



Thermodynamik

(Wärmelehre)

1

Gliederung

- Grundbegriffe
 - Modell ideales Gas
 - Prozess- und Zustandsgrößen
 - ...
- Mischungsvorgänge
- Aggregatzustandsänderungen
- Zustandsänderungen des idealen Gases

2

Betrachtungsweisen

- phänomenologische Betrachtung (makrophysikalisch): man betrachtet den Körper als Ganzes, anhand von Experimenten werden Erfahrungsgesetze gewonnen
- kinetisch-statistische Betrachtung (mikrophysikalisch): man untersucht die Struktur der Körper (Teilchen und ihre Bewegung), Erkennen gesetzmäßiger Zusammenhänge zwischen makrophysikalischen Größen wie Druck und Temperatur und der Molekülbewegung in Gasen, die Gesetze werden anhand von Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung gewonnen

3

Modell ideales Gas

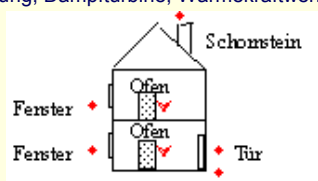
- Ein Gas besteht aus einer sehr großen Anzahl gleichartiger Teilchen (Moleküle), die dieselbe Masse haben und sich in ständiger zufälliger Bewegung befinden.
- Die Moleküle können als Punktmassen angesehen werden, da ihr Volumen sehr viel kleiner als das Gasvolumen ist.
- Zwischen den Teilchen wirken außer bei Zusammenstößen keine Kräfte.
- Die Zusammenstöße untereinander bzw. mit der Gefäßwand sind vollkommen elastisch (in einem vernachlässigbar kleinem Zeitintervall).
- Der Gasdruck entsteht durch die Zusammenstöße der Moleküle mit den Gefäßwänden und die dadurch wirkenden Kräfte.

reales Gas etwa ideal: hohe Temperatur, kleiner Druck

4

Thermodynamisches System

- Bereich, der von der Umgebung abgegrenzt ist und in dem die Temperatur eine zentrale Rolle spielt
- Die Beschreibung des Zustandes des thermodynamischen Systems erfolgt durch Zustandsgrößen
- z. B.: Haus, Heizung, Dampfturbine, Wärmekraftwerk, Luftpumpe...



5

Abgeschlossenes thermodyn. System

- ist ein thermodynamisches System, bei dem keine thermodynamische Wechselwirkung mit der Umgebung stattfindet (kein Wärmeaustausch)
- z.B.: in der Praxis unmöglich, näherungsweise bei Thermoskanne
- offenes System: Stoff- und Energieaustausch (z. B. offener Kühlschrank)
- geschlossenes System: Energie- aber kein Stoffaustausch (z. B. geschlossener Kühlschrank)
- abgeschlossenes System: weder Energie-, noch Stoffaustausch (z. B. verschlossene Thermoskanne)

6

Prozess- und Zustandsgrößen

- Zustandsgrößen sind physikalische Größen, die den Zustand eines Systems beschreiben, unabhängig davon, wie das System diesen Zustand erreicht
- z.B.: Temperatur, innere Energie, Volumen, Druck
- Prozessgrößen sind physikalische Größen, die während eines Prozesses (Vorganges) die Wechselwirkungen des Systems mit der Umgebung charakterisieren
- z.B.: Wärme, Arbeit

Ein Prozess bewirkt immer eine Zustandsänderung.

- z.B.: $W = \Delta E$ $Q = \Delta E_{\text{therm}}$

Grundbegriffe

- Temperatur, Temperaturskalen
- absoluter Nullpunkt
- Wärme, thermische Energie
- innere Energie

Die Temperatur

- Die Temperatur gibt an, wie kalt oder heiß ein Körper ist. (Zustandsgröße)
- Formelzeichen: ϑ
- Einheit: °C
- Messgerät: Thermometer



Temperaturskalen

Celsiuskale:

- 0 °C ... Temperatur des schmelzenden Eises
- 100 °C ... Temperatur des siedenden Wassers (bei Normaldruck)



Anders Celsius (1701-1744)

Kelvinskale:

- absoluter Nullpunkt: -273,15 °C = 0 K
- Formelzeichen: T
- Einheit: K

Fahrenheit:

- 0 °F ... tiefste Temperatur des Danziger Winters (1708/09) = -17,8 °C
- 100 °F ... eigene Körpertemperatur (=37,8 °C)



William Thomson (Lord Kelvin) (1824 - 1907)

weitere Skalen

[Umrechner](#)

Temperaturdifferenzen

- Formelzeichen: $\Delta \vartheta$ bzw. ΔT
- Einheit: K
- Beispiel: $\vartheta_1 = -12 \text{ °C}$; $\vartheta_2 = 26 \text{ °C}$
 - Bestimmen Sie die Temperaturdifferenz.
 - Rechnen Sie die Angaben in Kelvin um und bestimme Sie dann die Temperaturdifferenz.

Thermische Energie

- Thermische Energie kennzeichnet die Fähigkeit eines Systems, Wärme von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper niedrigerer Temperatur zu übertragen.
 - Formelzeichen: E_{therm}
 - Einheit: J
- Arten der Wärmeübertragung:
- Wärmeleitung (feste Stoffe oder ruhende Flüssigkeiten)
 - Wärmestrahlung (ruhende Gase, Vakuum)
 - Wärmeströmung (Konvektion) (strömende Fl., Gase)
- [Folie](#)

Aggregatzustandsänderungen

Schmelzen Verdampfen

FEST FLÜSSIG GASFÖRMIG

Erstarren Sublimieren Kondensieren

Temperaturverlauf beim Erwärmen von Wasser

© Doris Walkowiak

Aggregatzustandsänderungen

- feste, flüssige und gasförmige Stoffe (Teilchenaufbau)
- Animation
- Wikipedia (Text + Bilder), Applet Aggregatzustände
- Auflockern (fest → flüssig) bzw. Aufbrechen (flüssig → gasförmig) des Teilchenverbandes → Erhöhung der inneren Energie (E_{pot} erhöht sich)
- keine Temperaturänderung während der Aggregatzustandsänderung, da die kinetische Energie gleich bleibt

© Doris Walkowiak

Umwandlungswärme

- Schmelzwärme: $Q = q_s \cdot m$ = Erstarrungswärme
- Verdampfungswärme: $Q = q_v \cdot m$ = Kondensationswärme

(q_s ... spezifische Schmelzwärme, q_v ... spezifische Verdampfungswärme)

Beispiel:

- 100 g Blei (20 °C) sollen geschmolzen und auf 500 °C erwärmt werden. Wie groß ist die dafür erforderliche Wärme?

[Lösung](#)

© Doris Walkowiak

Beispiel

200 g Wasser (Eis) wird von -5°C auf 110°C erwärmt. Berechnen Sie die dafür benötigte Wärme ($p = \text{konstant}$)!

Erwärmen: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

-5°C...0°C: $Q_1 = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,2\text{kg} \cdot 5\text{K} = 2,09\text{kJ}$

0°C...100°C: $Q_2 = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,2\text{kg} \cdot 100\text{K} = 83,8\text{kJ}$

100°C...110°C: $Q_3 = 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,2\text{kg} \cdot 10\text{K} = 3,72\text{kJ}$

Schmelzen: $Q = q_s \cdot m = 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,2\text{kg} = 66,8\text{kJ}$

Verdampfen: $Q = q_v \cdot m = 2256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,2\text{kg} = 451,2\text{kJ}$ $Q_{\text{ges}} = 607,6\text{kJ}$

© Doris Walkowiak

Aggregatzustandsänderungen

Abhängigkeit der Siede- und der Schmelztemperatur vom Druck:

- Je größer der Druck, desto geringer die Schmelztemperatur. (Bsp. Schlittschuh fahren)
- Je größer der Druck, desto höher die Siedetemperatur. (Bsp. Schnellkochtopf, Kochen im Hochgebirge)

Schmelzen mit Salz

- endotherme Reaktion
- Binden des Wasserfilms

Taupunkt:

- meist für Kondensationspunkt des Wassers (Wasserdampfgehalt = 100%), z. B. Kondensation an kalten Außenwänden → Schimmel

© Doris Walkowiak

Weitere Zustandsgrößen

- Der **Druck** gibt an, wie groß die Kraft ist, die senkrecht auf eine Fläche von 1 m² wirkt.
- Formelzeichen: p
- Einheit: Pa (1 Pa = 1 N/m²) Gl.: $p = \frac{F}{A}$ (\vec{F} senkrecht \vec{A})
- veraltete Einheiten: 1 bar = 10⁵ Pa = 750 Torr
- Normaldruck: 1013 mbar = 101,325 kPa = 760 Torr
- Das **Volumen** gibt an, wie groß der Raum ist, den ein Körper einnimmt.
- FZ: V
- Einheit: m³

© Doris Walkowiak

Weitere Zustandsgrößen

- Die **Dichte** gibt an, welche Masse ein Körper mit einem Volumen von 1 m³ hat.
- FZ: ρ
- Einheit: kg/m³
- Gleichung: $\rho = \frac{m}{V}$



© Doris Walkowiak

Zustandsänderung fester Stoffe

Fast alle festen Stoffe dehnen sich bei Temperaturerhöhung aus und ziehen sich bei Temperaturverringerng zusammen.

Ursache: Die kinetische Energie der Teilchen nimmt bei Temperaturerhöhung zu und damit benötigen sie mehr Platz für ihre Bewegung (Die Dichte verringert sich).

Ausnahme: Gummi [Video](#)

Anwendung: [Bimetall](#), Verbundstoffe

Gleichungen:

Längenänderung: $\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$ α ... linearer Ausdehnungskoeffizient

Flächenänderung: $\Delta A = A_0 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T$

Volumenänderung: $\Delta V = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T$



© Doris Walkowiak

Zustandsänderung von Flüssigkeiten

Fast alle Flüssigkeiten dehnen sich bei Temperaturerhöhung aus und ziehen sich bei Temperaturverringerng zusammen.

Ausnahme: Wasser ([Folie](#), [Anomalie des Wassers](#))

Gleichung: $\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$ γ ... kubischer Ausdehnungskoeffizient

- Wie groß ist die Längenänderung eines 30 m langen Schienstücks aus Stahl, wenn die Temperaturänderung im Laufe eines Jahres 70 K beträgt.
- Berechnen Sie die Volumenänderung von 60 l Benzin, wenn dieses von 5 °C auf 20 °C erwärmt wird. ($\gamma = 0,001 \text{ K}^{-1}$)



© Doris Walkowiak

Zustandsänderung von Gasen

Alle Gase dehnen sich bei Temperaturerhöhung aus und ziehen sich bei Temperaturverringerng zusammen.

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad \gamma = \frac{1}{273,15 \text{ K}}$$

Beim idealen Gas ist γ unabhängig von der Temperatur.

Bei der Untersuchung von Zustandsänderungen muss der Zusammenhang von Druck, Volumen und Temperatur berücksichtigt werden. Dabei wird eine der Größen jeweils konstant gehalten.

→ Zustandsänderungen des idealen Gases



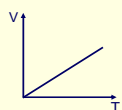
© Doris Walkowiak

Isobare Zustandsänderung

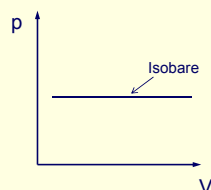
[Versuch von Gay-Lussac](#)

Bei konstantem Druck ist das Volumen eines eingeschlossenen Gases zur Temperatur proportional.

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



Beispiel: Gasthermometer, Heißluftballon



© Doris Walkowiak

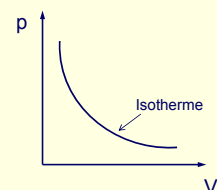
Isotherme Zustandsänderung

[Versuch von Boyle-Mariotte](#)

Bei konstanter Temperatur sind Volumen und Druck indirekt proportional zueinander

$$p \sim \frac{1}{V} \Rightarrow p \cdot V = \text{konstant}$$

Beispiel: (Luftpumpe)



© Doris Walkowiak

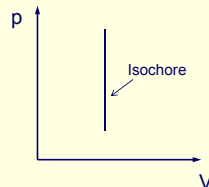
Isochore Zustandsänderung

Gesetz von Amontons:

Der Druck eines eingeschlossenen Gases ist zur Temperatur proportional, so lange das Volumen konstant bleibt.

$$p \sim T \Rightarrow \frac{p}{T} = \text{konstant}$$

Beispiel: (Schnellkochtopf),
Erwärmen einer geschlossenen
Konservendose



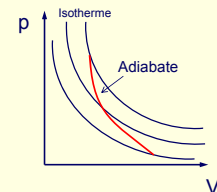
37
© Doris Walkowiak

Adiabatische Zustandsänderung

- Bei einer adiabatischen Zustandsänderung wird keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht.
- Es können sich alle drei Zustandsgrößen (p, V, T) ändern.

$$p \cdot V^\kappa = \text{konstant}$$

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} \dots \text{Adiabatenkoeffizient}$$



38
© Doris Walkowiak

Zustandsgleichung des idealen Gases

- Applet

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant} \Rightarrow \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Bedingung: Ideales Gas

In einer Stahlflasche mit einem Volumen von 10 l befindet sich Sauerstoff unter einem Druck von 10 MPa. Wie viel Sauerstoff kann man der Flasche bei gleicher Temperatur unter normalem Luftdruck entnehmen?

39
© Doris Walkowiak

Aufgaben

1. Ein Gas nimmt bei 20 °C ein Volumen von 3 l ein. Auf welche Temperatur muss das Gas bei gleichem Druck erwärmt werden, damit es 4 l, das doppelte, das dreifache Volumen einnimmt?
2. Während einer Unterrichtsstunde steigt im Physikraum mit den Abmessungen 12 m, 5 m und 4 m die Temperatur von 18 °C auf 20 °C. Wie viel Luft entweicht?
3. Ein abgeschlossenes Luftvolumen steht bei 20 °C unter einem Druck von 1 bar. Bei welcher Temperatur beträgt der Druck 0,5 bar [1/3 bar, 2 bar, 3 bar]?

Quelle: Metzler

40
© Doris Walkowiak

Universelle Gasgleichung

unter Normbedingungen gilt (ideales Gas):

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{101.300 \text{ Pa} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}}{273,15 \text{ K}} = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

Ergebnis ist unabhängig vom Gas

Für eine Stoffmenge von 1 mol ergibt sich die universelle Gaskonstante R.

$$R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

Für eine beliebige Stoffmenge n gilt: $\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R$

bzw.: $\frac{p \cdot V}{T} = m \cdot R_s$ $R_s \dots$ spez. Gaskonstante

41
© Doris Walkowiak

Kinetisch-statistische Betrachtungen

Grundannahmen:

- Teilchendurchmesser \ll Teilchenabstände
- keine Kräfte unter den Teilchen außer im Moment des Zusammenstoßes
- Stöße untereinander bzw. mit Gefäßwand sind rein elastisch
- Bewegung erfolgt völlig regellos

Grundgleichung: $p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \bar{E}_{\text{kin}}$

- Druck und Volumen sind proportional zur Anzahl und zur mittleren kinetischen Energie der Teilchen

42
© Doris Walkowiak

Kinetisch-statistische Betrachtungen

Zusammenhang Temperatur – Teilchenbewegung:

$$\left. \begin{aligned} p \cdot V &= \frac{2}{3} \cdot N \cdot \bar{E}_{\text{kin}} \\ p \cdot V &= n \cdot R \cdot T \end{aligned} \right\} \frac{2}{3} \cdot N \cdot \bar{E}_{\text{kin}} = n \cdot R \cdot T$$

- Für 1 mol (n = 1) gilt: $\bar{E}_{\text{kin}} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} \cdot T = \frac{3}{2} k \cdot T$
- $N_A = 6,0022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$... Avogadrozahl (Anzahl der in 1 mol enthaltenen Teilchen)
- $k = R/N_A = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$... Boltzmann-Konstante



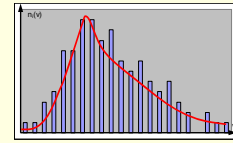
Kinetisch-statistische Betrachtungen

- Mittlere Geschwindigkeit von Gasmolekülen

$$p \cdot V = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \bar{E}_{\text{kin}} = \frac{2}{3} N \cdot \frac{1}{2} m \cdot \bar{v}^2$$

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{N \cdot m}{V} \cdot \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{v}^2$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot p}{\rho}}$$

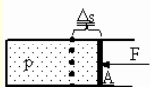


- Wahrscheinlichkeitsverteilung der Geschwindigkeit:
 - nicht alle Gasteilchen bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit, sondern statistisch verteilt



Volumenarbeit

- Einem Gas in einem geschlossenen System soll durch einen Kolben Arbeit zugeführt werden, indem es reibungsfrei komprimiert wird.
- Dabei nimmt das Volumen ab und der Druck zu.

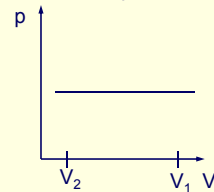


$$W = F \cdot \Delta s = -p \cdot A \cdot \Delta s = -p \cdot \Delta V \quad (p = \text{kons tan t})$$



Volumenarbeit bei isobarer Zustandsänderung

- isobare Kompression

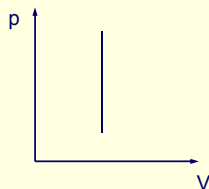


$$W = -p \cdot \Delta V$$

- Arbeit wird am System verrichtet (Kompression) $\rightarrow W > 0$
- Arbeit wird vom System verrichtet (Expansion) $\rightarrow W < 0$



Volumenarbeit bei isochorer Zustandsänderung

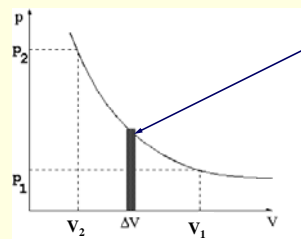


$$W = 0$$



Volumenarbeit bei isothermer Zustandsänderung

- Da der Druck sich verändert, gilt die Gleichung $W = -p \cdot \Delta V$ nur für eine kleine Volumenänderung.



sonst:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

$$= -p_1 V_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$



Hauptsätze der Thermodynamik

aus Mechanik bekannt:

- Bei keinem Vorgang kann Energie neu entstehen oder verschwinden. Sie kann nur von einem Körper auf einen anderen übertragen werden oder sich von einer Energieform in eine andere umwandeln.
- entdeckt Mitte des 19. Jh. von Mayer, Joule und Helmholtz im Bereich der Thermodynamik
→ 1. Hauptsatz der Thermodynamik
- andere Formulierung (von Helmholtz):
- Es ist nicht möglich, ein Perpetuum mobile erster Art zu konstruieren.

Perpetuum mobile 1. Art:

periodisch arbeitende Maschine, die fortwährend Arbeit liefert (Energie abgibt), ohne dass ihr Energie zugeführt wird.



1. Hauptsatz der Thermodynamik

- Untersuchungen zum rechnerischen Zusammenhang zwischen Wärme und mechanischer Arbeit
- Anfang des 20. Jahrhunderts: saubere Trennung der Zustandsgröße innere Energie von den Prozessgrößen Wärme und Arbeit

$$Q \leftrightarrow \Delta U \leftrightarrow W_V$$

Änderung der inneren Energie ist möglich:

- durch Zufuhr oder Abgabe von Wärme
- durch Verrichtung von Arbeit am System oder vom System

Die Änderung der inneren Energie eines Systems ist gleich der Summe der über die Systemgrenze übertragenen Wärme und der verrichteten Arbeit.

$$\Delta U = W_V + Q$$



2. Hauptsatz

- Aussage über die Richtung der Energieübertragung
- reversible (umkehrbare) und irreversible (nicht umkehrbare) Vorgänge:
 - reversible Vorgänge können nur innerhalb relativ kurzer Zeiträume beobachtet werden (z. B. elastischer Stoß)
 - Diffusion als irreversibler Vorgang (Gleichverteilung der Teilchen ist wahrscheinlichster Zustand)
 - weiteres Beispiel: Temperaturausgleich

Claudius 1850:

- Wärme geht niemals von selbst von einem kalten auf einen warmen Körper über und in einem gleichmäßig temperierten Körper stellt sich niemals von selbst ein Temperaturunterschied ein.



Anwendung des 1. HS auf Zustandsänderungen

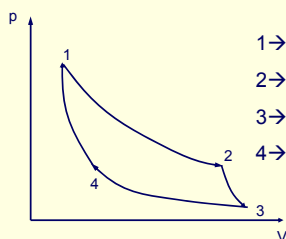
isotherme Zustandsänderung	$\Delta U = 0$, da Temperatur des Systems konstant	$Q = -W_V$
isochore Zustandsänderung	$W_V = 0$	$\Delta U = Q$
isobare Zustandsänderung		$\Delta U = W_V + Q$
adiabatische Zustandsänderung	$Q = 0$	$\Delta U = W_V$



Carnotscher Kreisprozess

Kreisprozess:

beliebige Folge von Zustandsänderungen, bei der der Anfangszustand wieder erreicht wird.



- 1→2: isotherme Expansion
- 2→3: adiabatische Expansion
- 3→4: isotherme Kompression
- 4→1: adiabatische Kompression

Applet

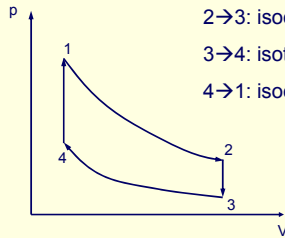


Carnotscher Kreisprozess

- isotherme Expansion
konstante hohe Temperatur, Ausdehnung
→ $\Delta U = 0$; $Q = -W_1 < 0 \rightarrow Q > 0$
- adiabatische Expansion
weitere Ausdehnung, bei der die Temperatur sich verringert
→ $Q = 0$; $\Delta U = W < 0 \rightarrow T$ sinkt
- isotherme Kompression
konstante niedrige Temperatur, Zusammendrücken
→ $\Delta U = 0$; $Q = -W_2 > 0 \rightarrow Q < 0$
- adiabatische Kompression
Rückkehr zur hohen Temperatur unter weiterer Volumenverminderung, Ausgangszustand wird erreicht
→ $Q = 0$; $\Delta U = W > 0 \rightarrow T$ steigt
- $W_2 < W_1 \rightarrow W_V < 0$ (Volumenarbeit wird vom System verrichtet)



Stirlingprozess



- 1→2: isotherme Expansion
- 2→3: isochore Abkühlung
- 3→4: isotherme Kompression
- 4→1: isochore Erwärmung

Applet

55 © Doris Walkowiak

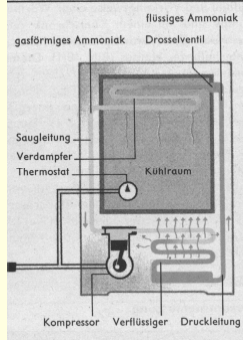
Beispiele aus Natur und Technik

- Kühlschrank
- Wärmepumpe
- Ottomotor
- Dieselmotor
- Stirlingmotor

[Kreisprozesse](#) (Bilder)

56 © Doris Walkowiak

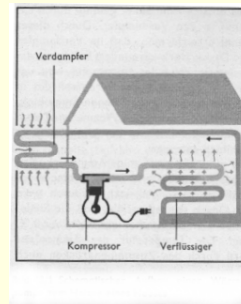
Kühlschrank



- **Verdampfer:** das einströmende flüssige Ammoniak wird durch Druckverminderung verdampft, dabei wird dem Kühlfach Wärme entzogen
- **Kompressor:** das gasförmige Ammoniak wird komprimiert
- **Kondensator:** Verflüssigung durch Kondensation, die freiwerdende Wärme wird an die Umgebung abgegeben

57 © Doris Walkowiak

Wärmepumpe

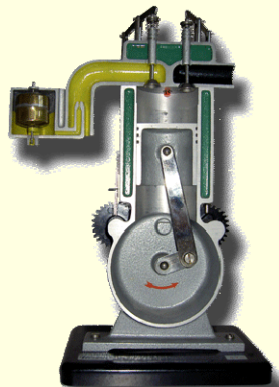


- **Verdampfer:** der kälteren Umgebung wird Wärme entzogen
- dazu muss von außen Arbeit zugeführt werden
- diese liefert ein Elektromotor, welcher die Wärme der Außenluft, dem Erdboden oder dem Grundwasser entnimmt
- **Kondensator:** Verflüssigung, wobei die Wärme an die Zimmerluft abgegeben wird

58 © Doris Walkowiak

Ottomotor

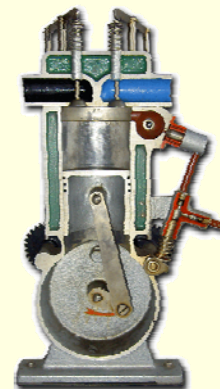
- Applet
- Applet



59 © Doris Walkowiak

Dieselmotor

- Applet

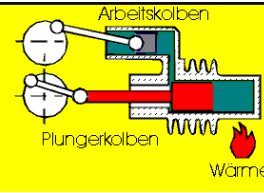


[Vergleich Benzin-/Dieselmotor](#)

60 © Doris Walkowiak

Stirlingmotor

- Erwärmung → Luft dehnt sich aus
- erhitzte Luft strömt am Verdrängerkolben vorbei, schiebt den Arbeitskolben nach hinten, wird in den Kühlzylinder verdrängt, gibt Wärme ab
- Durch das Schwungrad schiebt sich der Arbeitskolben nach vorn und komprimiert dabei die Luft → gibt weiter Energie an den Kühlzylinder ab
- Verdrängerkolben bewegt sich wieder zurück, wobei er die abgekühlte Luft aus dem Kühlzylinder in den Heizzylinder verdrängt.
- Luft wird wieder erwärmt



- Kühlzylinder
- Heizzylinder
- Verdrängerkolben (liegt nicht dicht am Zylinder an → Luft kann vorbeistromen)
- Arbeitskolben (liegt dicht an)
- Pleuelstangen (um 90° versetzt angebracht)
- Schwungrad
- Wärmequelle (frei wählbar)

<http://www.stirlingmotor.com/funktion.htm>

<http://www.klassenarbeiten.net/referate/physik/mechanik/stirlingmotor.shtml>

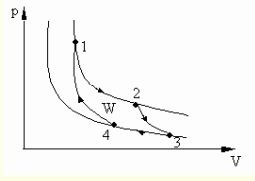
© Doris Walkowiak

Thermischer Wirkungsgrad

- allgemein: $\eta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{P_2}{P_1}$
- Carnot: $\eta = \frac{W}{Q_{1,2}}$

$$\eta = \frac{Q_{1,2} + Q_{3,4}}{Q_{1,2}} = 1 + \frac{Q_{3,4}}{Q_{1,2}}$$

$$Q_{1,2} = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q_{3,4} = -nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$


© Doris Walkowiak

Heizwert

- Der Heizwert H ist der Quotient aus der (bei vollständiger Verbrennung eines Stoffes) freierwerdenden Energie ΔE und der Masse m des Brennstoffes.

$$H = \frac{\Delta E}{m} \quad [H] = \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$H = \frac{W}{m} = \frac{P \cdot t}{m} \quad P = \frac{H \cdot m}{t} \quad \text{Wärmeleistung}$$

Wie viel Steinkohle (H = 29 MJ/kg) muss verbrannt werden, um bei einem Wirkungsgrad von 30 % thermische Energie von 100 MJ zu erzeugen?

$$E_{\text{auf}} = \frac{E_{\text{nutz}}}{\eta} = \frac{100 \text{ MJ}}{0,3} = 333,3 \text{ MJ} \quad 333,3 \text{ MJ} : 29 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 11,5 \text{ kg}$$

© Doris Walkowiak

Sonstiges

- [Kreuzworträtsel](#)

© Doris Walkowiak

Quellen

- [Leifiphysik](#)
- <http://www.walter-fendt.de/ph14d/> (Applet Gasgesetz)
- <http://www.k-wz.de/physik/gasgleichung.html> (Applet Zustandsgleichung)
- <http://www.zum.de/dwu> (Folien, Animationen, Rätsel)
- <http://saftsack.fs.uni-bayreuth.de/thermo/>
- http://physikaufgaben.de/aufgaben_te.php?id=4 (Aufgaben zur Thermodynamik)
- www.schuelerlexikon.de (Physik – Online-Lexikon)
- http://www.schuelerlexikon.de/tafelwerk/700/fs_html/fs_start.htm (Online-Tafelwerk mit Mathcad-Aufgabenbeispielen)
- www.physik-am-auto.de

© Doris Walkowiak

Lösung zu Beispiel 19

Geg: $m = 100 \text{ g}$ $c = 0,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ Ges.: Q

$\vartheta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta_S = 327 \text{ }^\circ\text{C}$ $q_S = 26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\vartheta_2 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Lsg.: $Q_1 = c \cdot m \cdot \Delta T$ $Q_3 = c \cdot m \cdot \Delta T$

$Q_1 = 0,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,1 \text{ kg} \cdot 307 \text{ K}$ $Q_3 = 0,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,1 \text{ kg} \cdot 173 \text{ K}$

$Q_1 = 3,991 \text{ kJ}$ $Q_3 = 2,249 \text{ kJ}$

$Q_2 = q_s \cdot m = 26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,1 \text{ kg} = 2,6 \text{ kJ}$ $Q_{\text{ges}} = 8,84 \text{ kJ}$

© Doris Walkowiak