Mit diesen beiden Formeln erhalten wir für den Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_r}{T_c} \cdot \frac{\ln \frac{V_3}{V_4}}{\ln \frac{V_2}{V_1}}.$$

Das Gesetz der adiabatischen Zustandsänderung für die Prozesse2 ⟶ 3, bzw.4 ⟶ 1, wird wie folgt geschrieben:

$$T_c \cdot V_2^{\gamma-1} = T_r \cdot V_3^{\gamma-1},$$

$$T_c \cdot V_1^{\gamma-1} = T_r \cdot V_4^{\gamma-1}.$$

Daraus erhalten wir:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

Somit ergibt sich für den thermischen Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus die Formel:

$$\boxed{\eta_C = 1 - \frac{T_r}{T_c}.}$$

Der Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus hängt also nicht von der Art der Arbeitssubstanz ab, sondern nur von der Temperatur der beiden Wärmespeicher. Man kann den ***Lehrsatz von Carnot*** formulieren:

Lehrsatz: Alle Motoren, die auf Grund des reversiblen Carnot-Zyklus zwischen zwei gegebenen Temperaturen funktionieren, haben den gleichen Wirkungsgrad, unabhängig von der Art der Arbeitssubstanz.

Noch mehr, man kann beweisen, dass kein Motor, der zwischen zwei gegebenen Temperaturen arbeitet, einen größeren Wirkungsgrad haben kann, als der Carnot-Motor, der zwischen diesen beiden Temperaturen arbeitet. Das bedeutet, dass der Wirkungsgrad des Carnot-Motors, unter gegebenen Bedingungen, maximal ist.

Anmerkung: Der Carnot-Motor ist ein idealer Motor, er kann nicht ***praktisch*** realisiert werden.

1.6.2. Der Wirkungsgrad der Wärmekraftmotoren

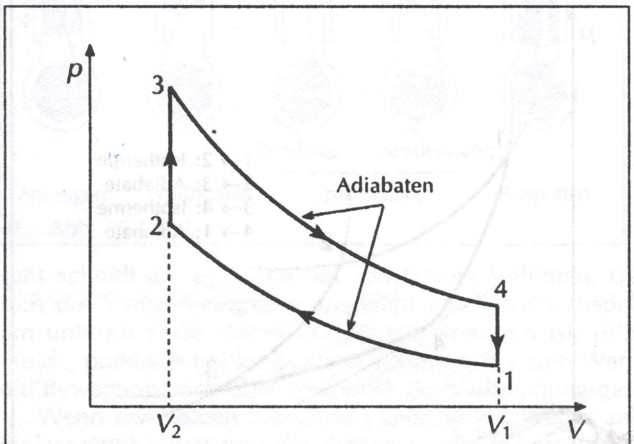


Abb. 1.6.2.1

Wir berechnen im Weiteren den Wirkungsgrad von idealen Zyklen, die den realen Motoren zugeordnet werden und vergleichen ihn mit dem Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus. Wir betrachten: a) den Otto-Zyklus; b) den Diesel-Zyklus; c) den Zyklus von Rankine (Dampfturbine).

Nehmen wir den Otto-Zyklus (Abb. 1.6.2.1). Das Verdichtungsverhältnis sei $\varepsilon = V_1/V_2$. Für die Berechnung des Wirkungsgrades verwenden wir die allgmeine Methode, und zwar wird eine Tabelle wie hier die Tabelle 1.6.2.1. aufgestellt.

Tabelle 1.6.2.1		
Prozess	Gesetz	Ausgetauschte Wärme
$1 \longrightarrow 2$	$T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1}$	$Q_{12} = 0$
$2 \longrightarrow 3$	$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$	$Q_{23} = \nu \cdot C_V \cdot (T_3 - T_2) > 0$
$3 \longrightarrow 4$	$T_3 \cdot V_2^{\gamma-1} = T_4 \cdot V_1^{\gamma-1}$	$Q_{34} = 0$
$4 \longrightarrow 1$	$\frac{p_4}{T_4} = \frac{p_1}{T_1}$	$Q_{41} = \nu \cdot C_V \cdot (T_1 - T_4) < 0$

Anmerkung: Um das Vorzeichen der Wärme zu finden, muss festgestellt werden, welche Temperatur größer ist. Dafür gehen wir von der Tatsache aus, dass die Temperatur, entsprechend der thermischen Zustandsgleichung $pV = \nu \cdot R \cdot T$, proportional mit dem Produkt $p \cdot V$, ist. Das bedeutet, dass im p–V – Diagramm die Temperatur eines Zustandes um so größer ist, je weiter sich der entsprechende Punkt von den Achsen entfernt befindet.

Für die Berechnung des Wirkungsgrades des Kreisprozesses verwenden wir die Formel $\eta = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_p}$.

Wenn wir in dieser Formel die Ausdrücke der Wärmen aus der Tabelle 1.6.2.1 verwenden, finden wir dass

$$\eta_O = 1 - \frac{|Q_{41}|}{Q_{23}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1}.$$

Anmerkung: Der letzte Ausdruck wurde erhalten, indem man jeweils die kleinere Temperatur als Faktor herausgehoben hat.

Aus den Gleichungen der Adiabaten (siehe Tabelle 1.6.2.1) folgt $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$.

Somit erhält man für den Wirkungsgrad des Zyklus von Otto $\eta_O = 1 - \frac{T_1}{T_2}$.

Aber aus der Gleichung der Adiabaten $1 \longrightarrow 2$ folgt $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$, womit man die Endformel für den Wirkungsgrad des Otto-Zyklus wie folgt erhält: $\boxed{\eta_O = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}}$.

Übung 1.6.2.1. Verwendet die Gleichungen der Zustandsänderungen aus der Tabelle 1.6.2.1, um zu beweisen, dass T_1 und T_3 die extremen Temperaturen - minimale,bzw. maximale – während des Ablaufs des Otto-Zyklus sind.

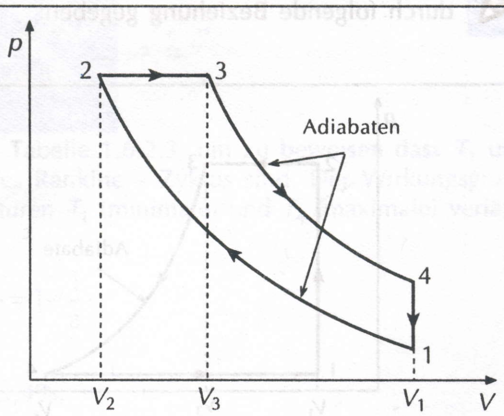


Abb. 1.6.2.2

Weil,

$$T_2 < T_3 \Rightarrow \frac{1}{T_2} > \frac{1}{T_3} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} > \frac{T_1}{T_3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1 - \frac{T_1}{T_2} < 1 - \frac{T_1}{T_3} \Rightarrow \eta_O < \eta_C.$$

Also: *Der Wirkungsgrad des Otto-Zyklus ist kleiner als der Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus, welcher zwischen den extremen Temperaturen T_1 und T_3 des Otto-Zyklus ablaufen würde.*

Nehmen wir den Zyklus von Diesel (Abb.1.6.2.2). Wir berechnen den Wirkungsgrad des Zyklus von Diesel η_D in Funktion der Verdichtungsverhältnisse $\varepsilon = V_1/V_2$ und $\rho = V_3/V_2$.

Für die Berechnung des Wirkungsgrades stellen wir zuerst folgende Tabelle auf :

Tabelle 1.6.2.2

Prozess	Gesetz	Ausgetauschte Wärme
$1 \to 2$	$T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1}$	$Q_{12} = 0$
$2 \to 3$	$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$	$Q_{23} = \nu \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) > 0$
$3 \to 4$	$T_3 \cdot V_3^{\gamma-1} = T_4 \cdot V_1^{\gamma-1}$	$Q_{34} = 0$
$4 \to 1$	$\frac{p_4}{T_4} = \frac{p_1}{T_1}$	$Q_{41} = \nu \cdot C_V \cdot (T_1 - T_4) < 0$

Wir verwenden die Formel $\eta = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_p}$

Wenn wir in dieser Formel die Ausdrücke aus der Tabelle 1.6.2.2 nehmen, finden wir

$$\eta_D = 1 - \frac{|Q_{41}|}{Q_{23}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\gamma \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\gamma \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}.$$

Auch hier erhalten wir die letzte Formel, indem wir die jeweils kleinere Temperatur als gemeinsamen Faktor nehmen.

Übung 1.6.2.2. Verwendet die Gleichungen aus der Tabelle 1.6.2.2, um zu beweisen, dass

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}; \; \frac{T_3}{T_2} = \rho; \; \frac{T_4}{T_1} = \rho^{\gamma}.$$

Mit Hilfe dieser Beziehungen erhält man die Endformel für den Wirkungsgrad des Zyklus von Diesel

$$\eta_D = 1 - \frac{\rho^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot \varepsilon^{\gamma-1} \cdot (\rho - 1)}.$$

Übung 1.6.2.3 Verwendet die Gleichungen aus der Tabelle 1.6.2.2, um zu beweisen, dass T_1 und T_3 die extremen Temperaturen während des Ablaufs des Diesel – Zyklus sind. Der Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus, der zwischen den extremen Temperaturen T_1 (minimale) und T_3 (maximale) abläuft ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_3} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1} \cdot \rho}.$$

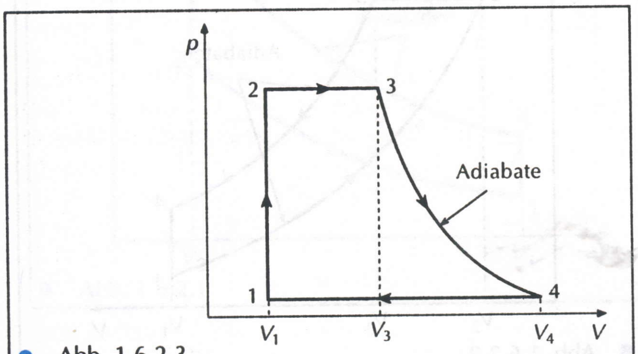


Abb. 1.6.2.3

Zahlenbeispiel: $\varepsilon = 10$, $\rho = 2$, $\gamma = 1{,}40$. Damit ist:

$$\eta_D = 0{,}534; \; \eta_D = 53{,}4\%;$$

$$\eta_C = 0{,}801; \; \eta_C = 80{,}1\% \; (> \eta_D).$$

Der letzte untersuchte Zyklus ist der Zyklus von Rankine (Abb. 1.6.2.3), welcher annähernd dem realen Funktionszyklus einer Dampfturbine entspricht. Wir berechnen den Wirkungsgrad des Zyklus von Rankine η_R in Funktion der Verdichtungsverhältnisse $\varepsilon = V_4/V_1$ und $\rho = V_3/V_1$. Auch in diesem Fall wird zuerst die folgende Tabelle angelegt:

Tabelle 1.6.2.3

Prozess	Gesetz	Ausgetauschte Wärme
$1 \to 2$	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	$Q_{12} = \nu \cdot C_V \cdot (T_2 - T_1) > 0$
$2 \to 3$	$\frac{V_1}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$	$Q_{23} = \nu \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) > 0$
$3 \to 4$	$p_2 \cdot V_3^\gamma = p_1 \cdot V_4^\gamma$	$Q_{34} = 0$
$4 \to 1$	$\frac{V_4}{T_4} = \frac{V_1}{T_1}$	$Q_{41} = \nu \cdot C_p \cdot (T_1 - T_4) < 0$

Wir bemerken, dass beim Rankine-Zyklus das System Wärme mit der Umwelt in drei Prozessen austauscht: $1 \to 2$, $2 \to 3$, $4 \to 1$. In einem solchen Fall wird die Formel zur Berechnung des Wirkungsgrades in folgender Form geschrieben

$$\eta = 1 - \frac{\sum |Q_c|}{\sum Q_p}.$$

Wenn wir in dieser Beziehung die Ausdrücke der Wärmen aus der Tabelle 1.6.2.3 verwenden, erhalten wir

$$\eta_R = 1 - \frac{|Q_{41}|}{Q_{12} + Q_{23}} = 1 - \frac{\gamma(T_4 - T_1)}{(T_2 - T_1) + \gamma(T_3 - T_2)}$$

Von hier folgt, wenn man die jeweils kleineren Temperaturen als gemeinsamen Faktor ausklammert

$$\eta_R = 1 - \frac{\gamma \cdot T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) + \gamma \cdot T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} = 1 - \frac{\gamma \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) + \gamma \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}.$$

Übung 1.6.2.4. Verwende die Gleichungen aus der Tabelle 1.6.2.3, um zu beweisen dass

$$\frac{T_4}{T_1} = \varepsilon,\ \frac{T_3}{T_2} = \rho,\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^\gamma.$$

Wenn wir diese Beziehungen verwenden, finden wir für den Wirkungsgrad des Rankine-Zyklus die Endformel

$$\eta_R = 1 - \frac{\gamma \cdot (\varepsilon - 1)}{\left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^\gamma \cdot [\gamma \cdot (\rho - 1) + 1] - 1}$$

Übung 1.6.2.5. Verwendet die Gleichungen aus der Tabelle 1.6.2.3, um zu beweisen dass T_1 und T_4 die extremen Temperaturen während des Ablaufs des Rankine – Zyklus sind. Der Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus, der zwischen den extremen Temperaturen T_1 (minimale) und T_4 (maximale) verläuft ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{1}{\varepsilon}.$$

Zahlenbeispiel: $\varepsilon = 3$, $\rho = 2$, $\gamma = 1{,}40$. Damit erhalt man:

$$\eta_R = 0{,}134;\ \eta_R = 13{,}4\%;$$

$$\eta_C = 0{,}667;\ \eta_C = 66{,}7\%\ (> \eta_R).$$

1.7. Das zweite Prinzip der Thermodynamik

Wenn ein thermodynamisches System eine zyklische Zustandsänderung durchläuft ($\Delta U = 0$), dann gilt laut erstem Prinzip der Thermodynamik

$$Q - L = 0.$$

Es gibt drei Möglichkeiten:

a) $L = Q = 0$ – das System tauscht mit der Umwelt weder mechanische Arbeit, noch Wärme aus;

b) $L = Q > 0$ – das System gibt mechanische Arbeit an die Umwelt ab und erhält von dieser Wärme;

c) $L = Q < 0$ – das System nimmt von der Umwelt mechanische Arbeit auf und gibt an diese Wärme ab.

Im Fall b) würde das thermodynamische System als ***Wärmekraftmotor*** funktionieren: bei jedem Zyklus erhält das System von der Umwelt Wärme und gibt an diese die mechanische Arbeit $L = Q$ ab. Das würde bedeuten, dass eine vollständige Umwandlung der Wärme in mechanische Arbeit stattfindet. Es wäre dafür ausreichend, wenn das System mit einem einzigen Wärmespeicher Wärme austauscht.

Bei der Analyse der Funktion der Wärmekraftmaschinen ist Sadi Carnot (1796 – 1832) im Jahr 1824 zur Schlussfolgerung gekommen, dass diese in obiger Weise, also mit einem einzigen Wärmespeicher, nicht funktionieren können und dass die vollständige Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit unmöglich ist.

Definition: Ein Prozess, bei dem ein thermodynamisches System Wärme mit einem einzigen Wärmespeicher austauscht, heißt ***monothermer Prozess***.

Die Formulierung von Thomson:

Das zweite Prinzip der Thermodynamik behauptet die Unmöglichkeit der vollständigen Umwandlung der Wärme in mechanische Arbeit durch zyklische reversible monotherme Prozesse.

Lehrsatz: Ein zyklischer reversibler monothermer Prozess, bei dem die vollständige Umwandlung von Wärme, die von einem einzigen Wärmespeicher abgegeben wird, in mechanische Arbeit stattfindet, ist unmöglich.

Anmerkungen:

1) Das zweite Prinzip der Thermodynamik behauptet die Unmöglichkeit der vollständigen Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit nur bei zyklischen reversiblen monothermen Prozessen. Im Falle eines offenen monothermen Prozesses, wie es z. B. der isotherme Prozess ist, ist diese Umwandlung möglich: $\Delta U = 0$ und $L = Q$ (siehe 1.4).

2) Die Tatsache, dass mechanische Arbeit vollständig in Wärme umgewandelt werden kann, während die vollständige Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit nicht möglich ist, ist eine fundamentale Asymmetrie der Natur.

Laut zweitem Prinzip der Thermodynamik gilt für einen zyklischen monothermen Prozess

$$L = Q \leq 0.$$

Wenn der zyklische monotherme Prozess auch reversibel ist, kann gezeigt werden dass

$$L_{rev} = Q_{rev} = 0.$$

Die Formulierung von Clausius

Wenn zwei Körper von verschiedener Temperatur miteinander in thermischen Kontakt gebracht werden, dann geht die Wärme spontan vom warmen auf den kalten Körper über.

Lehrsatz: Es ist kein Prozess möglich, bei dem Wärme von selbst von einem kalten auf einen wärmeren Körper übertragen wird.

Dieses Prinzip schließt die Funktion der Kältemaschinen nicht aus, bei denen ein äußerer Faktor mitwirkt, damit Wärme vom kalten auf den wärmeren Körper übertragen wird.

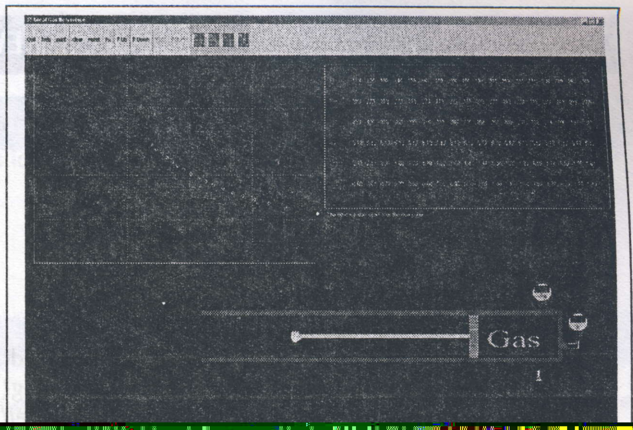
1.7.1 Virtuelle Experimente

Wir laden euch ein, ein virtuelles Labor zu betreten und in diesem Experimente durchzuführen, online oder direkt auf eurem Computer mit download von freeware- oder trial- Versionen. Das kann als freies Thema für zu Hause geschehen oder im Informatiklabor der Schule.

Für den Anfang könnt ihr die Gesetze der Gase überprüfen, indem ihr eine Gratisanwendung verwendet, die ihr mit download von der Adresse: http://www.physicslab.co.uk/ im link http://www.physicslab.co.uk/gas.htm herunterladen könnt.

Das Programm erlaubt die Festlegung eines der drei Parameter p, V oder T und die Beobachtung der gegenseitigen Abhängigkeit der beiden anderen Parameter. Ihr könnt die Koordinaten der Achsen wechseln, um die Abhängigkeit eines Parameters vom andern zu visualisieren, dann wenn der dritte Parameter konstant bleibt (Abb. 1.7.1.1).

Bei der Adresse: http://www.nahliksoft.com, im Link download, findet ihr eine Version (trial) für 30 Tage gültig eines virtuellen Labors mit dem Namen Virtual Physics. Mit dem Programm Thermodynamics (Abb. 1.7.1.2) könnt ihr die Wärmebewegung in Gasen visualisieren, sowie die Bahn eines Moleküls und das Durchmischen zweier Gase (Abb. 1.7.1.3).



ZUR BEWERTUNG

Formuliert Antworten auf die folgenden Fragen:

1. Was nennt man Wärmebewegung?
2. Was nennt man atomare Masseneinheit?
3. Was ist die Avogadrokonstante? Welches ist ihr Wert?
4. Was nennt man molare Masse?
5. Was ist ein thermodynamisches System?
6. Wie definiert man die Zustandsparameter?
7. Was nennt man thermodynamischen Gleichgewichtszustand?
8. Wie beschreibt man die quasistatische Zustandsänderung?
9. Welcher Zustandsparameter bleibt in den folgenden Prozessen konstant: isochorer, adiabatischer, isothermer, isobarer Prozess?
10. Unter welchen Bedingungen sind zwei thermodynamische Systeme miteinander in thermischem Kontakt?
11. Wie lautet das Prinzip der Transitivität des thermischen Gleichgewichts?
12. Was ist ein Thermostat (Wärmespeicher)?
13. Was versteht man unter Temperaturskala?
14. Wie lautet das Gesetz von Boyle-Mariotte?
15. Welches ist die Grundform des ersten Prinzips der Thermodynamik?
16. Auf welchen Wegen findet der Wärmetransfer statt?
17. Welches ist die Beziehung von Robert Mayer?
18. Welche Form hat die kalorische Zustandsgleichung?
19. Welches ist die Gleichung der adiabatischen Zustandsänderung?
20. Was nennt man bithermen Prozess?
21. Welches ist der Otto-Zyklus?
22. Wie lautet der Lehrsatz von Carnot?
23. Was nennt man spezifische latente Schmelzwärme?
24. Was sind gesättigte Dämpfe?

Bewertet mit richtig oder falsch:

1. Die empirische Temperatur eines thermodynamischen Systems wird auf der Basis der Transitivität des thermischen Gleichgewichts definiert, durch die konventionelle Wahl von zwei Bezugszuständen, denen zwei konventionelle Werte dieser Größe zugeordnet werden.
2. Eine Temperaturskala bedeutet eine Korrespondenz zwischen dem gemessenen Wert der thermometrischen Größe und ihrer Temperatur.
3. In (p,V)-Koordinaten ist die Adiabate steiler als die Isotherme.
4. Der Druck des idealen Gases hängt von der Anzahl der Moleküle pro Volumeneinheit ab.
5. Die realen Gase befolgen die Gesetze des idealen Gases bei kleinem Druck und hoher Temperatur.
6. Beim Übergang aus dem Dampfzustand in den flüssigen Zustand geben die thermodynamischen Systeme isotherm Wärme an die Umwelt ab.
7. Bei der isothermen Kompression des Gases wird die innere Energie kleiner.
8. Die Wärmekraftmotoren mit äußerer Verbrennung haben einen höheren Wirkungsgrad als die Motoren mit innerer Verbrennung.
9. Das Eis kann bei Temperaturen über 0°C schmelzen, wenn der Druck größer ist als der atmosphärische Druck.
10. Durch Verdoppeln der Anzahl der Moleküle eines idealen Gases aus einem Gefäß bei konstanter Temperatur wird der Druck Vier Mal größer.

Aufgaben mit einer einzigen richtigen Antwort:

1. Ein geschlossenes thermodynamisches System hat folgende Wechselwirkungen:
   a. Austausch von mechanischer Arbeit und Masse mit der Umwelt
   b. Energieaustausch ohne Masseaustausch mit der Umwelt
   c. keinen Energie- und keinen Masseaustausch mit der Umwelt
   d. Wärme- und Masseaustausch mit der Umwelt
2. Ein thermodynamischer Prozess, bei dem Wärme auf einen Körper mit höherer Temperatur übertragen wird, ist:
   a. zyklisch
   b. adiabatisch
   c. ist niemals möglich
   d. ist durch Eingriff der Umwelt möglich
3. Wenn das ideale Gas bei einer isothermen Zustandsänderung mechanische Arbeit aufnimmt, dann:
   a. fällt der Druck
   b. steigt das Volumen
   c. fällt die Konzentration seiner Moleküle
   d. steigt die innere Energie

4. Die innere Energie des idealen Gases:
   a. ist beim isothermen Prozess konstant
   b. steigt bei der adiabatischen Ausdehnung
   c. fällt bei der isochoren Erwärmung
   d. ist Null bei zyklischen Prozessen
5. Das Verdoppeln der Dichte einer konstanten Masse eines idealen Gases kann erzielt werden durch:
   a. Verdoppeln des Drucks
   b. Halbieren des Volumens
   c. Verdoppeln des Volumens
   d. Halbieren des Drucks

Erklärt mit Hilfe der physikalischen Gesetze aus diesem Kapitel:

1. Warum ist das Klima in der Meeresgegend gemäßigter (wärmerer Winter und kühlerer Sommer) als in kontinentalen Gegenden?
2. Warum halten enge Handschuhe nicht warm?
3. Warum kann man im Winter ein Zimmer leichter lüften als im Sommer?
4. Warum erwärmt sich das Meereswasser nach einem starken Sturm?
5. Warum kracht das Holz beim Verbrennen?
6. Warum verträgt man die Sommerhitze besser, dann wenn die Luft trocken ist, als wenn sie feucht ist?
7. Warum klebt die nasse Hand an der Türklinke, dann wenn draußen Frost herrscht?
8. Warum erzeugen Flugzeuge, die sehr hoch fliegen, eine weiße Spur am Himmel?

Aufgaben

Aufgabe 1.1. Die Avogadrosche Zahl sei: $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{26}$ Moleküle/kmol.
a) Berechne die Anzahl der Moleküle aus 1 kg Kohlendioxid (CO_2);
b) Berechne die Masse eines Moleküls von Kohlendioxid;
c) Berechne die Anzahl der Moleküle aus 1 m³ CO_2 bei Normalbedingungen ($V\mu_0 = 2{,}42$ m³/kmol)
d) Berechne den mittleren Abstand zwischen CO_2 – Molekülen bei Normalbedingungen.

R: $N = 1{,}37 \cdot 10^{25}$; $m_{CO_2} = 7{,}31 \cdot 10^{-26}$ kg; $N = 2{,}7 \cdot 10^{25}$; $d \cong 3{,}3 \cdot 10^{-9}$ m;

Aufgabe 1.2. Ein Gas wird bei konstantem Druck von der Temperatur $t_1 = 27$ °C bis $t_2 = 127$ °C erwärmt. Um wieviel Prozent ändert sich das Volumen des Gases?

R: $f_V = 0{,}33$.

Aufgabe 1.3. Die Temperatur einer konstanten Gasmenge fällt isochor von $t_1 = 127$ °C bis auf $t_2 = -27$ °C. Um wieviel Prozent fällt der Druck des Gases?

R: $f_p = 0{,}5$.

Aufgabe 1.4. a) Berechne die Masse des Kohlendioxids (CO_2) aus einem Behälter vom Volumen $V = 4 \cdot 10^{-3}$ m³ bei der Temperatur $T = 400$K und beim Druck $p = 8{,}3 \cdot 10^5$ N/m², wenn der Wert der allgemeinen Gaskonstanten $R = 8{,}31 \cdot 10^3$ J/Vmolk ist, b) Berechne die Dichte des Gases.

R: $m = 44 \cdot 10^{-3}$ kg; $\rho = 11$ kg/m³.

Aufgabe 1.5. In der Abb. P 1.5. sind Gleichgewichtszustände der gleichen Masse eines Gases im (p, T) Diagramm. In welcher Beziehung zueinander stehen die Volumina V_1, V_2 und V_3?

R: $V_2 = V_3 > V_1$.

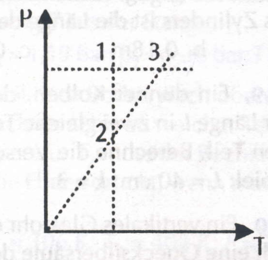


Abb. P 1.5

Aufgabe 1.6. Es sind m_i die Massen und μ_i die Molmassen der Gase, die ein Gemisch bilden, wobei $i = 1, 2, \ldots, N$. Berechne die mittlere (scheinbare) molare Masse μ des Gemisches.
Zahlenbeispiel: $N = 2$, $m_1 = 7$ g (Stickstoff), $m_2 = 8$ g (Sauerstoff). **R:** $\mu = 30$ kg/ kmol.

Aufgabe 1.7. Wenn das Volumen eines Gases isotherm kleiner wird, steigt der Druck um f_{p1}% Berechne um wieviel Prozent der Druck fällt, wenn das Volumen um den gleichen Wert größer wird?
Zahlenbeispiel: $f_{p1}\% = 50\%$.

R: $f_{p2}\% = 25\%$.

Aufgabe 1.8. In zwei identischen Gefäßen befinden sich gleiche Massen Helium, bzw. Argon, bei derselben Temperatur. Das Verhältnis der Drücke der beiden Gase ($\mu_{He} = 4$ kg/kmol, $\mu_{Ar} = 40$ kg/kmol) ist:
a. 0,1 b. 10 c. 5 d. 40 e. 1/5.

Aufgabe 1.9. Wenn ein Gas bei konstantem Druck um 1 K erwärmt wird, steigt sein Volumen 3 Mal.Die Anfangstemperatur des Gases in diesem Prozess ist:
a. 6 K b. 0,5 K c. 10K d.100K e. 500 K.

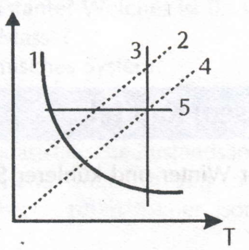


Abb. P 1.10

Aufgabe 1.10. Welcher der folgenden Prozesse ist isobar. Siehe Abb. P.1.10.
a. 1
b. 2
c. 3
d. 4
e. 5

Aufgabe 1.11. Wenn der Druck eines idealen Gases um 10% und das Volumen um 20% steigt, dann ändert sich seine Temperatur um:
a. 35% b. 5% c. 10%
d. 30% e. 32%.

Aufgabe 1.12. Ein Glasrohr von 1 m Länge, an einem Ende geschlossen, wird mit dem offenen Ende in ein Gefäß mit Quecksilber bis zur Tiefe L/4 eingetaucht. Wenn der atmosphärische Druck $10^5 N/m^2$ beträgt und die Anfangstemperatur 300 K, dann beträgt die Änderung der Temperatur der Luft aus dem Rohr, bei welcher das Quecksilber aus dem Rohr dringt:
a. 98 K b. 186 K c. 52 K d. 72 K e. 111K.

Aufgabe 1.13. Ein ideales Gas ist zu Beginn bei Normalbedingungen und es wird das Volumen isobar um 25% vergrößert. Das Gas erreicht dabei die Temperatur:
a. 44,7°C b. 426K c. 369K d.68,3°C e. 136,5°C.

Aufgabe 1.14. Bei einem Luftdruck von 760 Torr zeigt ein Barometer 759 Torr an. Das Gas aus der Barometerkammer hat den Druck:
a. 133,3 N/m² b. 20 torr c.12 torr d. 850 N/m² e. 1,31 kN/m².

Aufgabe 1.15. Ein Zimmer wird von 15 °C auf 27 °C erwärmt. Die Anzahl der Luftmoleküle aus dem Zimmer ändert sich um:
a. 12% b. 50% c. –4% d. 4% e. –12%.

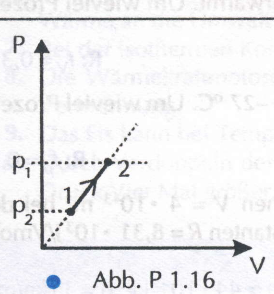


Abb. P 1.16

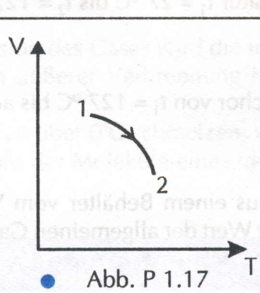


Abb. P 1.17

Aufgabe 1.16. Für eine konstante Gasmasse ist beim Prozess 1→2 aus der Abb. P. 1.16 der Quotient der Drücke p_2/p_1=n. Der Quotient der Temperaturen T_2/T_1 ist:
a. n+1 b. n c. n² d. (n+1)/n e. (n+1)/n².

Aufgabe 1.17. Ein ideales Gas erleidet den Prozess 1→2 aus der Abb. P.1. 17, wobei der Druck konstant ist. Dabei wird die Masse des Gases: a. größer; b. kleiner; c. bleibt konstant; d. fällt mit fallendem Druck; steigt mit fallendem Volumen.

Aufgabe 1.18. Ein Zylinder mir der Länge 1m,an beiden Enden geschlossen, ist durch einen Kolben in zwei Teile geteilt: im ersten befindet sich 1 kg Sauerstoff und im zweiten 0,5 kg Wasserstoff, beide bei derselben Temperatur. Bei horizontaler Position des Zylinders ist die Länge des Teiles mit dem Sauerstoff (μ_{O2} = 32kg/kmol, μ_{H2} = 2kg/kmol):
a. 0,11m b. 0,18m c. 0,22m d. 0,5m e. 0,75m

Aufgabe 1.19. Ein dünner Kolben, der ohne Reibung gleiten kann, ist zu Beginn festgehalten und teilt einen horizontalen Zylinder der Länge L in zwei gleiche Teile. Darin befindet sich ein Gas, so dass sein Druck aus einem Teil k Mal größer ist als aus dem anderen Teil. Berechne die Verschiebung x des Kolbens, wenn er frei gelassen wird.
Zahlenbeispiel: L = 40 cm; k = 3. **R:** x = 0,1m.

Aufgabe 1.20. Ein vertikales Glasrohr der Länge L, am unteren Ende geschlossen, enthält eine Luftsäule von unbekannter Länge L_1, die durch eine Quecksilbersäule der Länge h eingeschlossen ist. Wenn das Rohr mit dem offenen Ende nach unten gedreht wird, rinnt die Hälfte des Quecksilbers heraus. Der atmosphärische Druck ist p_a. Bestimme L_1.
Zahlenbeispiel: L = 1 m; h = 0,1m; p_a = 750 Torr. **R:** L_1 = 0,78 m.

Aufgabe 1.21. Ein vertikales Rohr, am oberen Ende geschlossen, wird in ein Gefäß mit Quecksilber eingetaucht, so dass das Quecksilber drinnen so hoch steht wie draußen. Die Luftsäule aus dem Rohr hat die Länge L. Das Rohr wird dann vertikal eine Strecke d herausgezogen, wobei das untere Ende immer noch im Quecksilber verbleibt. Der atmosphärische Druck ist p_a. Welche Höhe h hat am Ende die Quecksilbersäule im Rohr?
Zahlenbeispiel: $L = 73$ cm; $d = 4$ cm; $p_a = 750$ Torr. **R: $h = 0{,}02$ m.**

Aufgabe 1.22. Bei normalem atmosphärischem Druck hat die Quecksilbersäule aus einem vertikalen Barometerrohr die Länge h und die Luftsäule die Länge L. Um welche Strecke x muss das Rohr in das Quecksilbergefäß eingetaucht werden, damit das Quecksilber drinnen so hoch steht wie draußen?
Zahlenbeispiel: $h = 40$ cm; $L = 19$ cm. **R: $x = 0{,}5$ m.**

Aufgabe 1.23. Ein Becher der Masse m und mit dem Querschnitt S wird mit der Öffnung nach unten in Wasser getaucht. Wenn auf den Boden des Bechers ein Körper mit der Masse m' gelegt wird, senkt sich dieser bis zum Niveau des Wassers aus dem Gefäß und der Becher schwimmt. Der atmosphärische Druck ist p_a. Berechne: a) wieviel Prozent des Bechers sind mit Wasser gefüllt; b) die Höhe L des Bechers.
Zahlenbeispiel: $m = 100$ g; $S = 30$ cm²; $m' = 100$ g; $p_a = 1$ bar. **R: $f_v\% = 0{,}96\%$; $L = 0{,}1$ m.**

Aufgabe 1.24. In der Abb.P 1.24 sind im (V,T) Diagramm zyklische Prozesse eines idealen Gases dargestellt. Stelle diese Prozesse im (p,T) und im (p,V) Diagramm dar.

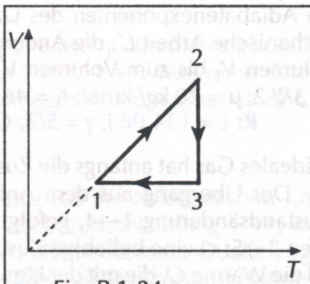


Fig. P 1.24-a

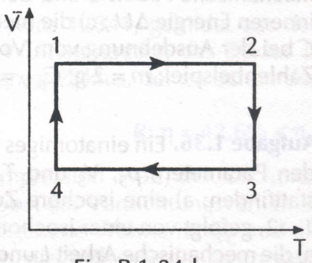


Fig. P 1.24-b

Aufgabe 1.25. Zeichne im Koordinatensystem (p,T), (p,V) und (V,T) die zyklischen Prozesse aus der Abb. P 1.25 a und b.

Aufgabe 1.26. Wenn das Volumen eines Gases um $f_v\%$ verkleinert und das Gas um ΔT K erwärmt wird, steigt der Druck um $f_p\%$. Berechne die Anfangstemperatur T_i.
Zahlenbeispiel: $f_v\% = 20\%$; $\Delta T = 12$ K; $f_p\% = 30\%$. **R: $T_i = 300$ K.**

Aufgabe 1.27. In einem vertikalen zylindrischen Gefäß mit dem Querschnitt S ist eine Gassäule der Höhe h mit einem Kolben von vernachlässigbarer Masse, der sich ohne Reibung bewegen kann, eingeschlossen. Die Temperatur des Gases ist t_1. Der atmosphärische Druck ist p_a. Auf den Kolben wird ein Körper mit der Masse m gelegt und danach wird das Gas erwärmt. Um wieviel Grad wurde das Gas erwärmt, wenn der Kolben sich um die Strecke d abgesenkt hat?
Zahlenbeispiel: $S = 98$ cm²; $h = 6$ dm; $t_1 = 27$ °C; $p_a = 1$ bar; $m = 30$ kg; $d = 1$ dm. **R: $\Delta T = 25$ K.**

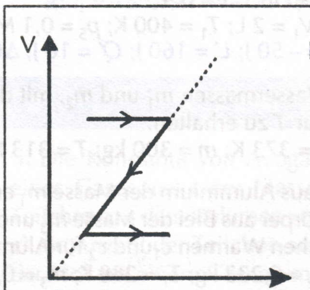


Fig. P 1.25-a

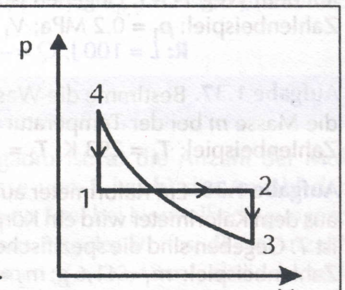


Fig. P 1.25-b

Aufgabe 1.28. Ein wärmeleitender Kolben, der sich ohne Reibung bewegen kann, teilt ein horizontales geschlossenes zylindrisches Gefäß in zwei Teile im Verhältnis $k = V_1/V_2$. Die Anfangstemperaturen der Gase in den beiden Teilen sind t_1 und t_2, wobei der Kolben im Gleichgewicht ist. Berechne das Verhältnis der Volumina $k' = V_1'/V_2'$ nach dem Eintreten des thermodynamischen Gleichgewichts.
Zahlenbeispiel: $k = 1{,}5$; $t_1 = 27$ °C; $t_2 = 127$ °C. **R: $k' = 2$.**

Aufgabe 1.29. Zwei horizontale Zylinder vom Querschnitt S_1 und S_2 haben ihre Kolben durch eine Stange starr miteinander verbunden. Zu Beginn sind die Rauminhalte V_1 und V_2 und die Luft hat sowohl im Inneren als auch draußen den normalen atmosphärischen Druck und die Temperatur t. Man erwärmt die Luft aus Zylinder 1 bis zur Temperatur T_1. Berechne: a) den Weg x, um welchen sich die Kolben verschieben; b) die Endwerte für p_1 und p_2 der Luft aus den Zylindern; c) die Spannung T aus der Stange.
Zahlenbeispiel: $S_1 = 2$ dm²; $S_2 = 1$ dm²; $V_1 = 6$ L; $V_2 = 1{,}5$ L; $t = 27$ °C; $T_1 = 400$ K. **R: $x = 0{,}04$ m; $p_1 = 1{,}19$ bar; $p_2 = 1{,}38$ bar; $T = 721$ N.**

Aufgabe 1.30. Ein zylindrischer Becher mit dem Querschnitt S und mit der Masse m wird mit dem Boden nach oben auf eine horizontale Fläche gelegt. Die Temperatur beträgt t und der atmosphärische Druck ist p_a. Berechne: a) bis zu welcher Temperatur T_1 muss der Becher erwärmt werden, damit die Luft daraus entweicht; b) bis zu welcher Temperatur T_2 muss der Becher erwärmt werden, damit die Luft zu $f\%$ der Masse entweicht; c) die Kraft, mit welcher der Becher auf die Ebene drückt, wenn man ihn von T_2 auf t abkühlt.
Zahlenbeispiel: $S = 9{,}8$ cm²; $m = 200$ g; $t = 27$ °C; $p_a = 1$ bar; $f\% = 25\%$. **R: $T_1 = 306$ K; $T_2 = 408$ K; $F = 26{,}46$ N.**

Aufgabe 1.31. Zwei identische Gefäße enthalten verschiedene Gase bei der Temperatur t_1 und beim Druck p_1, bzw. t_2 und p_2. Die Gefäße werden miteinander in Verbindung gebracht und bis zur Temperatur t erwärmt. Berechne den Endwert des Drucks p.
Zahlenbeispiel: $t_1 = 27$ °C; $p_1 = 1{,}5$ atm; $t_2 = 17$ °C; $p_2 = 2{,}9$ atm; $t = 127$ °C. **R: $p = 3$ atm.**

Aufgabe 1.32. Auf einer horizontalen, reibungslosen Ebene befinden sich zwei identische Gefäße, verbunden durch eine feste Röhre, die eine trennende Membran enthält. Der Abstand zwischen den Zentren der Gefäße ist L. Ein Gefäß enthält Wasserstoff, das andere Stickstoff bei derselben Temperatur, aber bei einem k Mal größeren Druck. Berechne den Weg x, um welchen sich das System verschiebt, wenn die Membran reißt.
Zahlenbeispiel: $L = 58$ cm; $k = 2$. **R:** $x = 27$ cm.

Aufgabe 1.33. Eine Stickstoffmasse m befindet sich anfangs bei normalem Druck und bei der Temperatur t_1. Durch isochores Erwärmen wird der Druck k Mal größer. Berechne: a) die Endtemperatur T_2; b) das Volumen V des Gases; c) die aufgenommene Wärme Q.
Zahlenbeispiel: $m = 14$ g; $t_1 = 27$ °C; $k = 2$. **R:** $T_2 = 600$ K; $V = 12{,}3$ dm³; $Q = 3{,}12$ kJ.

Aufgabe 1.34. Das Volumen einer Wasserstoffmenge der Masse m, anfangs mit der Temperatur t_1, steigt k Mal durch isobare Ausdehnng. Berechne: a) die vom Gas verrichtete mechanische Arbeit L; b) die aufgenommene Wärme Q; c) die Änderung der inneren Energie ΔU.
Zahlenbeispiel: $m = 2$g; $t_1 = 27$°C; $k = 3$. **R:** $L = 4{,}99$ kJ; $Q = 17{,}46$ kJ; $\Delta U = 12{,}47$ kJ.

Aufgabe 1.35. Eine Gasmasse m, mit der isochoren molaren Wärme $C_{\mu,V}$ und der molaren Masse μ, mit der Anfangstemperatur t_1, dehnt sich isobar beim Druck p aus, so dass das Endvolumen V_2 beträgt. Berechne: a) die bei diesem Prozess verrichtete mechanische Arbeit L und den Adiabatenexponenten des Gases γ; b) die aufgenommene Wärme Q und die Änderung der inneren Energie ΔU ; c) die mechanische Arbeit L', die Änderung der inneren Energie $\Delta U'$ und die Wärmekapazität des Gases C bei der Ausdehnung vom Volumen V_1 bis zum Volumen V_2 nach dem Gesetz $p = \alpha \cdot V$.
Zahlenbeispiel: $m = 2$ g; $C_{\mu,V} = 3R/2$; $\mu = 20$ kg/ kmol; $t_1 = 46{,}85$ °C; $p = 200$ kPa; $V_2 = 2$ L; $V_1 = 1$ L; $\alpha = 10^8$ N/m⁵.
R: $L = 134{,}08$ J; $\gamma = 5/3$; $Q = 335{,}2$J; $\Delta U = 201{,}12$ J; $L' = 150$ J; $\Delta U' = 450$ J; $C = 1{,}662$ J/K.

Aufgabe 1.36. Ein einatomiges ideales Gas hat anfangs die Zustandsparameter p_1, V_1 und T_1 und erreicht einen Endzustand mit den Parametern p_5, V_5 und T_5. Der Übergang aus dem Anfangs- in den Endzustand kann auf drei verschiedenen Wegen stattfinden: a) eine isochore Zustandsänderung 1→4, gefolgt von einer isobaren 4→5; b) eine isotherme Zustandsänderung 1→2, gefolgt von einer isochoren 2→5; c) eine beliebige Zustandsänderung 1→3, gefolgt von einer isobaren 3→5. Bestimme: a) die mechanische Arbeit L und die Wärme Q, die mit der Umwelt auf dem Weg 1-4-5 ausgetauscht werden; b) die mechanische Arbeit L' und die Wärme Q', die mit der Umwelt auf dem Weg 1-2-5 ausgetauscht werden; c) die Änderung der inneren Energie auf dem Weg 1-3-5. Gegeben ist: ln 1,5 = 0,4.
Zahlenbeispiel: $p_1 = 0{,}2$ MPa; $V_1 = 2$ L; $T_1 = 400$ K; $p_5 = 0{,}1$ Mpa; $V_5 = 3$ L; $T_5 = 300$ K.
R: $L = 100$ J; $Q = -50$ J; $L' = 160$ J; $Q' = 10$ J; $\Delta U = -150$ J.

Aufgabe 1.37. Bestimme die Wassermassen m_1 und m_2, mit den Temperaturen T_1 und T_2 ($>T_1$), die man vermischen muss, um die Masse m bei der Temperatur T zu erhalten.
Zahlenbeispiel: $T_1 = 293$ K; $T_2 = 373$ K; $m = 300$ kg; $T = 313$ K. **R:** $m_1 = 225$ kg; $m_2 = 75$ kg.

Aufgabe 1.38. Ein Kalorimeter aus Aluminium der Masse m_1 enthält die Masse m_2 Wasser bei der Temperatur T_1. In das Wasser aus dem Kalorimeter wird ein Körper aus Blei der Masse m_3 und mit der Temperatur T_3 eingeführt. Die Gleichgewichtstemperatur ist T. Gegeben sind die spezifischen Wärmen c_1 und c_2 für Aluminium, bzw. Wasser. Bestimme die spezifische Wärme c_3 für Blei.
Zahlenbeispiel: $m_1 = 41{,}6$ g; $m_2 = 0{,}232$ kg; $T_1 = 288$ K; $m_3 = 0{,}1$ kg; $T_3 = 373$ K; $T = 289$ K; $c_1 = 920$ J/(kg · K); $c_2 = 4180$ J/(kg · K).
R: $c_3 = 120$ J/(kg.K).

Aufgabe 1.39. Eine Wärmekraftmaschine funktioniert nach dem Zyklus von Carnot. Das Gas gibt an eine kalte Quelle den Bruchteil f der, von der warmen Quelle erhaltenen Wärme ab. Die Temperatur der warmen Quelle ist t_c. Bestimme die Temperatur t_r der kalten Quelle.
Zahlenbeispiel: $f = 0{,}6$; $t_c = 227$ °C. **R:** $t_r = 26{,}94$ °C.

Aufgabe 1.40. Der Wirkungsgrad eines Carnot-Zyklus, bei dem die kalte Quelle die Temperatur t_r hat, ist η. Die von der warmen Quelle erhaltene Warme ist Q_p. Die Arbeitssubstanz ist ein ideales Gas. Bestimme: a) die an die kalte Quelle abgegebene Wärme Q_c, b) die geleistete mechanische Arbeit L; c) um wieviel Grad muss die Temperatur der warmen Quelle erhöht werden, damit der Wirkungsgrad η′ wird?
Zahlenbeispiel: $t_r = 7$ °C; $\eta = 40\%$; $Q_p = 1{,}2$ kJ; $\eta' = 50\%$. **R:** $Q_c = -720$ J; $L = 1{,}2$ kJ; $\Delta T = 93{,}4$ K.

Aufgabe 1.41. In einem Zylinder mit Kolben befindet sich eine Menge ideales Gas mit den Parametern (p_1, V_1, T_1). Das Gas erleidet folgende Zustandsänderungen:
1. isochores Erwärmen bis $p_1 = 1{,}5\ p_1$;
2. isobare Ausdehnung bis $V_3 = 2V_1$;
3. isochores Abkühlen bis $p_4 = p_1$;
4. isobare Kompression bis zum Anfangszustand.

a) Stellt die Prozesse im (p, V), (p, T) und (V, T) – Diagramm grafisch dar.
b) Berechne die Temperatur des Gases im Zustand 3, wenn bekannt ist, dass $T_1 = 300$ K.
c) Berechne den Wirkungsgrad eines Carnot-Zyklus, welcher zwischen den extremen Temperaturen abläuft, die in dieser Prozessfolge erreicht werden.

R: $T_3 = 900$ K; $\eta_c = 0{,}67$.

Aufgabe 1.42. Eine Wärmekraftmaschine funktioniert nach einem Carnot-Zyklus zwischen den Temperaturen T_1 und T_2 ($< T_1$) mit ν Mol Helium. Der Druck nach der isothermen Ausdehnung ist gleich mit dem vor der adiabatischen Kompresion. Bestimme: a) den Wirkungsgrad η; b) die von der warmen Quelle bei einem Zyklus erhaltene Warme Q_p; c) die nützliche Leistung der Maschine, wenn k Zyklen in einer Sekunde ablaufen. Gegeben ist $C_v = 3R/2$.
Zahlenbeispiel: $T_1 = 1200$ K; $T_2 = 300$ K; $\nu = 5$ mol; $k = 10$.
R: $\eta = 75\%$; $Q_p = 172{,}76$ kJ; $P_u = 1{,}296$ MW.

Aufgabe 1.43. ν Mol eines idealen Gases mit dem Adiabatenexponent γ durchlaufen einen Zyklus, gebildet aus einer isothermen Verdichtung, einer Isobaren und einer Isochoren, in der genannten Reihenfolge. Die Isotherme entspricht der Temperatur T_1. Das Verhältnis vom maximalen und minimalen Gasvolumen während des Zyklus ist ε (>1). Bestimme: a) die bei einem Zyklus geleistete mechanische Arbeit; b) den Wirkungsgrad η des Kreisprozesses; c) den Wirkungsgrad η_C eines Carnot-Zyklus, der zwischen denselben extremen Temperaturen funktionieren würde.
Zahlenbeispiel: $\nu = 4 \cdot 10^3$ mol; $\gamma = 5/3$; $T_1 = 400$ K; $\varepsilon = 2$.
R: $L = 4{,}08$ MJ; $\eta = 12{,}28\%$; $\eta_C = 50\%$.

Aufgabe 1.44. Ein ideales Gas durchläuft den Zyklus 1231, gebildet aus der isobaren Ausdehnung 1→2, der adiabatischen Ausdehnung 2→3 und der isothermen Kompression 3→1, wobei $T_2 = e \cdot T_1$, wo e =2,71 die Basis der natürlichen Logarithmen ist. Bestimme: a) den Wirkungsgrad η des Kreisprozesses, b) den Wirkungsgrad eines Carnot-Zyklus η_C mit denselben extremen Temperaturen wie der gegebene Zyklus.
R: $\eta = 41{,}5\%$; $\eta_c = 61{,}3\%$.

Aufgabe 1.45. Eine Menge ideales Gas mit dem Adiabatenexponenten γ durchlauft einen Zyklus 12341, gebildet aus den Isobaren1→2 und 3→4 $V_2 > V_1$ ($p_1 > p_4$) und den Adiabaten 2→3 und 4→1. Bestimme den Wirkungsgrad η des Zyklus in Funktion des Verdichtungsverhaltnisses $\varepsilon = V_4/V_1$. Vergleiche mit dem Wirkungsgrad eines Carnot-Zyklus, der zwischen den Temperaturen T_4 und T_2 funktionieren würde.
Zahlenbeispiel: $\gamma = 1{,}40$; $\varepsilon = 4$.
R: $\eta = 42{,}6\% < \eta_C$.

Aufgabe 1.46. Ein ideales Gas durchläuft einen Zyklus bestehend aus der adiabatischen Kompression 1→2, der isochoren Erwärmung 2→3, der adiabatischen Ausdehnung 3→4 und der isochoren Abkühlung 4→1, wobei das Verdichtungsverhältnis $\varepsilon = V_1/V_2$. Die Änderung der Temperatur im Prozess 2→3 ist ΔT, die an die kalte Quelle abgegebene Wärme ist Q_C und die Fläche des Zyklus im p-V-Diagramm ist L. Bestimme: a) den Wirkungsgrad des Kreisprozessesη; b) die Änderung der Temperatur $\Delta T'$ im Prozess 4→1; c) den Adiabatenexponenten γ und die isochore molare Wärme $C_{\mu,V}$ des Gases.
Zahlenbeispiel: $\varepsilon = 32$; $\Delta T = 200$ K; $Q_c = -1600$ J; $L = 4800$ J.
R: $\eta = 75\%$; $\Delta T' = -50$ K; $\gamma = 7/5$; $C_{\mu,V} = 20785$ J/(kmol·K).

Tests mit Antworten zur Auswahl

1. Die atomare Masseneinheit ist: **a)** die Masse des Wasserstoffatoms; **b)** eine Basiseinheit des IS; **c)** der 12-te Teil der Masse des Isotops C^{12}; **d)** der 14-te Teil der Masse des Isotops C^{14}; **e)** die Stoffmenge, die beim perfekt elastischen Stoß ausgetauscht wird.

2. Die relative Molekülmasse des Wassers ist:
a) 18 g; **b)** 18 kmol; **c)** 18 mol;
d) 18 u; **e)** 18.

3. Die Diffusion findet statt: **a)** wenn die Körper, die in Kontakt kommen, gasförmig sind; **b)** wenn die Körper, die in Kontakt kommen, flüssig sind; **c)** wenn die Körper, die in Kontakt kommen, fest sind; **d)** unabhängig vom Aggregatzustand; **e)** nur dann, wenn es eine Temperaturdifferenz der Körper gibt.

4. Im Falle der Pollenstaubkörner aus der Lösung ist die Brownsche Bewegung um so intensiver: **a)** je weniger zähflüssig die Flüssigkeit ist, je höher die Temperatur ist und je größer die Körner sind; **b)** je höher die Temperatur ist, je größer die Körner sind und je zähflüssiger die Flüssigkeit ist; **c)** je kleiner die Körner sind, je weniger zähflüssig die Flüssigkeit ist und je höher die Temperatur ist; **d)** je kleiner die Körner sind, je kleiner die Temperatur ist und je weniger zähflüssig die Flüssigkeit ist; **e)** je kleiner die Temperatur ist, je kleiner die Körner sind und je zähflüssiger die Flüssigkeit ist.

5. Die Konstante von Avogadro ist: **a)** die Anzahl der Mol eines Gases aus einer Masse von 1 kg; **b)** die Anzahl der Teilchen aus dem Volumen von 1 m³ bei Normalbedingungen; **c)** die Anzahl der Teilchen aus 1 kg des Stoffes; **d)** die Anzahl der Mol aus einem Gasvolumen $V_\mu = 22{,}42$ m³; **e)** die Anzahl der Teilchen aus einem Mol des Stoffes.

6. Ein thermodynamisches System ist geschlossen, wenn es: **a)** mit der Umwelt Masse, aber keine Energie austauscht; **b)** mit der Umwelt Energie, aber keine Masse austauscht; **c)** mit der Umwelt Energie und Masse austauscht; **d)** Mit der Umwelt weder Energie noch Masse austauscht, **e)** mit der Umwelt keine Wechselwirkung haben kann.

7. Welche der folgenden Größen ist kein Zustandsparameter? **a)** die Temperatur; **b)** der Druck; **c)** das Volumen; **d)** die spezifische Wärme; **e)** die Anzahl der Mol.

8. Wann hört der Wärmetransfer zwischen zwei Körpern auf? **a)** nur bei Null absolut; **b)** er hört niemals auf; **c)** beim thermischen Gleichgewicht; **d)** wenn alle Kräfte, die auf das System einwirken, konstant sind; **e)** keine Variante ist richtig.

9. Eine der folgenden Behauptungen bezüglich zu zwei Gasen im thermischen Gleichgewicht ist falsch: **a)** sie haben denselben Wärmezustand; **b)** zwischen ihnen findet kein

Energieaustausch mehr statt; **c)** ihre Moleküle haben dieselbe mittlere kinetische Energie; **d)** sie haben die gleiche Temperatur; **e)** das mittlere Geschwindigkeitsquadrat ihrer Moleküle ist gleich.

10. Welche der folgenden Eigenschaften gehört nicht zum Modell des idealen Gases? **a)** das Gas besteht aus einer großen Anzahl von identischen Teilchen; **b)** die Dimensionen der Moleküle sind vergleichbar mit dem Abstand zwischen ihnen; **c)** die Moleküle befinden sich in ständiger chaotischer Bewegung; **d)** die intermolekularen Kräfte werden vernachlässigt; **e)** die Bewegung eines einzelnen Moleküls gehorcht den Gesetzen der klassischen Mechanik.

11. Das Gas aus einem Ballon, der sich gleichmäßig beschleunigt bewegt: **a)** vergrößert seine innere Energie; **b)** verkleinert seine innere Energie; **c)** behält die innere Energie unverändert.

12. Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases ist:
a) $pV = \nu RT$; **b)** $pv = mRT$; **c)** $pV = nKT$;
c) $pV = RT/\mu$; **d)** $pV = \nu RT/m$.

13. Die innere Energie einer Gasmasse: **a)** steigt immer dann, wenn das Gas Wärme aufnimmt; **b)** fällt immer dann, wenn das Gas Wärme abgibt; **c)** fällt immer dann, wenn das Gas mechanische Arbeit aufnimmt; **d)** fällt immer dann, wenn das Gas mechanische Arbeit leistet; **e)** steigt immer dann, wenn die Temperatur steigt.

14. Die Formel der Änderung der inneren Energie für ein ideales Gas ist: **a)** immer gültig; **b)** gültig nur für isochore Prozesse; **c)** gültig nur für tiefe Temperaturen; **d)** wäre gültig, wenn an Stelle von n die Größe m vorkäme; **e)** gültig wenn man C_v mit c_v ersetzt.

15. Das Volumen einer konstanten Wassermenge, die von $t_1 = 1$ °C auf $t_2 = 5$ °C erwärmt wird:
a) steigt; **b)** fällt; **c)** fällt zuerst und steigt danach; **d)** steigt zuerst und fällt danach; **e)** bleibt unverändert.

16. Die Wärme ist: **a)** eine Energieform; **b)** eine umgewandelte mechanische Arbeit; **c)** eine Form des Energieaustausches mit der Umwelt; **d)** eine Form des Stoffaustausches zwischen System und Umwelt; **e)** eine Form des Austausches von innerer Energie $Q = \Delta U$.

17. Wähle die richtige Von der Beziehung von Robert Mayer:
a) $C_p = C_v + R$; **b)** $C_v = C_p + R$; **c)** $C_p = \frac{R}{\gamma - 1}$;
d) $C_p = \gamma R$; **e)** $C_p = C_v + \frac{R}{2}$.

18. Die Beziehung von Robert Mayer ist gültig: **a)** für jedes Gas; **b)** nur für einatomige Gase; **c)** nur für ideale Gase; **d)** nur für isobare Prozesse; **e)** nur für isobare und isochore Prozesse.

19. Die Formel des Wirkungsgrades $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ ist: **a)** gültig für jeden Zyklus; **b)** gültig nur für den Otto-Zyklus; **c)** gültig nur für den Carnot-Zyklus; **d)** gültig nur wenn $T_2 > T_1$; **e)** gültig nur wenn T_2 und T_1 in Celsiusgraden gemessen werden.

20. Ein Gas erleidet eine isotherme Ausdehnung. **a)** das Gas gibt Wärme ab; **b)** die innere Energie des Gases steigt; **c)** der Druck des Gases steigt; **d)** das Gas leistet mechanische Arbeit; **e)** das Gasvolumen fällt.

21. In der Gleichung der isobaren Zustandsänderung $V = V_0(1 + \alpha t)$, bezeichnet man mit V_0: **a)** das Anfangsvolumen; **b)** das Volumen bei Normalbedingungen; **c)** das Volumen bei 0 °C; **d)** bei Volumen bei 0 K; **e)** das Volumen von einem Mol.

22. Ein Prozess heißt adiabatisch, wenn das thermodynamische System: **a)** keine Wärme aus der Umwelt erhält; **b)** keine mechanische Arbeit aus der Umwelt aufnimmt; **c)** keine Wärme mit der Umwelt austauscht; **d)** keine mechanische Arbeit mit der Umwelt austauscht; **e)** keine Wärme an die Umwelt abgibt.

23. In (T,p)-Koordinaten ist die Gleichung des adiabatischen Prozesses:
a) $Tp^{\gamma-1} = \text{konst}$; **b)** $Tp^{\gamma} = \text{konst}$;
c) $T^{\gamma} p^{\gamma-1} = \text{konst}$ **d)** $T^{\gamma-1} p = \text{konst}$;
e) $T^{\gamma} p^{1-\gamma} = \text{konst}$.

24. Eine Gasmasse m dehnt sich vom Volumen V_1 auf V_2 aus, wobei im Endzustand die Parameter (p_2, V_2) erreicht werden. Die dabei verrichtete mechanische Arbeit ist maximal, wenn der Prozess folgender ist: **a)** isotherm; **b)** adiabatisch; **c)** isochor; **d)** isobar; **e)** entsprechend der Gleichung $T = aV^2$.

25. Im Falle der isothermen Ausdehnung des idealen Gases: **a)** wird das Gas sich erwärmen; **b)** wird das Gas abkühlen; **c)** wird mechanische Arbeit auf Kosten der inneren Energie geleistet; **d)** ist die mechanische Arbeit gleich Null; **e)** ändert das Gas seine Temperatur nicht.

26. Zu welchen Diagrammen gehört der Tripelpunkt nicht: **a)** fest-flüssig; **b)** fest-dampfförmig; **c)** flüssig-dampfförmig; **d)** gasförmig-dampfförmig; **e)** dampfförmig-gesättigte Dämpfe.

27. In $(p\text{-}T)$-Koordinaten hat der isobare Prozess als Schaubild: **a)** ein Geradensegment parallel zur Druckachse; **b)** den Ast einer gleichseitigen Hyperbel; **c)** ein Segment senkrecht auf die Druckachse; **d)** ein geneigtes Segment, durch den Ursprung; **e)** ein Segment senkrecht auf die Temperaturachse.

28. Wenn man die Haut mit Spiritus befeuchtet, hat man eine Kälteempfindung, weil: **a)** der Spiritus dringt in die Haut ein und dehnt sich aus; **b)** der Spiritus breitet sich leicht auf der Oberfläche der Haut aus; **c)** der Spiritus hat eine kleine Oberflächenspannung; **d)** der Spiritus absorbiert von der Haut die latente Verdampfungswärme; **e)** der Spiritus ist immer kälter als die Zimmertemperatur.

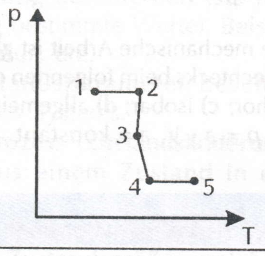
29. Die Dichte ρ eines Gases bei der Temperatur T und beim Druck p wird mit Hilfe der Werte des Normalzustandes durch die Beziehung ausgedruckt:
a) $\rho = \rho_0 \frac{pT}{p_0 T_0}$; **b)** $\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0 T}$; **c)** $\rho = \rho_0 \frac{p_0 T}{T_0}$;
d) $\rho = \rho_0 \frac{p_0 T_0}{pT}$; **e)** $\rho = \rho_0 \frac{p_0 T}{p\, T_0}$.

30. Der Druck eines Gases, das isochor von 100 °C auf 25 °C abgekühlt wird, ändert sich um:
a. 75% b. 25% c. 20% d. 7,5% e. 10%

31. Die Temperatur eines Gases, das in einem Ballon eingeschlossen ist, und dessen Druck sich um 0,4 % beim Erwärmen um ein Grad ändert, beträgt:
a. 400 K b. 450 K c. 350 K d. 250 K e. 375 K.

32. Ein ideales Gas durchläuft die Prozesse $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$, wie in der Abb. TG 32. Dabei bleibt das Volumen des Gases konstant. Die Masse des Gases erreicht einen Höchstwert im Zustand:

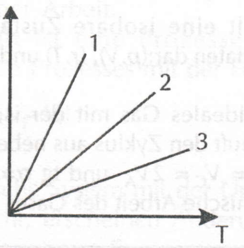
a. 1
b. 2
c. 3
d. 4
e. 5



● Abb. TG 32

33. In der Abb. TG 3.3. sind drei isochore Prozesse der gleichen Gasmenge dargestellt. Die Beziehung zwischen ihren Rauminhalten ist:

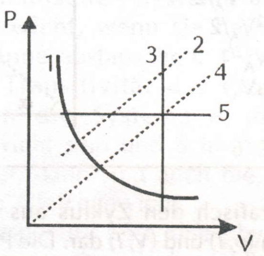
a. $V_1<V_2<V_3$
b. $V_1>V_2>V_3$
c. $V_1=V_2=V_3$
d. $V_1=V_2=V_3=0$
e. $V_1<V_2>V_3$



● Abb. TG 33

34. Welcher von den in der Abb. TG 34 dargestellten Prozessen ist isotherm?

a. 1
b. 2
c. 3
d. 4
e. 5



● Abb. TG 34

35. Dem thermodynamischen Zyklus $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ aus dem *p-V*-Diagramm der Abb. TG 35-a entspricht das Schaubild:

36. Zwei Glasballons sind miteinander durch ein Rohr mit Hahn verbunden. Anfangs befindet sich im ersten Ballon ein ideales Gas mit $m_1 = 0{,}2$ kg und $p_1 = 10^5$ N/m², im zweiten Ballon das gleiche Gas mit $m_2 = 0{,}1$ kg und $p_2 = 1{,}5 \cdot 10^5$ N/m². Die Temperatur ist dieselbe in beiden Ballons. Nach dem Öffnen des Hahns stellt sich folgender Druck ein:

a. $1{,}11 \cdot 10^5$ N/m²
b. $1{,}33 \cdot 10^5$ N/m²
c. $4{,}33 \cdot 10^5$ N/m²
d. $1{,}16 \cdot 10^5$ N/m²
e. $3{,}67 \cdot 10^5$ N/m²

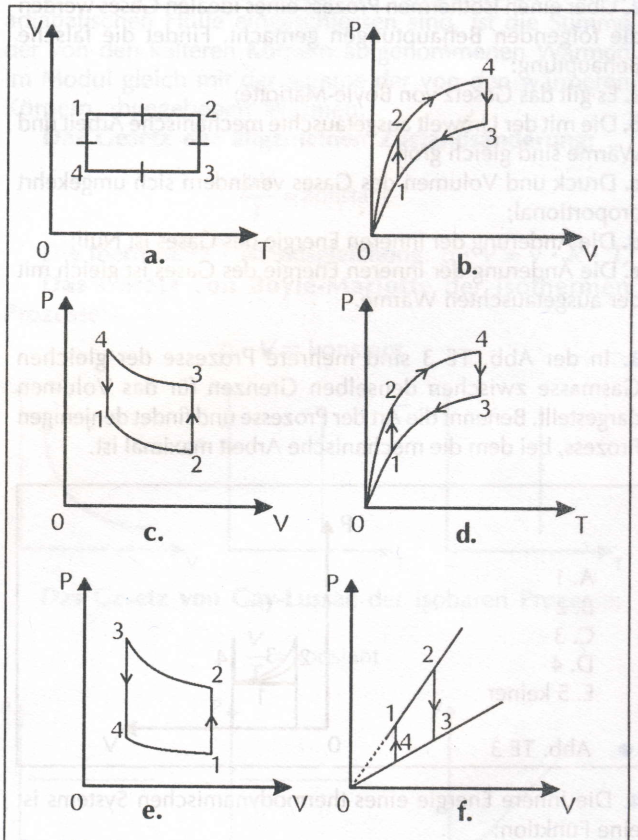
37. Beim Schmelzen eines Körpers geschieht Folgendes mit seiner inneren Energie: **a)** sie bleibt konstant; **b)** sie steigt, wenn er sich beim Schmelzen ausdehnt; **c)** sie fällt, wenn er sich beim Schmelzen zusammen zieht; **d)** sie fällt in jedem Fall; **e)** sie steigt in jedem Fall.

38. Der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine, die eine zyklische bitherme Zustandsänderung verwendet, wobei die Wärme Q_1 aufgenommen und Q_2 abgegeben wird, ist:

a) $\eta = \dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$; **b)** $\eta = \dfrac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$; **c)** $\eta = \dfrac{Q_1 - |Q_2|}{Q_2}$;

d) $\eta = \dfrac{|Q_1| - Q_2}{Q_1}$; **e)** $\eta = \dfrac{|Q_2| - Q_1}{Q_1}$.

39. Die Maßeinheit im IS für die spezifische latente Verdampfungswärme ist:
a) J/(kg·K); **b)** cal/K; **c)** J;
d) J/kg; **e)** cal.



● Abb. TG 35

40. Beim Übergang eines Systems aus dem Dampfzustand in den flüssigen Zustand: **a)** steigt die innere Energie und die Temperatur fällt; **b)** steigt die innere Energie; **c)** fällt die innere Energie und die Temperatur fällt; **d)** fällt die innere Energie; **e)** fällt die innere Energie und die Temperatur steigt.

41. Welche der folgenden Beziehungen sind für eine isochore Zustandsänderung eines idealen Gases gültig?
a) $Q > L$; b) $\Delta U = Q$; c) $Q = L$;
d) $Q \neq L$; e) $\Delta U = L$.

42. Dämpfe sind gesättigt: **a)** wenn ihr Druck gleich ist mit dem atmosphärischen Druck; **b)** wenn sie im dynamischen Gleichgewicht mit der flüssigen Phase sind; **c)** wenn ihre Dichte gleich ist mit derjenigen der Flüssigkeit; **d)** wenn die Anzahl der Moleküle, die in der Zeiteinheit die Flüssigkeit verlassen, nicht gleich ist mit der Anzahl der Moleküle, die in die Flüssigkeit eintauchen; **e)** keine Antwort ist richtig.

43. Wenn wir mit p_m den Druck der gesättigten Dämpfe bezeichnen, welche der unteren Behauptungen ist falsch: **a)** p_m hängt nicht von der Masse der Flüssigkeit ab; **b)** p_m hängt nicht von der Masse der Dämpfe ab, die mit der Flüssigkeit in Kontakt sind; **c)** p_m hängt nicht von der Art der Flüssigkeit ab; **d)** p_m steigt mit der Temperatur; **e)** p_m hängt nicht von freien Oberfläche der Flüssigkeit ab.

44. Wenn man die üblichen Bezeichnungen verwendet, kann die Änderung der inneren Energie eines idealen Gases bei einem isobaren Prozess wie folgt berechnet werden:
a) $U = nC_V\Delta t$; **b)** $\Delta U = nC_V\Delta T$; **c)** $\Delta U = mC_V\Delta T$;
d) $U = nC_p\Delta T$; **e)** $\Delta U = nC_p\Delta T$.

45. Die mechanische Arbeit ist gleich mit dem Flächeninhalt eines Rechtecks beim folgenden offenen Prozess: **a)** isotherm; **b)** isochor; **c)** isobar; **d)** allgemein; **e)** beschreiben durch das Gesetz $p = a \cdot V$, a = konstant.

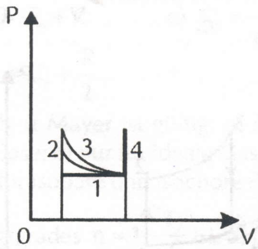
Bewertungstest

1. In einem Zylinder mit Kolben befindet sich 1 m³ Wasserstoff beim Druck von 1 atm. Die zum isothermen Verdoppeln des Volumens nötige mechanische Arbeit (ln 2 = 0,693) ist:
a. $69{,}3 \cdot 10^2$ J **b.** $6{,}93 \cdot 10^4$ J **c.** $0{,}693 \cdot 10^3$ J
d. 693 J **e.** 69,3 J.

2. Über einen isothermen Prozess eines idealen Gases werden die folgenden Behauptungen gemacht. Findet die falsche Behauptung:
a. Es gilt das Gesetz von Boyle-Mariotte;
b. Die mit der Umwelt ausgetauschte mechanische Arbeit und Wärme sind gleich groß;
c. Druck und Volumen des Gases verändern sich umgekehrt proportional;
d. Die Änderung der inneren Energie des Gases ist Null;
e. Die Änderung der inneren Energie des Gases ist gleich mit der ausgetauschten Wärme.

3. In der Abb. TE 3 sind mehrere Prozesse der gleichen Gasmasse zwischen denselben Grenzen für das Volumen dargestellt. Benennt die Art der Prozesse und findet denjenigen Prozess, bei dem die mechanische Arbeit maximal ist.

A. 1
B. 2
C. 3
D. 4
E. 5 keiner



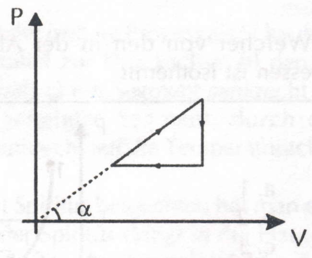
● Abb. TE 3

4. Die innere Energie eines thermodynamischen Systems ist eine Funktion:
a. nur der Temperatur T;
b. nur der Temperatur T und der Anzahl der Mol;
c. nur der Anzahl der Mol;
d. nur der Temperatur T und des Volumens V;
e. nur des Gasvolumen.

5. Stellt eine isobare Zustandsänderung in folgenden Koordinaten dar:(p, V), (r, T) und $(r, 1/T)$.

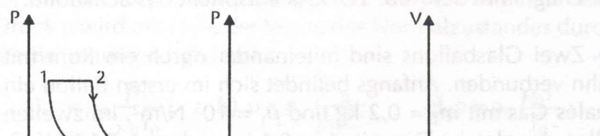
6. Ein ideales Gas mit der isochoren molaren Wärme C_V durchläuft den Zyklus aus nebenstehender Abbildung. Wenn V_A, $V_B = V_C = 2V_A$ und tg α=a, gegeben sind, dann ist die mechanische Arbeit des Gases in diesem Zyklus:

A. $L = a^2V_A/2$
B. $L = -a^2V_A/2$
C. $L = a^2V_A/2$
D. $L = aV_A^{2/2}$
E. $L = -aV_A^2$



● Abb. TE 6

7. Stelle grafisch den Zyklus aus der Abb.TE 7 in den Koordinaten (p, T) und (V, T) dar. Die Prozesse 2 → 3 und 4 → 1 sind isotherm.



● Abb. TE 7

Kapitel 1 – Zusammenfassung

Die thermischen Erscheinungen sind physikalische Erscheinungen, die mit der ständigen, vollkommem ungeordneten und temperaturabhängigen Bewegung auf molekularer Ebene (Wärmebewegung) verbunden sind.

Das thermodynamische System ist ein makroskopischer Körper oder Körpersystem, die von der Umwelt genau abgegrenzt sind.

Die Zustandsparameter sind messbare physikalische Größen, welche die Eigenschaften des thermodynamischen Systems eindeutig beschreiben (sie haben in jedem Zustand eindeutig bestimmte Werte). Beispiele: Volumen, Druck, Temperatur, etc.

Die Menge aller Zustandsparameter beschreibt vollständig den **Zustand** des Systems.

Thermodynamischer Prozess (Zustandsänderung) = Übergang des Systems aus einem Zustand in einen andern Zustand.

Die innere Energie des thermodynamischen Sytems, U, ist eine physikalische Zustandsgröße, welche die Summe der kinetischen Energien aller Moleküle des Systems, sowie die potentielle Energie der intermolekularen Kräfte misst.Die thermodynamischen Systeme tauschen Energie mit der Umwelt aus in Form von Wärme und mechanischer Arbeit.

Die mechanische Arbeit ist eine Prozessgröße, welche im Falle eines isobaren Prozesses mit der Formel

$$L_{if} = p\,(V_f - V_i)$$

berechnet wird.

Wenn das thermodynamische System mit der Umwelt mechanische Arbeit austauscht, erscheinen Änderungen der Positionsparameter. Wenn beim Energieaustausch keine Änderungen der Positonsparameter stattfinden, dann gibt es Energieaustausch mit der Umwelt nur in Form von Wärme.

Zwei thermodynamische Systeme sind im **thermischen Gleichgewicht,** wenn sie beim Kontakt miteinander keine Wärme austauschen.

Das Prinzip der Transitivität des thermischen Gleichgeichts: Wenn die Systeme A und B im thermischen Gleichgewicht sind und B im thermischen Gleichgewicht mit C ist, dann sind auch die Syteme A und C im thermischen Gleichgewicht.

Die empirische Temperatur t ist eine physikalische Zustandsgröße, welche das thermische Gleichgewicht der thermodynamischen Systeme charakterisiert.

$$[t]_{IS} = 1\,°C$$

Die absolute Temperatur, T, ist die Temperatur in Kelvin ausgedrückt und wird definiert, indem man den Tripelpunkt des Wassers als Bezugszustand verwendet (273,15 K).

$$T(K) = t\,(°C) + 273{,}15$$

Die Wärmekapazität eines Körpers, C, ist eine skalare physikalische Größe definiert mit der Formel:

$$C = \frac{Q}{\Delta T},\quad [C]_{IS} = J/K.$$

Die molare Wärme, C_μ, ist eine skalare physikalische Größe definiert mit der Formel:

$$C_\mu = \frac{C}{\nu} = \frac{1}{\nu}\cdot\frac{Q}{\Delta T},\quad [C_m]_{IS} = J/(mol\cdot K).$$

Die spezifische Wärme, c, ist eine skalare physikalische Größe definiert mit der Formel:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{1}{m}\cdot\frac{Q}{\Delta T},\quad [c]_{IS} = J/(kg.K).$$

Die Beziehung von Robert Mayer:

$$C_P - C_V = R$$

Adiabatischer Prozess – Prozess, bei dem das System Energie mit der Umwelt nur in Form von mechanischer Arbeit austauscht (Q = 0).

Die kalorimetrische Gleichung – wenn zwei oder mehrere Körper mit verschiedenen Temperaturen in einer adiabatischen Hülle eingeschlossen sind, ist die Summe der von den kälteren Körpern aufgenommenen Wärmen im Modul gleich mit der Summe der von den wärmeren Körpern abgegebenen Wärmen.

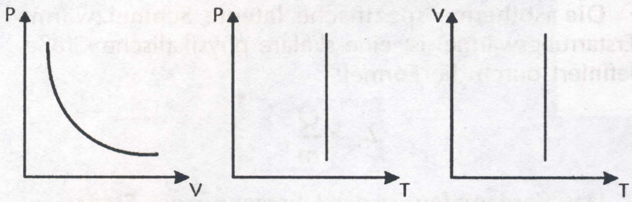
Das Gesetz der allgemeinen Zustandsänderung:

$$\frac{pV}{T} = \text{konstant}$$

Die thermische Zustandsgleichung: $p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$,

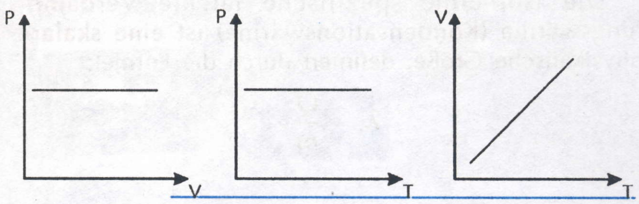
Das Gesetz von Boyle-Mariotte der isothermen Prozesse:

$$p \cdot V = \text{konstant.}$$



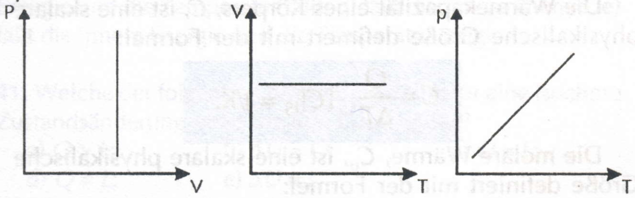
Das Gesetz von Gay-Lussac der isobaren Prozesse:

$$\frac{V}{T} = \text{konstant}$$



Das Gesetz von Charles der isochoren Prozesse:

$\frac{p}{T}$ = konstant



Das erste Prinzip der Thermodynamik: für jedes geschlossene thermodynamische System entspricht die Änderung der inneren Energie ΔU im Prozess $i \to f$ der Gleichung:

$$\Delta U = Q_{\mathrm{if}} - L_{\mathrm{if}}.$$

Für ein thermisch und mechanisch isoliertes System hat die innere Energie in jedem Zustand denselben Wert.

Die Berechnung von L, Q, ΔU für einfache Zustandsänderungen des idealen Gases

Größe/ Prozess	L_{if}	Q_{if}	$\Delta U = U_f - U_i$
isochor	0	$\nu \cdot C_V \cdot (T_f - T_i)$	$\nu \cdot C_V \cdot (T_f - T_i)$
isobar	$\nu \cdot R \cdot (T_f - T_i)$	$\nu \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$	$\nu \cdot C_V \cdot (T_f - T_i)$
isotherm	$\nu \cdot R \cdot T \cdot \ln\frac{V_f}{V_i}$	$\nu \cdot R \cdot T \cdot \ln\frac{V_f}{V_i}$	0
adiabatisch	$-\nu \cdot C_V \cdot (T_f - T_i)$	0	$\nu \cdot C_V \cdot (T_f - T_i)$

Das Schmelzen ist der Übergang eines Stoffes aus dem festen in den flüssigen Zustand.

Das Erstarren ist der Übergang eines Stoffes aus dem flüssigen in den festen Zustand.

Die isotherme spezifische latente Schmelzwärme (Erstarrungswärme) ist eine skalare physikalische Größe, definiert durch die Formel:

$$\lambda_t = \frac{Q}{m},$$

Das Verdampfen ist der Übergang eines Stoffes aus dem flüssigen Zustand in den Dampfzustand.

Das Kondensieren ist der Übergang eines Stoffes aus dem Dampfzustand in den flüssigen Zustand.

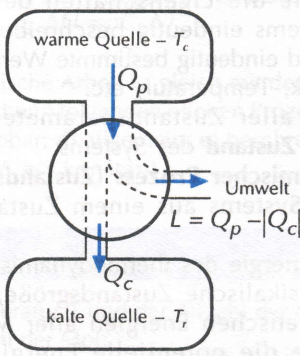
Die isotherme spezifische latente Verdampfungswärme (Kondensationswärme) ist eine skalare physikalische Größe, definiert durch die Formel:

$$\lambda_v = \frac{Q}{m},$$

Das Sublimieren ist der Übergang eines Stoffes aus dem festen Zustand direkt in den Dampfzustand.

Das Desublimieren ist der Übergang eines Stoffes aus dem Dampfzustand direkt in den festen Zustand.

Die Wärmekraftmotoren sind Maschinen, welche mechanische Arbeit leisten, wenn sie Wärme aufnehmen, die durch Verbrennung eines Treibstoffs entsteht.



Der Wirkungsgrad eines Wärmekraftmotors wird definiert mit der Formel:

$$\eta = \frac{L}{Q_p}.$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_p}$$

Der Wirkungsgrad eines Wärmekraftmotors ist immer kleiner als Eins: $\eta < 1$.

Das zweite Prinzip der Thermodynamik

Die Formulierung von Thomson: Ein zyklischer monothermer reversibler Prozess, bei dem die Wärme, die von einem einzigen Wärmespeicher geliefert wird, vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt wird, ist nicht möglich.

Die Formulierung von Clausius: Ein Prozess, bei welchem die Wärme von selbst von einem Körper mit gegebener Temperatur auf einen wärmeren Körper übertragen wird, ist nicht möglich.