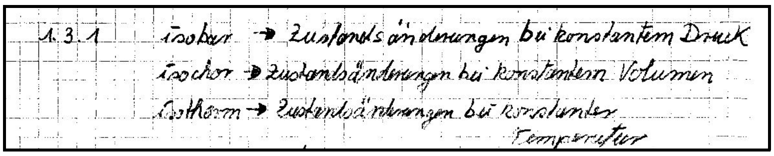
1.2.3

1.2.4

ϑ in °C	−250	0	30	100	≈ 2.000.000
T in K	23,15	273,15	303,15	373,15	2.000.000

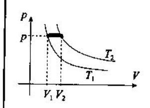
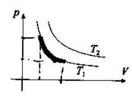
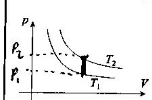
1.2.5

4.2.1.3 Ergänzungen



1.3.1 isobar → Zustandsänderungen bei konstantem Druck
isochor → Zustandsänderungen bei konstantem Volumen
isotherm → Zustandsänderungen bei konstanter Temperatur

1.3.2 Fülle die folgende Tabelle aus:

Zustandsänderung	isobar	isotherm	isochor
konstante Zustandsgröße	p	T	V
Gesetz	$V = \text{Konst} \cdot T$ Gay-Lussac	$p \cdot V = \text{konst}$ Boyle-Mariotte	$p = \text{Konst} \cdot T$ Amontons
Beispiel *)	Wohnraum	Luftpumpe	Gasflasche
Darstellung im p-V-Diagramm			

4.2.1.4 Aufgaben

1.4.2

$\vartheta_1 = 15°C \Leftrightarrow T_1 = 288\,K$ $\quad p_1 = 210\,KPa$

$\vartheta_2 = 40°C \Leftrightarrow T_2 = 313\,K$ $\quad p_2 = ?$

$V_{Reifen} = \text{konstant} \Rightarrow p_1 : p_2 = T_1 : T_2 \Leftrightarrow p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$

$p_2 = \frac{313}{288} \cdot 210\,KPa = 228{,}23\,KPa$

Der Druck steigt auf 228,23 KPa.

Beim Ablassen der Luft bleibt die Temperatur konstant

$\Rightarrow p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \Leftrightarrow V_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot V_1 \quad V_2 = \frac{210}{228{,}23} \cdot V_1 = 92\% \cdot V_1$

Man muss $8\% \cdot V_1$ an Luft ablassen, um den gleichen Druck herzustellen. Tun sollte man das jedoch nicht, weil sonst nach der Abkühlung der Reifendruck zu gering ist.

4.2.2 Hinweise und Lösungen zu Kapitel 2

Didaktische Bemerkung: Hier klar machen, dass es unterschiedliche Ziele beim Lesen von Texten gibt. In diesem Fall ist nur ein Überblickswissen angestrebt. Insbesondere sollen die realen Gase nicht genauer betrachtet werden.

Lösungen:

4.2.2.2 Alles klar?

Alles verstanden?

2.2.1. 1 mol eines Gases enthält $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Teilchen.
10 mol des Gases enthalten $6{,}022 \cdot 10^{24}$ Teilchen.

2.2.2. $\frac{p \cdot V}{T} = k \cdot N$ N = Anzahl der Teilchen (Physik; bei beliebigen Mengen)

$\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R$ n = Molzahl = Anzahl der mol (Chemie)

Sie unterscheiden sich in Mengenangabe (Teilchenzahl oder Anzahl der mole. Daraus ergeben sich verschiedene Konstanten.

4.2.2.3 Ergänzungen

2.3.1: Ein Mol ist die Stoffmenge, die aus $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Teilen besteht. Also werden Stoffmengen in Mol angegeben.

$36\,g = 3 \cdot 12\,g \mathrel{\widehat{=}} 3\,mol\ {}^{12}C$

2.3.2. Gaskonstante $R = \frac{p \cdot V}{T} \cdot \frac{1}{n} = k \cdot N \cdot \frac{1}{n} = k \cdot \frac{N}{n}$

$R = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot \frac{6{,}022 \cdot 10^{23}}{1\,mol} = 8{,}31 \frac{J}{K\,mol}$

2.3.3. $V_0 = \frac{n \cdot R \cdot T}{p}$ $V_0 = \frac{1\,mol \cdot 8{,}31\,J \cdot 273\,K}{101300\,\frac{N}{m^2} \cdot K \cdot mol} = 0{,}022395\,m^3 = \underline{\underline{22{,}4\,l}}$

2.3.4. Molmasse:

Material	H_2	CH_4	O_2	Cl_2
Molmasse in g	2,016	16,032	32	70,9

2.3.5. Bei realen Gasen vernachlässigt man das Eigenvolumen der Gasteilchen und die gegenseitige Anziehung (Molekularkräfte).

4.2.4.4 Aufgaben

2.4.1. gegeben: $V = 1\,l$, $p_0 = 1013\,hPa$, $T_0 = 273\,K$

$m_1 = 264{,}90\,g$, $m_2 = 263{,}47\,g$, Material: O_2

gesucht: Gaskonstante R

Ls: $R = \frac{p \cdot V}{T} \cdot \frac{1}{n}$ $\quad n = \frac{m_1 - m_2}{m_{Mol}}$ $\quad n = \frac{1{,}43\,g \cdot mol}{32\,g} = 0{,}04469\,mol$

$$R = \frac{101300 \cdot 10^{-3} \cdot 32}{273 \cdot 1{,}43} \frac{N \cdot m^3}{m^2 \cdot K \cdot mol} = 8{,}30 \frac{J}{K \cdot mol}$$

2.4.2) gegeben: $V = 600\,m^3$, $T = 273\,K$, $p = 1013\,hPa$, $\Delta T = 25\,K$

gesucht: Masse der ausströmenden Luft

Ls: Zusammensetzung der Luft (in Volumenanteilen)

79 % Stickstoff (N_2) mit $m_{mol} = 28\,g/mol$

21 % Sauerstoff (O_2) mit $m_{mol} = 32\,g/mol$

$V(N_2) = 79\,\% \cdot 600\,m^3 = 478\,m^3$

$V(O_2) = 21\,\% \cdot 600\,m^3 = 126\,m^3$

Unter Normalbedingungen gilt: $m = \frac{V \cdot m_{mol}}{V_{mol}}$

$m(N_2) = \frac{478 \cdot 10^3 \cdot 28}{22{,}4} \frac{l \cdot mol \cdot g}{l \cdot mol} = 597{,}5\,kg$; $m(O_2) = 180\,kg$

$m_{ges} = m(N_2) + m(O_2)$ $\quad \underline{m_{ges} = 759{,}5\,kg}$

Bei der Temperaturerhöhung dehnt sich die Luft aus und entweicht.

Die Masse der entwichenen Luft ist $m_R(273K) - m_R(298K)$ im Raum

$\Delta m = m_1 - m_2 = n_1 \cdot m_{mol} - n_2\, m_{mol}$

$$= \frac{p \cdot V \cdot m_{mol}}{R \cdot T_1} - \frac{p \cdot V \cdot m_{mol}}{R \cdot T_2} = \frac{p \cdot V \cdot m_{mol}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

Einsetzen der Werte liefert:

$$\Delta m(N_2) = \frac{101300 \cdot 478 \cdot 28}{8{,}31} \frac{N m^3 \cdot K \cdot mol \cdot g}{m^2 \cdot J \cdot mol} \left(\frac{1}{273K} - \frac{1}{298K}\right) = \underline{\underline{50{,}14\,kg}}$$

$$\Delta m(O_2) = \frac{101300 \cdot 216 \cdot 32}{8{,}31} \frac{N m^3\, K\, mol\, g}{m^2\, J\, mol} \left(\frac{1}{273K} - \frac{1}{298K}\right) = \underline{\underline{15{,}10\,kg}}$$

$\Delta m_{ges} = \Delta m(O_2) + \Delta m(N_2)$ $\quad \underline{\Delta m_{ges} = 65{,}24\,kg}$

Es entweichen 65,24 kg Luft.

2.4.3: Es müsste heißen:

„... wie Atome in 12 g des ^{12}C vorhanden sind"

4.2.3 Hinweise und Lösungen zu Kapitel 3

Didaktische Bemerkungen: Die Herleitung aus 3.3.1 zu verstehen fällt auch besseren Schülern nicht leicht. Sie sollte - vor allem in Hinblick auf die zur Verfügung stehende Zeit - als freiwillige Aufgabe angesehen werden. Auch bei der Betrachtung der Freiheitsgrade in 3.3.2 muss auf eine formale Begründung verzichtet werden.

Lösungen:

4.2.3.2 Alles klar?

3.2.1 ① Druck als Impulsübertragung auf eine Wand (Text S. 8)

② Druck und die mittlere kinetische Energie der Teilchen. (Text S. 9 bis: $p \cdot V = \frac{2}{3} N \bar{E}_K$)

③ Temperatur und die mittlere kin. Energie der Teile bis: $\bar{E}_K = \frac{1}{2} k T$)

④ Diffusion

3.2.2. Die Kraft ist die zeitliche Änderung des Impulses

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow \boxed{\frac{\Delta p}{\Delta t} = F}$$

3.2.3. $\bar{E}_K = \frac{1}{2} k \cdot T$ für jede Raumrichtung.
(Zusatz fehlt)

3.2.4. $m(O_2) > m(He) \Rightarrow v(O_2) < v(He)$ (v = Geschw.)

$\Rightarrow$ He dringt in den unteren Raum ein und erhöht dort den Druck.

Voraussetzung: gleiche Temperatur

3.2.5 Die Herleitung zu „$p \cdot V = \frac{2}{3} k \cdot T$" fehlt.

4.2.3.4 Aufgaben

3.4.1 Berechnung für Helium

He: $\bar{E}_K = \frac{3}{2} kT \quad E = 1{,}5 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot 300\,K = 621 \cdot 10^{-23}\,J$

$\bar{E}_k = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \Leftrightarrow \bar{v} = \sqrt{\frac{2E}{m}}$

Berechnung der Masse: $m_{mol} = 4{,}003\,g$

$m_{He} = 4{,}003\,g : 6{,}022 \cdot 10^{23} = 0{,}665 \cdot 10^{-23}\,g$
$= 0{,}665 \cdot 10^{-26}\,kg$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2 \cdot 621 \cdot 10^{-23}}{0{,}665 \cdot 10^{-26}} \frac{J}{kg}} = \sqrt{1868 \cdot 10^{3}} \frac{m}{s} \approx 1367 \frac{m}{s}$$

3.4.2

Die Teilchen stoßen häufig gegen einander und werden so aus ihrer Bahn abgelenkt (teils sogar reflektiert). Es findet keine geradlinige ungestörte Bewegung statt, sondern die Teilchen bewegen sich auf einer Zick-Zack-Bahn. (→ Brownsche Bewegung). Daher dauert es lange, bis sie eine bestimmte Entfernung überwunden haben.

4.2.4 Hinweise und Lösungen zu Kapitel 4

Didaktische Bemerkungen: In vielen Lehrbüchern wird zur Definition der spezifischen Wärmekapazität die *zugeführte* Energie benutzt (wenn überhaupt explizit etwas zur Bedeutung von ΔE gesagt wird); wir benutzen hier die Änderung der *inneren* Energie des betrachteten Körpers. Bei einer Gasmenge ist es unerheblich, auf welche dieser Energien man zurückgreift, so lange das Volumen der Gasmenge sich nicht ändert.

Findet eine Energiezufuhr z. B. bei konstantem Druck statt, so zeigt die Betrachtung in 4.3, dass nunmehr für die gleiche Temperaturerhöhung derselben Gasmenge eine größere Energiezufuhr nötig ist. In der Fachliteratur berücksichtigt man dies, indem man zwei verschiedene spezifische Wärmekapazitäten einführt: die spezifische Wärmekapazität c_V, welche die Erwärmung bei konstantem Volumen beschreibt, und die spezifische Wärmekapazität c_p, welche die Erwärmung bei konstantem Druck beschreibt.

Da in den folgenden Abschnitten nur von c_V Gebrauch gemacht wird, wird in diesem Kurs darauf verzichtet, diese beiden Größen formal gegenüberzustellen. Das zugrunde liegende Phänomen wird aber in 4.3 deutlich gemacht. Die gleiche Strategie - nämlich den physikalischen Hintergrund deutlich zu machen, aber auf eine formale Betrachtung zu verzichten - werden wir auch beim 2. Hauptsatz verfolgen.

Zur Beachtung:

1. In manchen Tabellenwerken stehen nur die Werte für c_V, in manchen nur die für c_p. Das kann bei den Schülern ggf. zu Verwirrung führen.

2. In Chemie-Büchern werden Materialkonstanten häufig auf die Temperatur 20 °C bezogen. In diesem und den folgenden Kapiteln bleiben wir aber bei der schon in Kapitel 2 eingeführten Normaltemperatur von 0°C. Deswegen können wir auch weiterhin bei idealen Gasen mit einem Molvolumen von 22,4 Litern arbeiten. Also auch hier aufgepasst, wenn man Tabellenwerke benutzt: Immer darauf achten, welche Bedingungen jeweils als die Normalbedingungen gewählt wurden!

Lösungen:

4.2.4.2 Alles klar?

4.2.1) $T_2 = 2 \cdot T_1 \Rightarrow E_2 = c \cdot m \cdot T_2 = c \cdot m \cdot 2T_1 = 2 \cdot E_1$

Die innere Energie wird verdoppelt.

$T_2 = 1{,}10 \cdot T_1 \Rightarrow E_2 = c \cdot m \cdot T_2 = c \cdot m \cdot 1{,}1 \cdot T_1 = 1{,}1 \cdot E_1$

Die innere Energie wächst um 10 %.

4.2.2) Bei langem Erwärmen wird die Wärme auch auf den Kolben und die Umgebung übertragen.

4.2.3) $\frac{E_i}{T} = \frac{x \cdot N \cdot k \cdot T}{T} = x \cdot Nk = x \cdot n \cdot R = x \cdot R$ für $n = 1\,mol$

Wenn $x = \frac{3}{2}$ ist, dann handelt es sich um ein einatomiges Gas.

$x = \frac{5}{2} \Rightarrow$ Das Gas ist zweiatomig.

4.2.4.4 Aufgaben

4.4.1) $V = konstant \Rightarrow W_{el} = c \cdot m \cdot \Delta T \Leftrightarrow \Delta T = \frac{W_{el}}{c \cdot m}$

Aus $c = 0{,}75 \frac{J}{gK}$ und den angegebenen Werten folgt:

$$\Delta T = \frac{14{,}7}{0{,}75 \cdot 3{,}2} \frac{J \cdot g \cdot K}{J \cdot g} = \underline{\underline{6{,}125\,K}}.$$

4.4.2) $V = konstant \Rightarrow W_{el} = c \cdot m \cdot \Delta T \Leftrightarrow c = \frac{W_{el}}{m \cdot \Delta T}$

$W_{el} = U \cdot I \cdot \Delta t \Rightarrow W_{el} = 1\,J$

$\frac{m}{1\,l} = \frac{32\,g}{22{,}4\,l} = 1{,}43 \frac{g}{l}$ $\quad V_{Kolben} = 1\,l \Rightarrow m = 1{,}43\,g$

$c = \frac{1}{1{,}43 \cdot 1{,}1} \frac{J}{gK} \approx \underline{\underline{0{,}64 \frac{J}{gK} = c \text{ von Sauerstoff}}}$

4.4.3) $c(O_2)$ gesucht

$$c = \frac{W_{el}}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E_i}{m \cdot \Delta T} = \frac{\frac{5}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T}{m \cdot \Delta T} = \frac{5}{2} \cdot \frac{n \cdot R}{m}$$

$$c = \frac{5}{2} \cdot \frac{1\,mol \cdot 8{,}31\,J}{32\,g \quad mol\,K} = \underline{\underline{0{,}649 \frac{J}{gK} = c(O_2)}}$$

4.4.4) Universelle Gasgleichung: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T \Leftrightarrow p = \frac{n \cdot R}{V} \cdot T$

Bei konstantem Volumen sind p und T proportional.

$\Delta p = \frac{n \cdot R}{V} \cdot \Delta T \Leftrightarrow \Delta T = \Delta p \cdot \frac{V}{n \cdot R}$

Vorteil der Druckmessung:

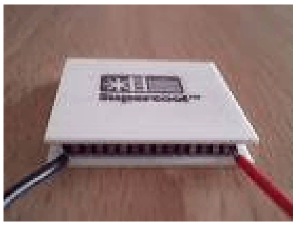
Druckunterschiede im Kolben gleichen sich sehr schnell aus; das Messgerät gibt automatisch den „mittleren" Druck an, wogegen das Thermometer die Temperatur an nur einer Stelle misst. Außerdem ist das Thermometer etwas träger und gibt die Temperatur erst nach einer gewissen Abkühlung (über die Wand) an.

4.2.5 Hinweise und Lösungen zu Kapitel 5

Didaktische Bemerkungen: Schüler, welche keinen Mathematik-LK besuchen, kennen häufig das Integral von 1/x nicht. - Verschiedene Experimente bieten sich an:

5.0 Experimente

5.0.1 Kühlboxen werden häufig mit so genannten Peltier-Elementen betrieben. Ein solches Peltier-Element besteht aus zwei Metallplatten unterschiedlichen Materials, die in Kontakt miteinander gebracht werden. Schließt man beide Platten an eine elektrische Quelle an, so kühlt sich die eine Platte ab, die andere erwärmt sich.



5.0.2 Erwärmt man die eine Platte eines Peltier-Elements und kühlt die andere ab, so entsteht zwischen diesen beiden Platten eine Spannung. Damit lassen sich kleinere elektrische Geräte betreiben. Es reicht auch schon aus, Drähte unterschiedlichen Materials miteinander zu verdrillen und die Anordnung auf einer Seite mit einer Flamme zu erhitzen.

5.0.3 In einem Zylinder mit dicker Wand kann ein Kolben luftdicht gleiten. Watte wird in etwas Petroleum getränkt und anschließend an der Innenseite befestigt. Wenn man nun den Kolben kräftig in den Zylinder stößt, entzündet sich das Petroleum. [Nach Dorn-Bader: Physik Oberstufe, S. 142]

Lösungen:

4.2.5.2 Alles klar?

5.2.1 1. Hauptsatz: $\Delta E_i = W + Q$

Führt man einem System Energie in Form von Arbeit oder Wärme zu, dann ändert sich die innere Energie des Systems um die Summe aller zugeführten Energien.

ΔE_i = Änderung der inneren Energie

W = zugeführte Arbeit, Q = zugeführte Wärme

5.2.2. Zustandsgrößen beschreiben den Zustand eines Systems.

Zu ihnen gehören: p, T, V, E_i (vergl. Kapitel 1)

Prozessgrößen beschreiben Vorgänge, also Zustandsänderungen.

Zu ihnen gehören W und Q

5.2.3 Die innere Energie (E_i) ist eine Zustandsgröße; die Wärme ist eine Energieübertragung, also eine Prozessgröße.

4.2.5.3 Ergänzungen

5.3.2. Die Sinneszellen reagieren auf die Änderung der Temperatur, also auf die Wärme d.h. auf die Energieübertragung. Wird die Energie gut übertragen, melden die Zellen „heiß" bzw. „kalt". Luft ist ein guter Wärmeisolator d.h. sie überträgt sehr wenig Energie und die Zellen reagieren kaum. Metalle übertragen die Energie deutlich schneller, daher reagieren die Zellen heftiger.

4.2.5.4 Aufgaben

5.4.2. Abschätzung durch Trapezfläche $A_{Tr}(2 \to A \to B \to 4)$

$$A_{Tr} \approx \frac{4{,}7+2{,}5}{2} \cdot (4-2) \cdot 10^5\,Pa \cdot 10^{-6}\,m^3 = 7{,}2 \cdot 10^{-1}\,J = 0{,}72\,J$$

oder durch „Kästchenzählen", wobei 1 Kästchen $\hat{=}$ 0,1 J

Die vom Gas verrichtete Arbeit beträgt etwa 0,72 J

5.4.3 T = konstant, $V_2 = \frac{1}{2} V_1$, $Q = -300\,kJ$ (abgegebene Wärme)

Isothermer Vorgang ⇒ Die innere Energie bleibt konstant

$\Delta E_i = 0$ $\quad \Delta E_i = Q + W$ (nach 1. Hauptsatz)

$\Leftrightarrow Q + W = 0$

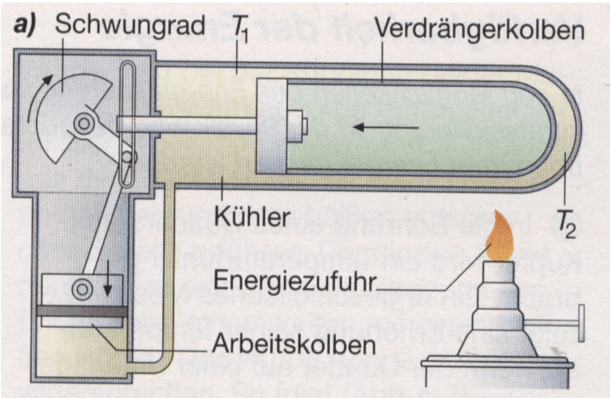
$W = -Q \qquad W = +300\,kJ$

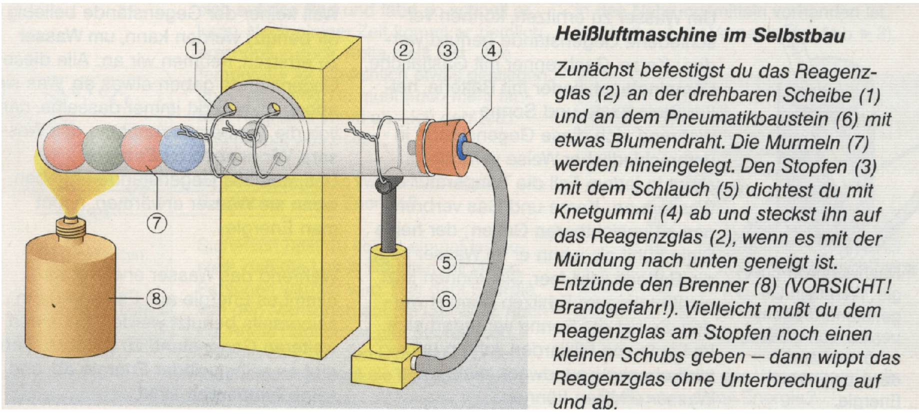
Die am Gas verrichtete Arbeit beträgt 300 kJ

4.2.6 Hinweise und Lösungen zu Kapitel 6

6.0 Experimente

6.0.1 Stirlingmotoren





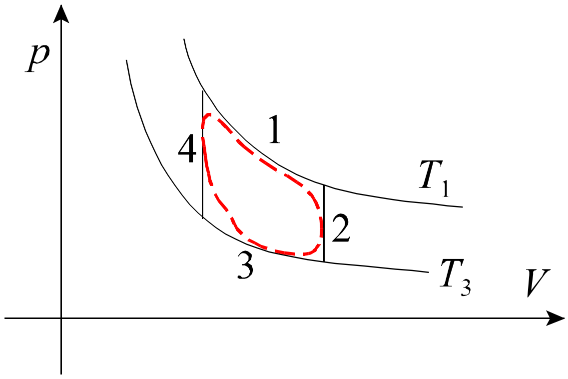
6.0.2 HLM mit Hohlspiegel treibt Dynamo mit LED an.

6.0.3 HLM wird von Elektromotor angetrieben -> Wärmepumpe

Didaktische Bemerkungen:

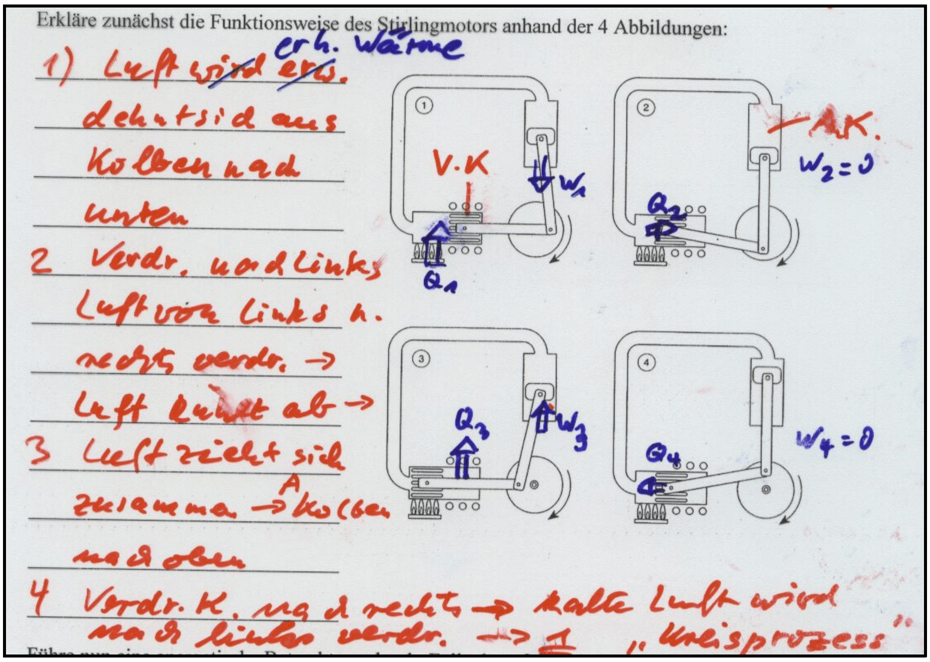
Zunächst bearbeiten die Schüler die Aufgabe A) des Übungsblatts aus 6.1. Im Wesentlichen greifen sie dabei auf die Erfahrungen der Einführungsstunde zurück. Eine gemeinsame Betrachtung des Simulationsprogramms HLM (auf der CD!) kann die hier ablaufenden Prozesse noch einmal verdeutlichen. Spätestens an dieser Stelle werden auch die Begriffe Arbeitskolben und Verdrängerkolben eingeführt.

Gleichzeitig liefert das Programm auch schon ein p-V-Diagramm für diesen Kreisprozess; die Aufnahme eines solchen p-V-Diagramms von einer realen Heißluftmaschine findet man auch auf der CD - im Unterverzeichnis “Videos”.



1. Expansion ohne Temperaturänderung
2. Abkühlung bei konstantem Volumen
3. Kompression ohne Temperaturänderung
4. Erwärmung bei konstantem Volumen

Der Lehrer präsentiert nun ein idealisiertes p-V-Diagramm für den Stirling-Prozess (s. o.). Die gemeinsame Diskussion über die Energieverhältnisse kann auf einer Folie des Übungsblattes festgehalten werden (s. u.). Es ist wichtig, dass die Schüler merken, dass der naiv benutzte Begriff “erwärmen”, welcher die Energiezufuhr immer automatisch mit einer Temperaturerhöhung einhergehen lässt, jetzt durch die Begriffe “Wärmezufuhr” oder “erhält Wärme” ersetzt werden muss; ansonsten könnte die erste Phase des Kreisprozesse nicht isotherm sein.


Erkläre zunächst die Funktionsweise des Stirlingmotors anhand der 4 Abbildungen:

1) Luft ~~wird erw.~~ erh. Wärme dehnt sich aus Kolben nach unten

2 Verdr. nach links Luft von links n. rechts verdr. → Luft kühlt ab →

3 Luft zieht sich zusammen → Kolben nach oben

4 Verdr. K. nach rechts → kalte Luft wird nach links verdr. → 1 „Kreisprozess“

Außerdem muss die Bedeutung des “Regenerators” an dieser Stelle erklärt werden. In Phase 2 nimmt er Wärme auf, in Phase 4 gibt er wieder Wärme ab.

Jetzt gemeinsam die erste oder die ersten beiden Zeile der Energie-Tabelle des ABs ausfüllen; Rest selbstständig durch Schüler!

Phase	Verhalten von p, V, und T	Verhalten von Q, W und ΔE_i
1	p sinkt, V steigt $\Delta V > 0$ $T =$ konstant	$T =$ konst $(= T_1) \Rightarrow \Delta E_{i,1} = 0$ 1. Hauptsatz: $Q_1 = -W_1$ $\rightarrow W_1 < 0$; $Q_1 > 0$
2	p sinkt, T sinkt $V =$ konstant	$\rightarrow \Delta E_{i,2} < 0$ $\rightarrow W_2 = -p\,\Delta V = 0$ } 1.H.S.: $Q_2 < 0$
3	$\Delta V < 0$, p steigt $T =$ konst	$T = T_3 =$ konst $\Rightarrow \Delta E_{i,3} = 0$ $W_3 > 0$; $Q_3 < 0$ (vgl. Ph. 1)
4	$V =$ konstant, T steigt p steigt	$\Delta E_{i,4} > 0 \rightarrow$ 1. HS (vgl. Ph. 2) $\Delta V = 0 \Rightarrow W_4 = 0 \Rightarrow Q_4 > 0$

Nun folgende Punkte gemeinsam im Unterricht erarbeiten:

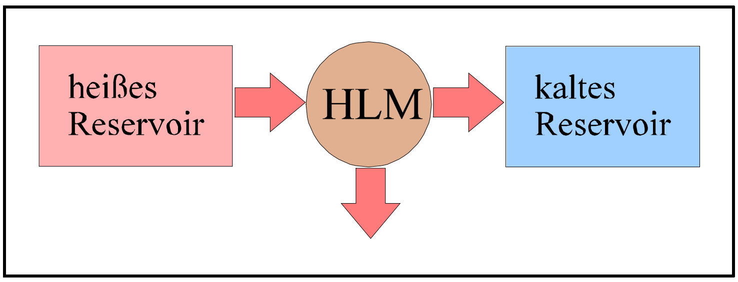
a) Begründe mithilfe des 1. Hauptsatzes, dass die beiden Wärmen Q_2 und Q_4 in den Phasen 2 und 4 entgegengesetzt gleich groß sein müssen. (Bei einer idealen Heißluftmaschine erfolgt dieser Energieaustausch durch den Regenerator am Verdrängerkolben; Q_2 und Q_4 spielen also *von außen betrachtet* bei einem vollständigen Zyklus keine Rolle.)

Bei einem vollständigen Kreisprozess ist $\Delta E_i = 0$.
Also gilt nach der Energietabelle:

$$0 = \Delta E_i = \cancel{W_1} + \underbrace{W_2}_{=0} + \cancel{W_3} + \underbrace{W_4}_{=0} + \cancel{Q_1} + Q_2 + \cancel{Q_3} + Q_4$$

$$= Q_2 + Q_4 \text{ ; also ist } Q_2 = -Q_4$$

b) Deute das folgende Diagramm: Wo liegt bei unserer HLM (Heißluftmaschine) das kalte, wo das heiße Reservoir? Erläutere die Energieübergänge; trage die entsprechenden Größen an die Energiepfeile an.



c) Erkläre, warum die HLM nicht funktionieren kann, wenn die Reservoire dieselbe Temperatur haben. Wann wird die HLM besonders gut funktionieren?

Die HLM wandelt offensichtlich nicht die gesamte hineingesteckte Energie in Arbeit um. Wie effizient diese Umsetzung ist, hängt von den Temperaturen der beiden Reservoire ab. Dies soll nun genauer untersucht werden:

d) Der **Wirkungsgrad η** einer Maschine ist definiert als Verhältnis von genutzter Energie zu investierter Energie. In unserem Fall ist die genutzte Energie die effektive Arbeit $W = W_1 + W_3$ (Beachte: $W_1 < 0$ und $W < 0$). Die investierte Energie ist Q_1:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_1} = \frac{|W_1 + W_3|}{Q_1}$$

Zeige zunächst, dass für die Volumenarbeit W_1 gilt: $W_1 = -n\,R \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V}\,dV \cdot T_1$

Leite dann auch eine entsprechende Formel für W_3 her.

Zeige nun, dass der Wirkungsgrad sich mithilfe der Temperaturen T_1 und T_3 des heißen bzw. kalten Reservoirs berechnen lässt: $\eta = 1 - \frac{T_3}{T_1}$.

e) Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik lautet (Mitteilung):

> *Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die Wärme ausschließlich in Arbeit umsetzt.*

Begründe dies für den Fall der HLM mithilfe der Formel für den Wirkungsgrad. Benutze dabei auch den 3. Hauptsatz der Thermodynamik (Mitteilung):

> Es ist unmöglich, durch irgendeinen Vorgang den absoluten Nullpunkt zu erreichen.

Didaktische Bemerkung: Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik kann auch mithilfe des Entropiebegriffs formuliert werden. Die in der Schulbuchliteratur vorgenommenen Herleitungen dazu basieren - genauso wie unsere Untersuchungen hier - letztlich auch auf der Wirkungsgradformel (oder greifen auf die mikroskopische Deutung der Entropie zurück).

6.3 Ergänzungen

6.3.1 Die Formel für den Wirkungsgrad gilt auch für alle anderen Wärmekraftmaschinen wie z. B. Dampfturbine oder Dieselmotor; wenn zusätzlich noch Reibungseffekte berücksichtigt werden, gilt: $\eta < 1 - \frac{T_3}{T_1}$.

6.3.2 Betreibt man eine HLM umgekehrt, d. h. treibt man das Rad von außen - z. B. über einen Elektromotor - an, so wird die Heißluftmaschine an einem Ende wärmer, am anderen kühler; es wird also Wärme von einem kühleren Reservoir zu einem wärmeren Reservoir transportiert. Eine derartige Maschine wird als **Wärmepumpe** bezeichnet. Mit ihrer Hilfe lassen sich z. B. Häuser über die in tieferen Erdschichten gespeicherte innere Energie (oft als Erdwärme bezeichnet) heizen.

Lösungen:

6.4.1. ΔE_i = Zunahme der inneren Energie des Gases
Q = dem Gas zugeführte Wärme
W = am Gas verrichtete Arbeit

	ΔE_i	Q	W
$A \to B$	-50	-70	20
$B \to C$	25	25	0
$C \to D$	100	140	-40
$D \to A$	-75	-75	0

$\Delta E_i = Q + W$

O = vorgegeben

Für $B \to C$ und $D \to A$ gilt $W = 0$, da $V = \text{konstant} \Leftrightarrow \Delta V = 0$

$W_{AB} = 1 \cdot 10^5\,\text{Pa} \cdot 2 \cdot 10^{-4}\,\text{m}^3 = 20\,\text{J}$

$W_{CD} = -2 \cdot 10^{-4}\,\text{m}^3 \cdot 2 \cdot 10^5\,\text{PA} = -40\,\text{J}$

6.4.2 $n = 1\,\text{mol}$ | $A\,(0{,}05 \mid 0{,}5)$ bei $T = 300\,\text{K}$ $B\,(0{,}013/2)$ $T = 300\,\text{K}$
$C\,(0{,}02 \mid 5)$ bei $T = 1200\,\text{K}$ $D\,(0{,}05/2)$ $T = 1200\,\text{K}$

a) $\dfrac{p \cdot V}{T \cdot n} = R$ Einsetzen der Werte liefert:
$A \to R = 8{,}33\ \text{J/g mol}$
$B \to R = 8{,}67\ \text{J/g mol}$
$C \to R = 8{,}33\ \text{J/g mol}$
$D \quad R = 8{,}33\ \dfrac{\text{J}}{\text{g mol}}$

b) $C \to D$ $T = \text{konstant} \Rightarrow p \cdot V = \text{konstant}$
$D \to A$ $V = \text{konst} \Rightarrow \dfrac{p}{T} = \text{konst}$
$A \to B$ Isotherme $\to p \cdot V = \text{konst}$
$D \to B$ Isobare, $p = \text{konst} \Rightarrow \dfrac{V}{T} = \text{konst}$

c) $W_{CD} = \int_{0{,}02}^{0{,}05} p\,dV$ Abschätzung durch Trapezfläche A_{Tr}

$A_{Tr} = \dfrac{(5+2) \cdot 10^5\,\text{Pa}}{2} \cdot 0{,}03\,\text{m}^3 = 10{,}5\,\text{kJ}$

Da die tatsächliche Fläche kleiner als die Trapezfläche ist gilt $W \approx 10\,\text{kJ}$

6.4.3 Die Formulierung im Text ist in so weit falsch, als keine zusätzliche Energie aus dem Nichts entstehen kann.
Bei der „Rechnung" wird die dem Gas zugeführte Wärme nicht berücksichtigt. Widerspruch zum 2. HS der Thermod.

6.4.4
Der Flächeninhalt des Rechtecks gibt an, um wieviel die vom Gas verrichtete Arbeit größer ist als die an ihm verrichtete Arbeit.

4.2.7 Hinweise und Lösungen zu Kapitel 7

Didaktische Bemerkungen: Der Entropiebegriff wird hier praktisch nur qualitativ betrachtet.

Lösungen:

4.2.7.2 Alles klar?

7.2.1. Gliederung: 1) Reversible und irreversible Vorgänge
2) Diffusion und Wahrscheinlichkeit
3) Entropie
4) Dissipation

7.2.2
Reversible Prozesse: Elastischer Stoß,
Pendel im Vakuum
Lichtausbreitung im Vakuum
jede ungedämpfte Schwingung
Irreversible Prozesse: freier Fall
unelastischer Stoß
alle Vorgänge, bei denen Reibung auftritt.

7.2.3
Das Diagram ist symmetrisch, weil die Wahrscheinlichkeit für jedes Teilchen für jede Seite $\frac{1}{2}$ ist. Es wird keine Seite und kein Teilchen bevorzugt.
$P_n(0) = (\frac{1}{2})^n$ hier: $P_5(0) = \frac{1}{32} = P_5(5)$

4.2.7.4 Aufgaben

7.4.1 Hier wird die Umkehrung eines irreversiblen Prozesses dargestellt. Dieser Vorgang ist <u>extrem</u> unwahrscheinlich

7.4.2 Die Entropie des Prozesses nimmt hier ab

7.4.3. $T_1 = 1000\,K$ $T_2 = 500\,K$ $T_3 = 300\,K$

Für den Wirkungsgrad η gilt $\eta = 1 - \frac{T_{kalt}}{T_{heiß}}$

$$\eta_1 = 1 - \frac{300}{1000} = 1 - \frac{3}{10} = 0{,}7 \Rightarrow W_1 = \eta_1 \cdot Q \Rightarrow W_1 = \underline{\underline{70\,J = W_1}}$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{300}{500} = 1 - 0{,}6 = 0{,}4 \Rightarrow W_2 = 0{,}4 \cdot Q = \underline{\underline{40\,J = W_2}}$$

$W_1 > W_2$, daher ist das Reservoir mit $T = 1000\,K$ wertvoller.

7.4.4 Situation 1: $S_1 = k \cdot \ln 1 = 0$ $(\Omega = 1)$

Situation 2: $\Omega = 6 \Rightarrow S_2 = k \cdot \ln 6 \approx k \cdot 1{,}79$

Der Entropiezuwachs beträgt $S_2 - S_1 = S_2 = \underline{\underline{k \cdot \ln 6 = \Delta S}}$

5. Klausuren

5.1 Heißluftmaschine und Wechselstrom (LK)

Eine quadratische Spule (Kantenlänge 20 cm) mit 20 Windungen wird – wie in Abb. 1 angedeutet – in einem homogenen, vertikal ausgerichteten Magnetfeld B durch eine Heißluftmaschine (HLM) mit konstanter Winkelgeschwindigkeit gedreht. Widerstand und Induktivität der Spule seien vernachlässigbar. Sie ist an ein Oszilloskop angeschlossen, das so getriggert ist, dass der Winkel $\alpha = 0°$ ist, wenn sich der Elektronenstrahl gerade in der Mitte des Bildschirms befindet ($t = 0$).

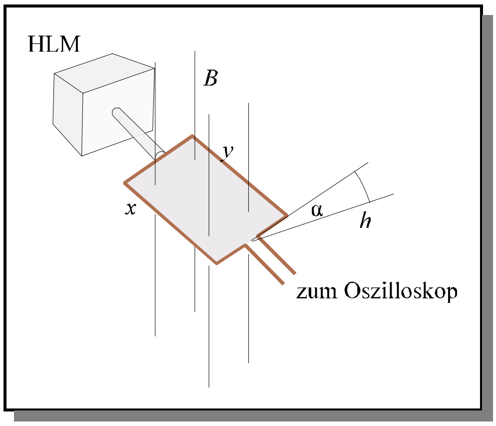


Abb. 1: Die Horizontale h steht senkrecht zu B und x bzw. y. Stellvertretend für die 20 Windungen ist nur eine einzige gezeichnet.

1. Leite aus dem Induktionsgesetz eine Formel für die in der Spule induzierte Spannung her. Berechne dann, wie groß die magnetische Flussdichte sein muss, damit sich das Oszillogramm in Abb. 2 ergibt.

2. Die Spule soll nun eine Glühlampe ($\hat{U} = 25$ V; $\hat{I} = 1{,}6$ A) bei einer Frequenz von 50 Hz betreiben. Dabei sind U und I in Phase.

2.1 Ermittle die Kraft, die dazu auf ein einzelnes Leiterstück x bzw. y wirken muss, wenn α gerade gleich 0° bzw. 90° ist?

2.2 Bestimme auch die bei einer Umdrehung insgesamt umgesetzte Energie.

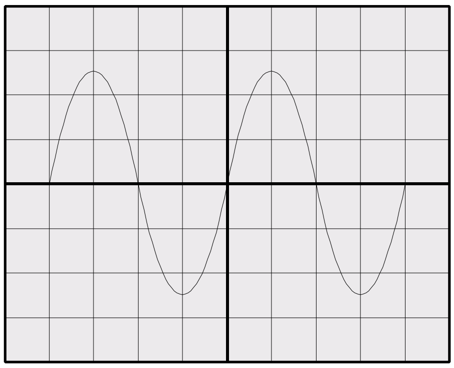


Abb. 2:
X-A.: 5 ms/Teil.; Y-A.:10V/Teil.

3. Die Glühlampe in Aufgabe 2 wird nun durch einen Kondensator ersetzt.

3.1 Die Spannung an der Spule werde durch $U(t) = \hat{U}\sin(\omega t)$ beschrieben. Leite eine Formel für $I(t)$ her.

3.2 Skizziere den zeitlichen Verlauf von Spannung und Stromstärke in einem einzigen Diagramm. Markiere in diesem Diagramm zwei Situationen mit gleicher Spannung, aber entgegengesetzter Stromstärke. Wie lassen sich diese beiden Situationen hinsichtlich der Momentanleistung deuten? Ermittle die mittlere Leistungsabgabe des Generators.

4. Der Heißluftmotor durchläuft beim Antrieb der Spule einen Kreisprozess, der in Abb. 3 wiedergegeben ist.

4.1 Beschreibe qualitativ die vier Phasen dieses Prozesses unter Verwendung der Größen p, V, T sowie Q, W und E_i.

4.2 Schätze aus Abb. 3 die bei einem Zyklus abgegebene mechanische Arbeit ab. Vergleiche sie mit der in Aufgabe 2 ermittelten Energie. Bestimme die bei jedem Umlauf zugeführte Wärme.

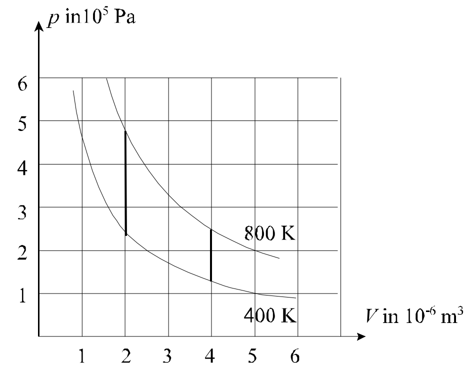


Abb. 3

2. Klausur zur Thermodynamik

Nach: Klett, Impulse Physik 2 Klausuraufgaben, S. 29, A. 33

Bemerkung: Zur Verkürzung könnten einige Ergebnisse aus Teilaufgabe 2 bzw. 4 vorgegeben werden.

Ein Kreisprozess

Eine abgeschlossene Luftmenge mit einem Volumen von V_A = 4,5 dm^3 hat bei einer Temperatur von T_A = 293 K einen Druck von p_A = 1100 hPa (Zustand A). Die Luft kann als ein ideales Gas betrachtet werden. Nacheinander finden folgende Zustandsänderungen statt:

(1) isotherme Kompression auf den dreifachen Druck (Zustand B)
(2) isochore Erhöhung der Temperatur um 150 K (Zustand C)
(3) isotherme Expansion auf den Ausgangsdruck (Zustand D)
(4) isobare Zustandsänderung in den Anfangszustand (A)

1. Bestimme aus den Angaben zum Zustand A, aus wie vielen Teilchen die Luftmenge besteht. Berechne auch ihre gesamte innere Energie. (Zur Kontrolle: $N = 1{,}224 \cdot 10^{23}$)

2. Berechne jeweils Druck, Volumen und Temperatur in den Zuständen B, C und D.

3. Skizziere das p-V-Diagramm für diesen Kreisprozess.

4. Bestimme die Änderung der inneren Energie E_i, die am Gas verrichtete Arbeit W sowie die dem Gas zugeführte Wärme Q für alle 4 Phasen; stelle die Ergebnisse in einer Tabelle zusammen.

5. Worin unterscheidet sich der hier betrachtete Prozess vom Stirlingschen Kreisprozess?

6. Dividiert man die pro Zyklus effektiv verrichtete Arbeit durch die insgesamt zugeführte Wärme, erhält man einen Wert, der kleiner ist als der maximale Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine. Weise dies durch Rechnung nach und gib hierfür eine Erklärung.

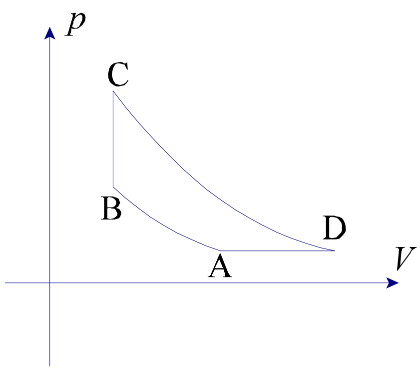
Lösung (verkürzt)

1. $N = \frac{p\,V}{k\,T} = 1{,}224 \cdot 10^{23}; \quad E_i = \frac{5}{2} N\,k\,T = 1237\,\mathrm{J}$

2. Mithilfe der Gasgleichung $pV = NkT$ erhält man:

Zustand	p in Pa	V in m³	T in K
A	$1{,}1 \cdot 10^5$	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$	293
B	$3{,}3 \cdot 10^5$	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	293
C	$4{,}99 \cdot 10^5$	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	443
D	$1{,}1 \cdot 10^5$	$6{,}8 \cdot 10^{-3}$	443

3. Skizze des p-V-Diagramms



4. Für den Prozess von A nach B gilt: $\Delta E_i = 0$, weil $\Delta T = 0$

$$W = -\int_{V_A}^{V_B} p\,\mathrm{d}V = -\int_{V_A}^{V_B} \frac{N\,k\,T_A}{V}\,\mathrm{d}V = N\,k\,T_A \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) = +\,543{,}7\,\mathrm{J}$$

$Q = -W = -543{,}7\,\mathrm{J}$ (Wegen des 1. Hauptsatzes)

Für den Prozess von B nach C gilt:

$\Delta T \; = \; 150\,\mathrm{K}$

$\Delta E_i \; = \; \frac{5}{2} N k \Delta T \; = \; 633{,}4\,\mathbf{J}$

$W = 0$, weil $\Delta V = 0$

$Q \; = \; \Delta E_i \; = \; 633{,}4\,\mathbf{J}$ wegen des 1. Hauptsatzes

Für den Prozess von C nach D erhält man auf ähnliche Weise:

$\Delta E_i = 0$; $W = -\,1131$ J; $Q = +\,1131$ J

Für den Prozess von D nach A gilt:

$$W \; = \; -p \cdot \Delta V \; = \; -1{,}1 \cdot 10^5\,\mathbf{Pa} \cdot (V_A - V_B) \; = \; -\; 1{,}1 \cdot 10^5\,\mathbf{Pa} \cdot (-\,2{,}3 \cdot 10^{-3}\,\mathbf{m}^3) \; = \; 253\,\mathbf{J}$$

$\Delta E_i = -\,633{,}4$ J (s. o.)

$Q \; = \; \Delta E_i \; - \; W \; = \; -\,886{,}4\,\mathbf{J}$

Tabelle:

Prozess	ΔE_i	W	Q
A → B	0	543,7 J	- 543,7 J
B → C	633,4 J	0	633,4 J
C → D	0	- 1131 J	1131 J
D → A	- 633,4 J	253 J	- 886,4 J

5. Der hier betrachtete Kreisprozess ist fast identisch mit dem Stirlingschen Kreisprozess; die beiden Prozesse unterscheiden sich lediglich in der Phase D → A: während hier ein isobarer Übergang stattfindet, ist er beim Stirlingprozess isochor.

6. Die Tabelle aus 4. liefert für den Wirkungsgrad $\eta \; = \; \frac{W_{res}}{Q_{zu}} \; = \; \frac{335\,\mathbf{J}}{1764\,\mathbf{J}} \; = \; 19\,\%$. Dagegen ist der maximale thermodynamische Wirkungsgrad $\eta_{\mathbf{max}} \; = \; 1 - \frac{T_3}{T_1} \; = \; 34\,\%$. Bei Q_{zu} wurde die gesamte Wärme, welche der Gasmenge in einem Zyklus zugeführt wird, eingesetzt. Bei der Herleitung der Formel für η_{max} wird berücksichtigt, dass die an den Verdrängerkolben abgegebenen Energie wieder an die Luft zurückgegeben wird. Dadurch ist beim Stirlingmotor Q_{zu} kleiner und der Wirkungsgrad damit größer als hier.