



Energietechnik

Unterrichtsplanung für TGT-J2

Inhaltsverzeichnis

Lehrplan.....2
Der Begriff „Energietechnik“.....2
mögliche Einleitung.....3
Prinzip eines Verbrennungsmotors.....3
 Was ist ein Verbrennungsmotor?.....
 Takte.....
 Energieumwandlung.....
 Kurbeltrieb und Motorsteuerung.....
 Energiefluss, Wirkungsgrad.....
 Nebenaufgaben der Motorkonstruktion.....
Ideale Gase.....4
Verhalten idealer Gase.....4
 Thermische Zustandsgleichung.....
 Beteiligte Zustandsgrößen.....
 Mögliche Verknüpfungen.....
 Ideales Gasgesetz.....
 Zustandsgleichungen.....
 Isobare Zustandsänderung.....
 Isochore Zustandsänderung.....
 Isotherme Zustandsänderung.....
 Adiabatische Zustandsänderung.....
 Reale Gase.....
Grundlagen der Thermodynamik I.....5
 Wärmekapazitäten c_v und c_p
 isobare Wärmezufuhr.....
 isochore Wärmezufuhr.....
 Innere Energie U
 1. Hauptsatz der Thermodynamik.....
 Schlussfolgerung für Kreisprozesse.....
 Höhere und niedrigere Energieformen.....
 Kinetische Gastheorie.....
 Druck p
 Temperatur T
 Gasspezifischen Größen (Übersicht).....
 Überströmversuch.....
(Wärmekraft-)Prozesse idealer Gase.....8
 Kreisprozesse.....
 pV-Diagramm (Indikatordiagramm).....
 Ottomotor: real \leftrightarrow idealisiert.....
 Arbeit im pV-Diagramm.....
 Drehrichtung im pV-Diagramm.....
 rechtsgängiger Prozess.....
 linksgängiger Prozess.....
 Notwendigkeit der Kühlung.....
 rechtsgängige Kreisprozesse.....
 Viertakt-Ottomotor.....
 Wankelmotor.....
 Viertakt-Dieselmotor.....
 Stirlingmotor = Heißluftmotor.....
 Zweitaktprozesse (Otto, Diesel).....
 Gasturbine.....
 Vakuummotor (Flammenfresser).....
 Sonstige.....
 linksgängige Kreisprozesse.....
 Stirling-Kältemaschine.....
 Stirling-Wärmepumpe.....
ab hier überarbeiten.....11
Grundlagen der Thermodynamik II.....11
 Grundgedanke.....
 Kühlung.....
 Anergie und Exergie.....
 Höhere und niedrigere Energieformen.....
 Carnot-Wirkungsgrad η_c
 2. Hauptsatz der Thermodynamik.....
 Formulierung nach Carnot (1824).....
 Formulierung nach Kelvin.....
 Formulierung nach Buchholz.....

Konsequenzen aus dem 2.HS.....
 Reversibler Prozess.....
 irreversibler Prozess.....
 Reale Prozesse.....
 Entropie S
 Vorüberlegung.....
 Regeln für Entropie.....
 Definition.....
 andere Formulierungen des 2. HS.....
 3. Hauptsatz der Thermodynamik.....
 0. Hauptsatz der Thermodynamik.....
Prozesse mit realen Fluiden.....15
Dampfprozesse (mit realen Fluiden).....15
 Wärmekraftwerk.....
 Schematische Darstellung.....
 Energieumwandlung in Blockschaltbildern.....
 Rankine-Prozesse (OCR).....
 Wärmepumpen.....
 Wärmepumpe.....
 Kältemaschine.....
 (Ad-)Sorptionkältemaschine.....
 Absorptionkältemaschinen.....
 Klimaanlage.....
 Kältemittel.....
 Geschichte.....
Dampfprozess (theoretisch).....16
 T,s-Diagramm.....
 Zwischenüberhitzung.....
 Wärme im T,s-Diagramm.....
Sonstiges.....17
Energiewirtschaft.....17
 Möglichkeiten der Energieumwandlung.....
 Begriffe.....
 Grund-, Mittel-, Spitzenlast.....
 Stromnetz.....
 Höhere und niedrigere Energieformen.....
Energie sparen.....18
 Ihr wollt gar nicht sparen!.....
 Schaden Importäpfel dem Klima?.....
Stromerzeugung.....19
 Wärmekraftwerke.....
 Dampfkraftwerke.....
 Gasturbinenkraftwerke.....
 Kombikraftwerke (GuD).....
 Co-Firing.....
 Kernkraft.....
 Kernspaltung.....
 Kernfusion.....
 Flusswasserkraftwerke.....
 Laufwasserkraftwerke.....
 Wasserwirbelkraftwerk.....
 Speicherkraftwerke.....
 Meerwasserkraftwerke.....
 Gezeitenkraftwerke.....
 Wellenkraftwerke.....
 Osmosekraftwerk.....
 Windkraftwerke.....
 Windräder mit waagerechter Achse.....
 Windräder mit senkrechter Achse.....
 Segel.....
 Lenkdrachen und Gleitsegel.....
 Solarkraftwerke.....
 Parabolspiegelanlagen.....
 Solarzellen.....
 Aufwindkraftwerke.....
 Fallwindkraftwerke.....
 Kleinkraftwerke.....
 Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen KWK.....
 Blockheizkraftwerke BHKW.....

Stromerzeugeraggregate (SEA).....
 Biogasanlagen.....
 Sonstiges.....
 Muskelmotoren.....
Elektrische Energie speichern.....21
 Energiespeicherung.....
 Pumpspeicherkraftwerke.....
 Druckspeicherkraftwerke.....
 Lithium-Ionen-Akkumulator.....
 Ringwellspeicher.....
 Kugelspeicher in Tiefwasser (Bezeichnung?).....
 Elektrolyse = Power-to-Gas.....
 Wasserstoff.....
 Erdgas.....
 Verbrauchssteuerung.....
 Stromverbund.....
 Desertec.....
Stromtransport.....21
 Spannungsebenen.....
 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ).....
Kraftstoffe.....21
 Liquid Natural Gas LNG.....
 Compressed Natural Gas CNG.....
 Liquid Petrol Gas LPG = Flüssiggas.....
Allgemeine Aufgaben.....22
 Nord-Stream-Pipeline durch die Ostsee.....
Diagramme.....23
 Energieflussdiagramm.....
 Tortendiagramm/ Kreisdiagramm.....
 Zweck.....
 Darstellung.....
 Blockdiagramm.....
 verschiedene Beispiele.....
 Liniendiagramm (quantitativ).....
 Liniendiagramm (qualitativ).....
 Nomogramm.....
 Weg-Schritt-Diagramm.....
 Phasendiagramm, Zustandsschaubild.....
 Balkendiagramm.....
 Stabdiagramm.....
 Histogramm (kumuliert).....
 Sitzverteilung.....
 Balkendiagramm (manipulativ).....
Formelkram.....25
 Rechnen mit Wärmekapazitäten.....
 (isochore) Wärmekapazität c_v
 Boltzmann-Konstante k_B
 (isobare) Wärmekapazität c_p
 äußere Arbeit W
 Gaskonstante.....
 $R_i \leftrightarrow$ Dichte ρ
 $R_i \leftrightarrow$ Wärmekapazitäten c
 Universelle Gaskonstante R
 Adiabatenexponent κ
 $\kappa \leftrightarrow$ Wärmekapazitäten c
 $\kappa \leftrightarrow$ Freiheitsgrade f
 Freiheitsgrade $f \leftrightarrow$ Wärmekapazitäten c
 Übersicht.....
 Enthalpie H
Temperatur.....27
 Was ist Temperatur?.....
 Temperaturskalen.....
 Celsius und Kelvin.....
 Temperaturmessung.....
 Thermometer, Temperatursensoren.....
 Pyrometer, Thermografie.....
 Sonstige Effekte.....
 Formelzeichen.....
 Temperatur \leftrightarrow Wärme.....



Lehrplan

Der Bereich der Energietechnik vermittelt Einsichten in Probleme der elektrischen Energieversorgung. Die Schülerinnen und Schüler sollen befähigt werden, aktuelle Energiediskussionen sachlich zu bewerten.

T 10 Energietechnik I		30 Stunden
10.1	Durch eigenständiges Auswerten von Quellen Energieversorgung und -verbrauch bestimmen und die damit zusammenhängenden Probleme ableiten	Energieträger - nichterneuerbare Vorräte - erneuerbare Vorräte Energieformen Energieverbrauch - Weltenergieverbrauch - Primärenergieverbrauch in Deutschland - Energieverbrauch im Haus
10.2	Thermodynamische Grundlagen links- und rechtsgängiger Kreisprozesse bei Energieumwandlungen anwenden	Allgemeines Gasgesetz p,V-Diagramm, Zustandsänderungen idealer Gase Berechnung zu Motorprozessen - Ottoprozess - Dieselpprozess - Stirlingmotor
10.3	Energieumwandlung bei der Stromerzeugung in Wärmekraftwerken beschreiben Energiebilanzen an ausgewählten Energiesysteme erstellen und unter dem Gesichtspunkt der Umwelt- und Gesellschaftsrelevanz beurteilen	Konventionelles Kraftwerk, Baugruppen - Dampferzeuger - Turbinenanlage - Generator Kraft-Wärme-Kopplung Blockheizkraftwerk Für alle Systeme: - Energieeinsatz - Nutzenergie - Wirkungsgrad - Energieflussbild Berechnung im T.s-Diagramm zum konventionellen Kraftwerk und zur Kraft-Wärme-Kopplung
		Gruppenarbeit, Schülerreferate Statistische Daten, Diagramme Schaubilder Lehrplan Physik, Klasse 11 Carnot-Kreisprozess, Carnot-Wirkungsgrad Motor und Wärmepumpe Gas- und Dampfturbinenkraftwerk Exkursion s nur q/T definieren

Der Begriff „Energietechnik“

Lehrplan verwendet den Ausdruck Wärmetechnik, die Formelsammlung den Ausdruck Wärmelehre, an einer Uni heißt das Fach Thermodynamik. Sie ist die Lehre der Energie, ihrer Erscheinungsform und Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.

Seitenumbruch



Ideale Gase

Verhalten idealer Gase

Thermische Zustandsgleichung

Beteiligte Zustandsgrößen

V, p, T, m, Gasart, ρ

Mögliche Verknüpfungen

- 1) $p = konst.$
- 2) $p \cdot V = konst.$ oder $\frac{p}{V} = konst. ?$
- 3) $p \cdot V \cdot m = konst.$ oder $\frac{p \cdot V}{m} = konst. ?$
- 4) $\frac{p \cdot V}{m} \cdot T = konst.$ oder $\frac{p \cdot V}{m \cdot T} = konst. ?$

Ideales Gasgesetz

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

Zustandsgleichungen

Für konstante Masse und Art eines Gases gilt:

$$\frac{p \cdot V}{T} = konst. \Leftrightarrow \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

→ [EuroTabM47] S.40 „Gasgleichung“

Isobare Zustandsänderung

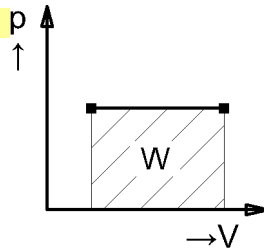
$p = konst., Q \uparrow \rightarrow V \uparrow$

$$\frac{V}{T} = konst. \Leftrightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$W_{12} = - \int p dV \Rightarrow W_{12} = - p \cdot (V_2 - V_1)$$

$$Q_{12} = c_p \cdot m \cdot \Delta T$$

Auch benannt nach dem Entdecker Joseph Louis Gay-Lussac (1778 – 1850). Tritt auf z.B. bei Gleichdruckverbrennung durch die allmähliche Einspritzung im Dieselmotor.



Isotherme Zustandsänderung

$T = konst. \rightarrow \Delta U = 0$

$$p \cdot V = konst. \Leftrightarrow p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

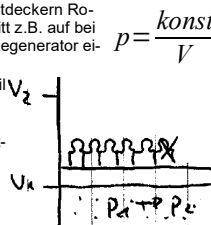
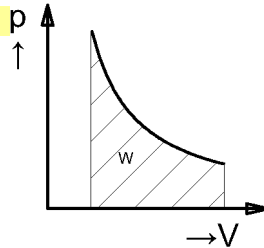
$$W_{12} = - m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$= - m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$Q + W = \Delta U = 0 \rightarrow Q_{12} = -W_{12}$$

Es handelt sich um eine Hyperbel. Auch benannt nach den Entdeckern Robert Boyle (1627 - 1692) und Edme Mariotte (1620 -1684). Tritt z.B. auf bei langsamen Prozessen oder beim Wärmeaustausch mit dem Regenerator eines Stirlingmotors.

Bei einem isothermen Prozess ist $Q = W$ (betragsmäßig), weil ΔV_2 $\Delta T = 0$ und damit $\Delta U = 0$ sind. Bildliche Darstellung: Gewichte werden in kleinsten Schritten abgenommen so langsam, dass ein Temperatureausgleich stattfinden kann.



- 1) *Ültg: pV-Diagramm Ottomotor: Welche Gesetze muss man kennen, um den Verbrennungsprozess berechnen bzw. optimieren zu können?*
Nebenher soll noch gezeigt werden, wie man eine halb vergessene Formel 'herleiten' kann. Zustandsgrößen p, V, T sind nur vom augenblicklichen Zustand eines Systems abhängig und nicht von seiner Geschichte im Gegensatz zu Prozessgrößen wie Q und W.
- 2) *Wie leitet man eine Formel her, die man schon mal gesehen hat?*
- Welche Größen spielen eine Rolle? Wie stehen sie in der Formel? → Hier wird gezeigt, wie man ein klassisches Schülerproblem lösen kann.
- 3) *Gegeben: Luftpumpe. Welche Zustandsgrößen des Gases können in der Luftpumpe verändert werden?*
Antwort: bei geschlossener Pumpe: Druck p, Volumen V, Temperatur T, Dichte ρ (→ wird durch m und V ersetzt); offene Pumpe: Masse m, Gasart „R“
- 4) *Die Größen werden irgendwie miteinander verknüpft und ergeben eine Konstante.*
- 5) *Ich beginne mit $p = konst.$ und ergänze V. Wie verändert sich V, wenn p durch Kompression der Luft steigt? Muss V multipliziert oder dividiert werden, damit die Formel konstant bleibt?*
Wenn der Druck steigt, sinkt das Volumen, und das Produkt der beiden bleibt konst. Wenn die Masse steigt, nimmt Druck oder Volumen zu, m muss in Nenner usw.
- 6) *Die Konstante steht für die Art des Gases, heißt spezifische Gaskonstante R_i bzw. R_s und das Gasgesetz lautet..*

Zustandsgleichungen sind Spezialfälle der allg. Gasgleichung für eine gegebene Gasmenge.

Ableiten der Spezialfälle an der Tafel gemäß Gasgesetz AB

- 7) *Im Allgemeinen ändern sich Masse und Art der Gase während einer Zustandsänderung nicht oder vernachlässigbar (z.B. bei einer Verbrennung). Also kann das Gasgesetz vereinfacht werden zu $pV/T = konst.$*
- 8) *Die Spezialfälle entstehen, wenn jeweils eine weitere Zustandsgröße p, V, T oder Q (S) konstant bleibt.*

Bei allem Respekt vor den Entdeckern (Gay-Lussac usw.) der Spezialfälle lege ich keinen Wert auf die unsystematische Bezeichnungen nach ihnen.

Isochore Zustandsänderung

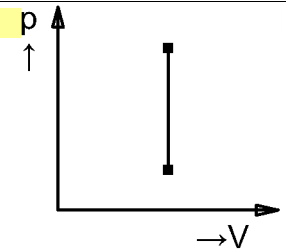
$V = konst., Q \uparrow \rightarrow p \uparrow$

$$\frac{p}{T} = konst. \Leftrightarrow \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$W_{12} = 0$$

$$Q_{12} = c_v \cdot m \cdot \Delta T$$

Auch benannt nach dem Entdecker Guillaume Amontons (1663 – 1705). Tritt auf z.B. bei Kolbenmotoren am oberen und unteren Totpunkt, wo sich der Kolben kaum bewegt. [GrundwissenIng8] S.654 verwendet den Begriff isovolum neben isochor.



Adiabatische Zustandsänderung

$Q = 0$ per definitionem

$$p \cdot V^\kappa = konst. \Leftrightarrow$$

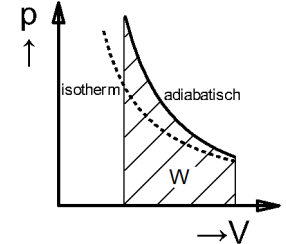
$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa$$

$$W_{12} = - \frac{m \cdot R_i}{1 - \kappa} \cdot [T_2 - T_1]$$

$$Q_{12} = 0$$

Weitere Formeln siehe Formelsammlung

Wenn die adiabatische Zustandsänderung auch noch reversibel ist, bleibt die Entropie konstant ($\Delta s = 0$), und sie heißt isentrop. Auch benannt nach dem Entdecker Siméon Denis Poisson (1781 – 1840). Adiabatisch tritt z.B. bei schnellen Prozessen ohne Zeit zum Wärmeaustausch mit der Umgebung auf. Reversibel heißt quasistatisch mit einer Geschwindigkeit sehr viel kleiner als die Schallgeschwindigkeit. [Baehr 1973] S.28. Bildliche Darstellung wie links, allerdings mit isolierten Wänden.: Gewichte werden in kleinsten Schritten abgenommen so langsam, dass sich pV^κ einpendelt.



Bei adiabatischer Verdichtung und Expansion verändert sich der Druck stärker als bei isothermer, weil sich auch die Temperatur ändert.

$$\Delta s = \frac{q}{T} = 0$$

Reale Gase

[Pischinger 2009] S.13f: Bei hohen Drücken und Temperaturen können die idealen Zustandsgleichungen mit Realgasfaktoren (→ [GrundwissenIng8] S.659f) an die Realität angepasst werden. Das ist aber auch bei Verbrennungsmotoren nur bei sehr hohem Verdichtungsdruck erforderlich.

AB Energietechnik_Ub Gasgesetze

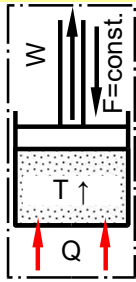
Vertiefung



Grundlagen der Thermodynamik I

Wärmekapazitäten c_v und c_p

isobare Wärmezufuhr



$$\Delta Q_p = c_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (1)$$

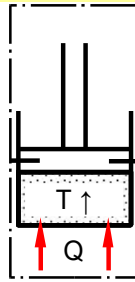
c_p : Wärmekapazität bei konstantem Druck

m: Masse

Q: Wärme (zugeführt)

Wärmekapazität c_p bei isobarer und c_v bei isochorer Wärmezufuhr sind unterschiedlich: $c_p > c_v$

isochore Wärmezufuhr



$$\Delta Q_v = c_v \cdot m \cdot \Delta T \quad (2)$$

c_v : Wärmekapazität bei konstantem Volumen

ΔT : Temperaturdifferenz

W: Arbeit (abgegeben)

Innere Energie U

Bei isochorer Wärmezufuhr geht Q vollständig in U auf

$$\Delta U = Q_v = c_v \cdot m \cdot \Delta T \quad (3)$$

1. Hauptsatz der Thermodynamik

= Energieerhaltungssatz
für geschlossene Systeme formuliert:

$$\Delta Q + \Delta W = \Delta U \quad (4)$$

Bringt man Wärme Q und/oder Arbeit W in ein Gas, erhöht sich seine innere Energie U

Schlussfolgerung für Kreisprozesse

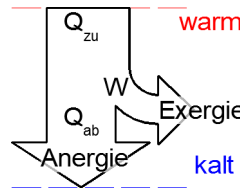
In WKM muss U konstant bleiben

$$\rightarrow \Delta U = 0 \quad \text{bzw.} \quad \Delta Q + \Delta W = 0$$

\rightarrow Kreisprozesse müssen gekühlt werden.

Formulierung nach Carnot für Wärmekraftmaschinen

Carnot: „Mechanische Arbeit wird nicht durch den Verbrauch von Wärme erzeugt, sondern durch ihren Transport von einem warmen zu einem kalten Körper.“



Höhere und niedrigere Energieformen

Man nennt eine Energieform höher, wenn man mehr mech. Arbeit aus ihr herausholen kann.

Vertiefung

1) Berechnen Sie die Carnot-Wirkungsgrade für

- ein Kohlekraftwerk $t_{max} = 550^\circ\text{C}$; $t_{min} = 30^\circ\text{C}$

- einen Ottomotor $t_{max} = 2500^\circ\text{C}$; $t_{min} = 500^\circ\text{C}$

[Tipler 1995] S.562, [Hering 1992] S.159ff enthält auch geschichtliche Entwicklung, [Metzler 1998] S.152ff: Kinetische Gastheorie mit Herleitung der Grundgleichungen. Aus den Wärmekapazitäten c_v und c_p kann man nicht Gaskonstante R und Adiabatenexponent κ berechnen, sondern auch auf den Aufbau der Moleküle schließen.

1) **Isobar:** Zylinder, Kolben, Gas ohne Beschriftung. Wie bekommt man dieses System dazu, mech. Arbeit zu verrichten?

Wärme einleiten!

\rightarrow Temperatur T und Volumen V (f bzw. $p = \text{const.}$) steigen

\rightarrow Volumenänderung bewirkt Arbeit $W (= p \cdot dV)$

Q und W eintragen, Vorzeichenkonvention wie in der Statik: Vom Rest der Welt in das System hinein ist positiv.

2) **Isochor:** geschlossener Zylinder, z.B. Dampfkochtopf, erhitzt auf die gleiche Temperatur. Wärmebedarf?

Gas gibt keine Arbeit W ab, deshalb muss wird weniger Wärme Q benötigt.

3) **Wie nennt man das Verhältnis zwischen Wärmemenge und Temperatur?**

Wärmekapazität c (z.B. 0,5 g Frischgas um 2000K in einem Verbrennungsmotor)

spezifischen Wärmekapazitäten c (klein) beziehen sich wie alle spez. Werte auf die Masse (pro kg). Chemiker verwenden auch die molare Wärmekapazität $\underline{\quad}$ (pro mol).

Tabellen für c: [Dubbel 20] D34; [Baucke 1982] S.353; [Cerbe 2008] S.76

Nach DIN 1304-1 sind Formelzeichen für absolute Temperaturen [K] Großbuchstaben T oder Θ (%THETA), für Temperaturen [$^\circ\text{C}$] Kleinbuchstaben t oder θ (%theta) [Klein 2008]. In der Literatur ist für t auch die alternative Schreibweise θ (%vartheta) üblich.

4) **Gleiches ΔT mit unterschiedlichen Wärmemengen \rightarrow unterschiedliche Wärmekapazitäten c_p und c_v ?. Welches ΔT ist größer?**

c_p ist größer, weil mehr Q für das gleiche zugeführt werden muss,

5) **Wohin geht das mehr an Wärme bei isobarer Erwärmung**

Ein Teil von Q wird in W abgegeben wird.

Bei Flüssigkeiten und Feststoffen spielt der Unterschied wegen der geringen Wärmeausdehnung keine große Rolle.

1) **Temperatur steigt zwar, ist aber keine Energieform. In welcher Form bleibt Wärme im Gas?**

Q im TA bei T ergänzen

2) **Formel für U mit Infos von der Tafel?**

Innere Energie ist eine Zustandsgröße, also unabhängig von der Art der Zustandsänderung, im Gegensatz zu Prozessgrößen wie: Q, W

[Metzler 1998] S.157: „Die gesamte Energie eines thermodyn. Systems, die aus thermischer Energie (potentielle und kinetische Energie der Teilchen), aus chemischer .. und nuklearer E. besteht, heißt innere Energie U.“ [Hering 1992] S.140: „Die Änderung der inneren Energie kann durch Wärmezufuhr ΔQ oder Arbeitsverrichtung W erfolgen“

Die gesamte innere Energie U ist schwer zu bestimmen, für Energietechnik genügt es, mit der Änderung der inneren Energie ΔU zu rechnen, die einfacher zu bestimmen ist.

[Buchholz 2016] S.46 Die Energie, die ein warmer Körper enthält, heißt nicht Wärme, sondern innere Energie. Wärme ist das, was transportiert wird, wenn der warme einen kalten Körper berührt.

3) **Welche Energieformen sind also im Spiel?**

Wärme Q, innere Energie U, Arbeit W

4) **Wie hängen die Energien zusammen?**

Die verschiedenen Fachgebiete Chemie, Physik usw. arbeiten mit denselben Gesetzen - nennen sie aber unterschiedlich, sonst wäre es zu einfach :-).

Nach dem 1. HS ist ein Perpetuum Mobile 1. Art (= Maschine, die dauerhaft mehr Energie abgibt als aufnimmt) unmöglich.

5) **Für den Ingenieur sind sich wiederholender Kreisprozesse wichtig, mit denen WKM kontinuierlich mechanische Arbeit abgeben.**

Q rein, W raus, U steigt, immer wieder, geht das?

In Wärmekraftmaschinen wiederholen sich Prozesse beliebig oft (zyklische Kreisprozesse). Hier darf sich die innere Energie U nicht von Zyklus zu Zyklus ändern, weil sie sonst endlos steigen oder sinken würde. $U = \text{konst} \rightarrow \Delta U = 0$.

Die Summenzeichen Σ sind erforderlich, weil sich Kreisprozesse aus verschiedenen Zustandsänderungen zusammensetzen.

6) **Wie kann man verhindern, dass die innere Energie U dauerhaft steigt?**

U muss durch Kühlung abgeführt werden.

Darstellung nach Carnot: WKM

- benötigen ein Wärmereservoir höherer Temperatur

- können davon einen Teil als mechanische Energie abzweigen

- die restliche Wärme muss an ein kaltes Reservoir abgeführt werden (Kühlung)

- Der mechanisch nutzbare Teil der Wärme heißt Exergie, der nicht nutzbare Anergie.

- Die Unterscheidung zwischen Exergie und Anergie ist ein Vorläufer / eine Ausdrucksform des 2. Hauptsatzes: mech. Arbeit lässt sich vollständig in Wärme umwandeln, Wärme aber nicht vollständig in mech. Arbeit \rightarrow Energie tendiert dazu, sich irreversibel in Wärme mit niedriger Temperatur umzuwandeln.

7) **Sie oben, Exergie und Anergie.**

Exergie ist hochwertige Energie, weil sie nutzbar ist.

Omas Mantra „Mach das Licht aus, wir müssen Energie sparen“ ist physikalisch nicht ganz korrekt, denn wie will man etwas sparen, das laut Energieerhaltungssatz gar nicht verloren gehen kann? Aber jetzt gibt es eine einwandfreie Formulierung: „Wir müssen Exergie sparen.“

8) **Ordnen Sie nach der Qualität der Energie:**

chemische Energie (Kohle, Kraftstoff), Strom, mechanische Energie, Wärme höherer Temperatur, Wärme niedriger Temperatur.

Energie_TA_Thermodynamik-1.odt



Kinetische Gastheorie

Gas speichert Wärme in der ungerichteten kinetischen Energie seiner Teilchen. Wie viel Energie ein Teilchen speichern kann, hängt von der Zahl f seiner Freiheitsgrade ab:

- Freiheitsgrade können sein:
 - + 3x Längsbewegung (alle Gase)
 - + 2x Rotation (2-atomige Moleküle)
 - + 3x Rotation (größere Moleküle)
 - + kleinere Anteile
 - Anziehungskräfte zwischen Molekülen
 - chemische (Bindungs-)Energie
 - quantenmechanische Effekte
 - Schwingung innerhalb der Moleküle (O₂) usw.



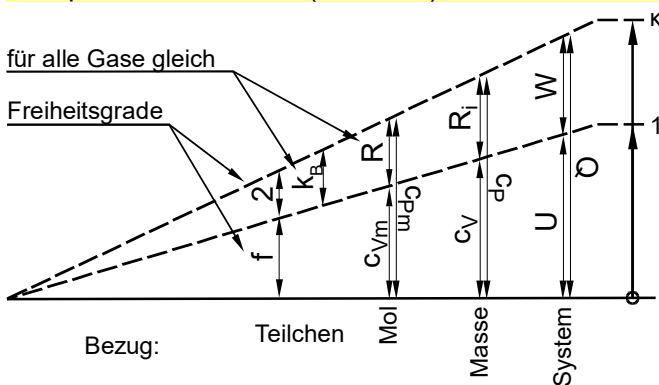
Druck p

- wird durch Zusammenstöße vieler Teilchen übertragen
- ≈ kinet. Energie x Anzahl der Stöße / Zeit

Temperatur T

- T (in K) ≈ durchschnittliche ungerichtete kinetische Energie eines Freiheitsgrades der Teilchen
- wird durch Zusammenstöße einzelner Teilchen übertragen
- E_{kin} = 0 → absoluter Nullpunkt

Gasspezifischen Größen (Übersicht)



Vertiefung

- 1) Berechnen Sie die Freiheitsgrade der Moleküle der Gase, für die in der Formelsammlung Wärmekapazitäten angegeben sind.

Freiheitsgrade eines H₂-Moleküles (Formel)

$$f = \frac{2 \cdot c_V}{c_p - c_V} = \frac{2 \cdot 10,139 \text{ kJ/kgK}}{14,296 \text{ kJ/kgK} - 10,139 \text{ kJ/kgK}} = 4,878$$

He ≈ 3; O₂ ≈ 5

- 2) Druck herleiten

[Metzler 1998] S. 154:

- 3) siehe rechts

- 4) Wie groß ist die Geschwindigkeit des H₂-Moleküls in Richtung einer der Hauptachsen?

- Die Bewegung im Raum setzt sich aus Bewegungen in 3 Richtungen zusammen (vgl: Raumdiagonale im Würfel), deren Geschwindigkeiten nach dem Gleichverteilungssatz durchschnittlich gleich groß sind:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rightarrow v_x = v_y = v_z = \frac{v}{\sqrt{3}} \text{ (durchschnittlich)}$$

- 5) Weisen Sie nach, dass die 3 Einzelgeschwindigkeiten der gleichen Bewegungsenergie entsprechen wie die Gesamtgeschwindigkeit v.

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 3 \cdot \left[\frac{v}{\sqrt{3}} \right]^2 = v^2 \text{ unvollständig}$$

- 1) Ültg: Wie speichert Gas zugeführte Wärme?

[Tyndall 1894] S. 139: Formulierung nach Daniel Bernoulli 1738: „Wenn das Gewicht auf dem Stempel vergrößert und das Gas comprimiert wird, so hat der Stempel einen zweifachen Widerstand der Flüssigkeit auszuhalten. Erstens, weil die Zahl der Molekel im Verhältnis zum Raum, den sie einnehmen, grösser ist; zweitens, weil jedes Molekül seinen Anprall öfter als zuvor wiederholt. ... Und da man annehmen kann, dass die Wärme zunimmt, wenn die Geschwindigkeit der Molekeln sich steigert ...“

Die Wärmekapazität eines einzelnen Teilchens hängt nur von der Anzahl seiner Freiheitsgrade und damit letztendlich von seiner Geometrie ab. Die Masse des Teilchens spielt keine Rolle, leichtere Teilchen fliegen/rotieren/schwingen einfach schneller (Angaben zu Teilchengeschwindigkeiten [Tyndall 1894] S.137.). Auch in Gemischen aus leichten He- und schweren Rn-Atomen gilt der Gleichverteilungssatz: „Im thermodyn. Gleichgewicht ist die Gesamtenergie eines Gases auf alle Freiheitsgrade der Bewegung gleichmäßig verteilt [Metzler 1998] S.160“. Bei Wärmezufuhr müssen also alle Freiheitsgrade eines Gases mit Energie gefüllt werden, während seine Temperatur nur von der Energie eines Freiheitsgrades abhängt (Veranschaulichung: Wärmeübertragung durch Zusammenprall kann nur „in einer Richtung“ stattfinden). Ergo hängt die Wärmekapazität eines Gases von der Anzahl seiner Freiheitsgrade ab.

Nach Vergleich theoretischer und praktischer Werte für Wärmekapazitäten postulierte Rudolf Clausius (1822..1888) ca. 1880, dass O₂ ua. 2-atomige Moleküle seien ([Tipler 1995] S.565). 1-atomig sind die Edelgase He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn. Bei tiefen Temperaturen verhalten sich auch Moleküle wie Ein-Atome; Grund dafür ist, dass der Drehimpuls gequantelt ist und ein Teilchen nicht ins Rotieren gerät, wenn es mit einem Teilchen zusammenstößt, dessen Energie nicht dem minimalen Drehimpuls entspricht ([Hering 1992] S.163). Bei viel höheren Temperaturen kommt es .. durch Dissoziations- und Ionisationsvorgänge zu noch mehr Freiheitsgraden → Wärmekapazitäten sind temperaturabhängig.

Das ideale Gasgesetz gilt nur für Gase mit geringer Dichte = großem Molekülabstand = vernachlässigbare Anziehungskräfte.

Negative Temperatur → [SdW] 03/2013 S.17ff (Der Artikel wäre mir in der Aprilausgabe lieber gewesen.)

Druck p wird wie Temperatur T durch Stöße übertragen, aber es zählt auch die Anzahl der Stöße. Deshalb hängt p von T (E_{kin}) und der Dichte der Teilchen (Stück pro V) ab

[Metzler 1998] S. 155: Die Dichte von Gasen ist ca. 1000x geringer als bei Flüssigkeiten, d.h. der Abstand der Teilchen ist ca. 10x größer. Durchschnittliche Werte für H₂-Molekül unter Normalbedingungen: freie Weglänge λ=113nm, Geschwindigkeit v=1840m/s mit ca. 1,6E+10 Kollisionen pro Sekunde.

Herleitung Druck

Strömen Teilchen in einer gemeinsamen Richtung, trägt dies zur kinetischen Energie, aber nicht zur Temperatur bei. Deshalb lässt man bei der Annäherung an 0K Gas unter Druck aus Düsen strömen. Kinetische Energie je Freiheitsgrad und absolute Temperatur sind proportional. Ohne E_{kin} erreichen bewegungslose Teilchen den absoluten Nullpunkt der Temperatur.

Temperatur wird durch Stöße übertragen, bei denen Teilchen ihre Energien ausgleichen (im Durchschnitt werde „warme“ Teilchen kälter u.u., Wärme fließt vom warmen zum kalten). Dabei kann man nicht die Temperatur eines einzelnen Teilchens betrachten, denn diese streuen erheblich (→ Wasser verdunstet auch bei Raumtemperatur). Temperatur ist der Durchschnittswert aller Beteiligten. Ohne Zusammenstöße gibt es keine Temperaturübertragung. Die Temperatur eines expandierenden Gases sinkt nicht wegen der geringeren Dichte (siehe auch Kap. Überströmversuch S. 7)

- 1) Zusammenhänge zw. den gasspezifischen Größen der Thermodynamik ohne Herleitung (s.u.) darstellen

- f: Freiheitsgrade
- k_B: Boltzmann-Konstante (?)
- c_v: Wärmekapazität bei konstantem Volumen
- c_p: Wärmekapazität bei konstantem Druck
- R: Gaskonstante
- χ: Adiabatenexponent
- U: innere Energie
- Q: Wärmemenge
- W: mechanische Energie

- 3) Schätzen Sie die Geschwindigkeit eines H₂-Moleküles bei 0°C ab.

Formelsammlung Energietechnik

spez. Wärmehalt von H₂ bei 0°C (c_v = const. ist grob geschätzt. Man nimmt c_v, weil bei c_p ein Teil der Energie für die Volumenänderungsarbeit gegen den Druck benötigt wird.):

$$q = c_v \cdot \Delta T = 10,139 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 273,15 \text{ K} = 2769 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

davon entfallen auf die Längsbewegungen (3 von f Freiheitsgraden) der Moleküle

$$q_{kin} = \frac{q \cdot 3}{f} = 2769 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{3}{4,878} = 1703 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ergibt als Geschwindigkeit (Masse eines Moleküls kürzt sich heraus)

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = q_{kin} \cdot m \Rightarrow v = \sqrt{2 \cdot q_{kin}} = \sqrt{2 \cdot 1703 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 1845 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

[Metzler 1998] S.154ff gibt für H₂ eine Molekül durchschnittsgeschwindigkeit v=1840m/s an. Kaum zu glauben, dass diese Schätzung so genau trifft. [Tipler 1995] S.524 kommt bei 300K auf 1,93 km/s → passt.

Zusammengefasste (Schätz-)Formel:

$$v = \sqrt{2 \cdot c_v \cdot T \cdot \frac{3}{f}}$$

[Tipler 1995] S.524: Weitere Beispielrechnungen und dem Hinweis auf den Zusammenhang zur Schallgeschwindigkeit (etwas niedriger als die Geschwindigkeit in einer Achsenrichtung) dort mit der Gleichung

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{M}} = \sqrt{\frac{3 \cdot k_B \cdot T}{m}}$$

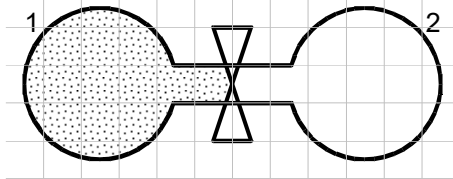


Überströmversuch

Erstmals durchgeführt von Gay-Lussay 1807, verbessert und in seiner Tragweite erkannt von Joule 1845. „Verdünnung der Luft allein .. genügt noch nicht, um die mittlere Temperatur einer Luftmasse herabzusetzen... Vielmehr ist die Abkühlung, welche bei der Ausdehnung stattfindet, dem Verbrauch von Wärme bei der Arbeit zuzuschreiben, und diese Arbeit besteht darin, die Atmosphäre zurückzudrängen..“ ([Tyndall 1894] S.159ff).

Versuchsanordnung

- 1: gasbefüllt
 - 2: Vakuum
 - alles: thermisch isoliert
- Versuch**
Überströmventil wird geöffnet.



Beobachtung

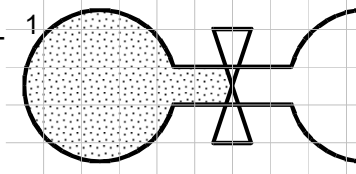
Nach Erreichen des thermodynamischen Gleichgewichtes ist die Temperatur des Gases unverändert.

Aussagen

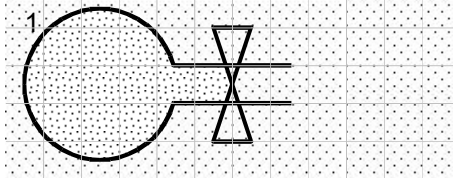
- Die innere Energie eines Gases ist bei konstanter Temperatur vom Volumen und Druck unabhängig
- Die innere Energie verändert sich nur durch Wärme oder Arbeit
- Argument gegen die damals konkurrierende Theorie vom Warmstoff (Phlogiston, Caloricum)

Fragen

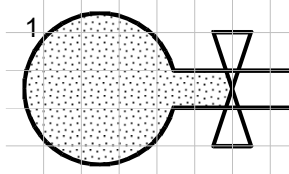
Expansion in unbegrenztes Vakuum



Isobare Expansion, z.B. in die Atmosphäre



Energieinhalt eines Druckbehälters



Zusammenhang zw. Überströmversuch und dem Gesetz von Bernoulli?

1) Unterrichten?

„Dies alles erfordert Nachdenken, um richtig verstanden zu werden, aber jede Geistesarbeit, die Sie sich jetzt auferlegen, wird Ihnen die spätere Arbeit erleichtern können; und ich empfehle Ihnen, die Geduld nicht zu verlieren, auch wenn Sie jetzt noch nicht zu völliger Klarheit gelangen. Verlassen Sie diesen Teil unseres Gegenstandes nicht ohne ernstliche Bemühungen, ihn zu verstehen; ringen Sie eine Zeit lang damit, aber verzagen Sie nicht dabei.“ [Tyndall 1894] S.161. Tyndall wurde vor allem durch seine Vorlesungen bekannt.
Quellen: [Hering 1992] S.183; [Tipler 1995] S.558

[Cerbe 2008] S.73: „Im linken Gefäß eines wärmedichten Systems befindet sich Gas, das rechte System steht unter Vakuum. Öffnet man das Ventil, so strömt das Gas in das rechte Gefäß über, wobei sich das Gas im linken Gefäß abkühlt und im rechten erwärmt. Nach Ausgleich der Temperatur wird die Ausgangstemperatur beim idealen Gas exakt erreicht.“

Erklärung mit der kinetischen Gastheorie: Ein Gasteilchen im Bereich des Ventils hat zwei Möglichkeiten: Entweder es fliegt schnell (!) in die leere Kammer 2, oder es kollidiert mit einem anderen Teilchen (langsam Richtung Kammer 2 fliegende Teilchen können von hinten angeschubst werden). Dann hat es wieder 2 Möglichkeiten: Entweder es fliegt schnell in die leere Kammer 2 oder... So fliegen tendenziell die energiereicheren Teilchen davon und die kälteren bleiben zurück: Kammer 1 wird kalt, Kammer 2 wird warm (sobald die schnellen Teilchen an die Kammerwand prallen und ihre Bewegung wieder ungerichtet wird). Wenn die Expansion an ihr Ende gekommen ist, vermischen sich wieder schnelle und langsame Teilchen und nehmen die ursprüngliche Temperatur an.

Erklärung mit 1.HS: Es braucht Arbeit, um die ausströmenden Teilchen zu beschleunigen, und die notwendige Energie wird kurzfristig aus der inneren Energie entnommen. Nachdem die Teilchen die Grenze der Kammer 2 erreichen, werden sie abgebremst und geben die kinetische wieder an die innere Energie ab. Volumenarbeit wird keine verrichtet, weil ($p_2 = 0 \rightarrow W = p \, dV = 0$ oder $p_1 \, \Delta V_1 = p_2 \, \Delta V_2$ oder ?). Die innere Energie des Gases und damit seine Temperatur bleiben erhalten.
Ähnlich formuliert [Doering 1968] S.53: „Die Volumenänderungsarbeit wird .. vollständig in Reibungsarbeit umgewandelt.“ und unterscheidet zwischen Volumenänderungsarbeit und äußerer Arbeit.

Bekannte Phänomene: Gasflaschen kühlen ab, wenn Gas ausströmt, Überstromventile neigen zum Vereisen.
Nebenbei: Während des Ausströmens ist Kammer 1 wegen der „Drucklücke“ im Ausströmkanal nicht mehr im Kräftegleichgewicht und wird wie ein losgelassener offener Luftballon nach links beschleunigt

[Tyndall 1894] S.161f beschreibt den Überströmversuch so, dass zunächst auch Kammer 2 abkühlt. Begründung kann eigentlich nur sein, dass die gerichtete (kinetische) Energie der strömenden Gasteilchen nicht zur Temperatur (ungerichtete kinetische Energie) beiträgt und die Temperatur erst wieder steigt, wenn die gerichtete Energie an der nächsten Wand verstreut wird.

Bestätigt wird dies durch den Artikel „Kälterekord dank Maxwells Dämon“ [SdW] 06/2011 S.43: „Ein Gas kühlt sich stark ab, wenn es mit mehreren Atmosphären Druck durch ein kleines Loch in ein Vakuum strömt. Solche Gasstrahlen haben eine praktisch einheitliche Energie... Geschwindigkeiten der einzelnen Moleküle .. beispielsweise .. 3000±30 km/h... Thermodynamisch betrachtet bedeutet das: Obwohl ein solcher Überschallstrahl beträchtliche Energie hat, ist er extrem kalt... Wenn es also gelingt, einen solchen Strahl bis zum Stillstand abzubremesen und dabei seine schmale Geschwindigkeitsverteilung zu bewahren, erhalten wir ein ziemlich kühles Atombündel“ → Der Effekt wird ausgenutzt bei der Annäherung an den absoluten Nullpunkt der Temperatur 0K.
James Clerk Maxwell (1831-1879; Maxwell'schen Gleichungen = Zusammenhang zw. Elektrizität und Magnetismus; Maxwell'sche Verteilung = Geschwindigkeitsverteilung von Gasmolekülen) entwickelte in einem Gedankenexperiment einen Dämon, der schnelle und langsame Moleküle trennt und damit den 2.HS infrage stellt.

Um gedanklich Druck p und Temperatur T sauber zu trennen, stelle man sich einen Kolben zwischen Kammer 1 und der Umgebung vor.

Von beiden Seiten stoßen Teilchen gegen den Kolben und er bewegt sich in Richtung des geringeren Druckes von 1 weg. Durch diese Bewegungsrichtung des Kolbens wird jedes Teilchen aus 1 beim Rückprall ein wenig langsamer und verliert innere Energie. Das geht solange, bis der Kolben im Kräftegleichgewicht ist.

Erklärung mit 1.HS: Das Gas in 1 verrichtet Volumenarbeit gegen die Atmosphäre und nimmt die notwendige Energie aus der inneren Energie.

Der Menge der potentiellen Energie erschließt sich nicht aus der zugeführten Arbeit, da die nötige Arbeit vom gewählten Weg abhängt. Komprimiert man isotherm, geht Wärme verloren, die man von der Kompressionsarbeit wieder abziehen muss. Komprimiert man adiabatisch, muss man unrealistisch mit einer tieferen Temperatur beginnen. Es bleibt der 1.HS:
 $\Delta U = Q + W$. Arbeit wird hineingesteckt, Wärme fließt gleich die Temperatur aus und die Energie, die im Behälter steckt, ist innere Energie ($\Delta U = c_v \cdot m \cdot (\Delta T)$).



(Wärme-)Prozesse idealer Gase

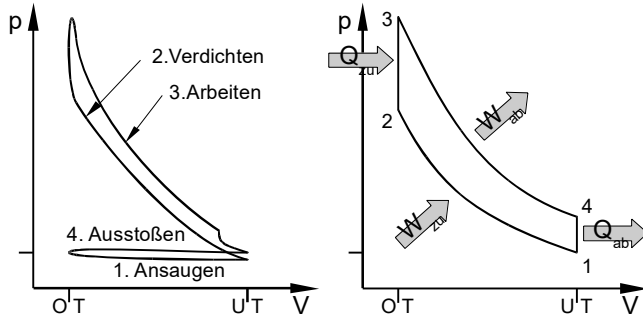
Kreisprozesse

In WKM muss U konstant bleiben → ΔU = 0
oder ΣQ + ΣW = 0

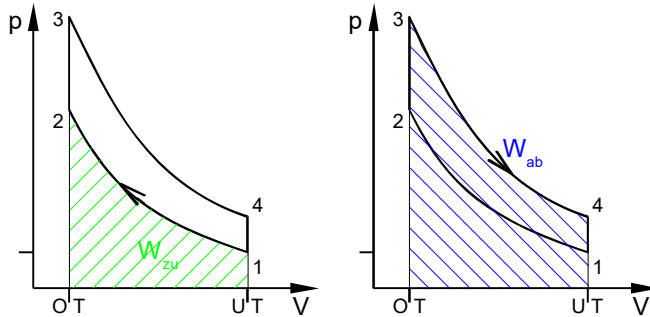
pV-Diagramm (Indikatordiagramm)

= geeignet zur Beschreibung von Prozessen in Wärmekraftmaschinen mit idealen Gasen, weil
– aussagekräftig bzgl. mechanischer Arbeit
– leicht zu messen

Ottomotor: real ↔ idealisiert



Arbeit im pV-Diagramm



Kompressionsarbeit

$$W_{12} = - \int_1^2 p \cdot dV < 0$$

W₁₂ wird zugeführt

Expansionsarbeit

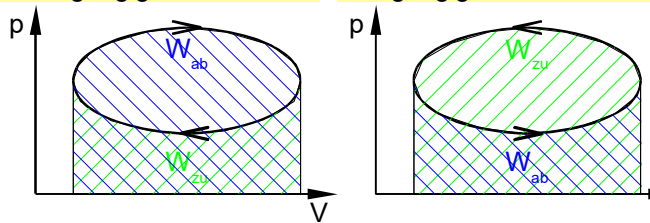
$$W_{34} = - \int_3^4 p \cdot dV > 0$$

W₃₄ wird abgegeben

Drehrichtung im pV-Diagramm

rechtsgängiger Prozess

linksgängiger Prozess



|W_{ab}| > |W_{zu}|
gibt Arbeit W_{Nutz} ab
→ Wärmekraftmaschinen

|W_{ab}| < |W_{zu}|
nimmt Arbeit W_{Antr} auf
→ Wärmepumpen

Notwendigkeit der Kühlung

Eine für WKM geeigneter Kreisprozess benötigt:

- Wärmezufuhr → Drucksteigerung
- Expansionsarbeit → Gewinn von Arbeit
- Kompressionsarbeit und Wärmeabfuhr → um zum Ausgangspunkt zu gelangen

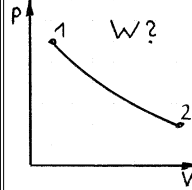
Jeder zyklische Wärmeprozess muss gekühlt werden!

Quellen: [Tipler 1995]; [Wagner 1990]

1) Wdhg:

In Wärmekraftmaschinen (WKM) wiederholen sich Prozesse beliebig oft (zyklische Kreisprozesse). Hier darf sich die innere Energie U nicht von Zyklus zu Zyklus ändern, weil sie sonst endlos steigen oder sinken würde. U = konst ↔ ΔU = 0. Die Summenzeichen Σ sind erforderlich, weil sich Kreisprozesse aus verschiedenen Zustandsänderungen zusammensetzen.

Arbeit im pV-Diagramm



Grundformel:

$$W = F \cdot s = \frac{F}{A} \cdot s \cdot A = p \cdot V$$

allgemeine Formel:

$$W = - \int p \cdot dV$$

– Vorzeichenkonvention

Ein pV-Diagramm ist gut geeignet, Prozesse in WKM zu beschreiben, weil es aussagekräftig und leicht zu messen ist. [Matschoss 1901] S.227: Der Indikator wurde schon von Watt verwendet und dann ca. 50 Jahre vergessen. „Das Indikatordiagramm .. [ließ] in vorzüglichster Weise die Wirkung der Steuerung .. erkennen.“

FO Dampfdruckschaubild einer Kolben-dampfmaschine

[Bosch 26] S.461: „Für .. technische Arbeit sind .. nur Druckänderungen mit .. Volumenänderungen (sic) interessant, die in einem .. p,V-Diagramm dargestellt werden können.“

1) Das pV-Diagramm ist u.a. deshalb gut geeignet, weil man die mechanische Arbeit herauslesen kann. Wo steckt sie?

Die Vorzeichenkonvention besagt, dass Arbeit, die in ein System fließt, positiv ist (vgl. Freimachen), z.B. beim Ansaugen mit p<0 und ΔV>0 (steigend) ergibt sich so eine positive Arbeit, die in das Gas eingebracht werden muss.

2) Tragen Sie die Arbeit in die pV-Diagramme ein.

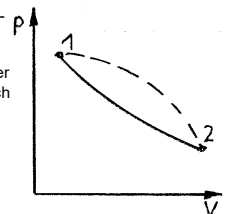
3) Welche Vorzeichen hat die Arbeit jeweils?

W₁₂: Das Integral von rechts nach links oberhalb der x-Achse ergibt einen negativen Wert, zusammen mit der Vorzeichenkonvention wird der Wert wieder positiv und besagt, dass Arbeit in das System hineingesteckt wird.

W₃₄: Das Integral von links nach rechts oberhalb der x-Achse ist positiv, mit der Vorzeichenkonvention negativ, d.h. Arbeit wird aus dem System abgegeben.

Die Arbeit im pV-Diagramm ist eine Prozessgröße, d.h. wegeabhängig. Es kommt darauf an, auf welchem Weg man von Zustand 1 zu Zustand 2 kommt.

Die Volumenarbeit $W = - \int p \cdot dV$ ist die Fläche zwischen der Umgebungsdrucklinie und der Umhüllenden. Rein rechnerisch könnte man sich auch auf Druck 0 beziehen, aber das vernachlässigt den atmosphärische Druck unter dem Kolben.

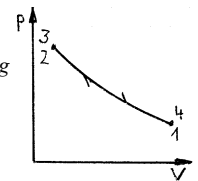


1) Dauerhafte Energiewandlungen benötigen Kreisprozesse, die zum Ausgangszustand zurückkehren.

2) Expansion und Kompression auf dem gleichen Weg liefert keine Arbeit und ist technisch sinnlos.

3) Deshalb muss das expandierte Volumen wieder verkleinert werden.

4) Um Arbeit abzugeben müssen die Zustandsänderungen im pV-Diagramm eine Fläche umschließen. Dazu gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: linksgängig und rechtsgängig.



Hinweis: Es gibt Maschinen, die in beiden Richtungen laufen können, z.B. Stirlingmotoren.

5) Anschließend Beschränkung auf rechtsgängige Prozesse.

[Metzler 1998]: Die gebogenen Linien im idealisierten Kreisprozess des Ottomotors seien Adiabaten, auf denen kein Wärmeaustausch stattfindet. Um eine Fläche zu umschließen = Arbeit zu gewinnen, muss man von einer Adiabaten zur anderen und zurück wechseln, d.h. Wärme zu- bzw. abführen. Das gilt auch für alle anderen möglichen Kreisprozesse, schon weil diese durch infinitesimal kurze Isochore und Adiabaten angenähert werden können. Carnot machte das Gedankenexperiment mit dem technisch nicht realisierbaren Carnot-Prozess aus Adiabaten und Isothermen

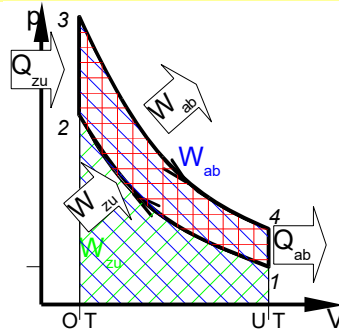
Bei Wärmekraftmaschinen mit idealen Gasen wird kälteres Gas komprimiert und heißes Gas expandiert, um eine große Fläche W_{nutz} zu umschließen. Bei Dampfprozessen wird das Medium flüssig auf Druck gepumpt, bevor sein Druck/Volumen durch Wärmezufuhr erhöht werden. Im flüssigen Zustand ist die erforderliche (Volumen-)Arbeit deutlich niedriger.



rechtsgängige Kreisprozesse

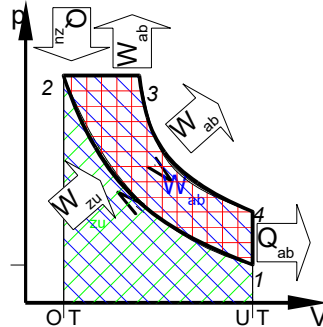
Viertakt-Ottomotor

- 1-2: adiabatische Verdichtung
 - 2-3: isochore Wärmezufuhr (durch Verbrennung)
 - 3-4: adiab. Expansion
 - 4-1: isochore Abkühlung (durch Gaswechsel)
- Die Verbrennung erfolgt schnell, weil das KLG „fertig vorgemischt“ ist = (Gleichraumverbrennung)



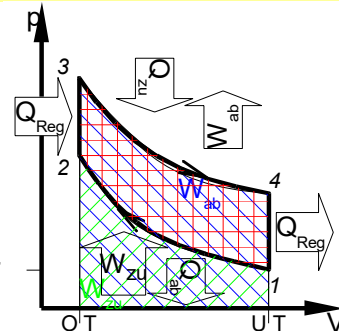
Viertakt-Dieselmotor

- 1-2: adiab. Verdichtung
 - 2-3: isobare Wärmezufuhr (durch Verbrennung)
 - 3-4: adiab. Expansion
 - 4-1: isochore Abkühlung (durch Gaswechsel)
- Die Verbrennung erfolgt langsam, weil Kraftstoff allmählich eingespritzt wird = (Gleichdruckverbrennung)



Stirlingmotor = Heißluftmotor

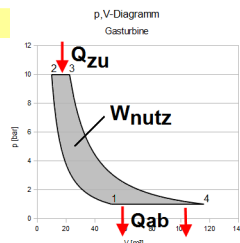
- 1-2: isotherme Verdichtung
 - 2-3: isochore Erwärmung (vom Regenerator)
 - 3-4: isotherme Expansion
 - 4-1: isochore Abkühlung (an den Regenerator)
- Der Regenerator ist ein Zwischenspeicher für Wärme, die er beim Vorbeiströmen mit dem Medium austauscht. Expansion und Verdichtung sind isotherm, weil gleichzeitig Wärme zu- bzw. abgeführt wird.



Zweitaktprozesse (Otto, Diesel)

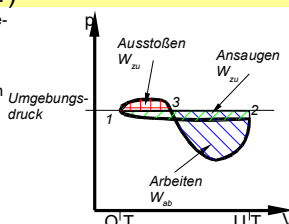
Gasturbine

- Gleichdruck- oder Jouleprozess
- 1-2: adiabatische Kompression
- 2-3: isobare Wärmezufuhr
- 3-4: adiabatische Expansion
- 4-1: isobare Wärmeabfuhr



Vakuummotor (Flammenfresser)

- 1-2: Vor dem Ansaugventil brennt eine Flamme, deren heiße Abgase angesaugt werden (mit der Flamme, deshalb „Flammenfresser“), wenn es öffnet (von KW gesteuerter Schieber).
- 2-3: Die heiße Luft im Zylinder kühlt ab, sodass ein Unterdruck entsteht und der Umgebungsdruck (atmosphärisch) den Kolben in den Zylinder drückt (Arbeitstakt).
- 3-1: Durch die Verkleinerung des Volumens steigt der Druck wieder, und das restliche Gas wird ausgestoßen. Man verwendet einen Nebenausgang, damit die Flamme vor den Einlass nicht gestört wird. Der Nebenausgang ist durch ein Rückschlagventil geschlossen.



Sonstige

Dampfturbine; Kolbendampfmaschine

[Cerbe 2008] ausführlich

AB Viertakt-Ottomotor

[Bosch 21] S.368, [Bosch 26] S.482f

- 1) Ausführlich im Unterricht rechnen
- 2) Mögliche Erweiterung

AB Verbrauchskennfeld

Wankelmotor

Das pV-Diagramm des Wankelmotors ist identisch mit dem des Viertakt-Ottoprozesses.

In den üblichen Darstellungen wird die Arbeit als Fläche bis 0 bar dargestellt und auch mit absoluten Drücken berechnet. Das stimmt aus der Sicht des Mediums im Zylinder, ab nicht im Sinne der über die Kurbelwelle umgesetzten Arbeit, denn der Anteil der mechanischen Arbeit zwischen 0 und 1 bar stammt vom Umgebungsdruck. Deutlich wird dies, wenn man den Gaswechselprozess beim Viertakter betrachtet. Beispiel Ansaugen: Wenn man mit dem Absolutdruck z.B. 0,9 bar rechnet, wird $w_{\text{Ansaug}} < 0$, also scheinbar abgeführt.

$$W_{\text{Ansaug}} = - \int 0,9 \text{ bar} \cdot dV < 0$$

Damit vernachlässigt man, dass auf den Kolben von der anderen Seite her Umgebungsdruck wirkt und der resultierende Druck -0,1 bar ist. Wenn man mit diesem relativen Druck rechnet, wird wie erwartet $w_{\text{Ansaug}} > 0$, also zugeführt.

3) Ein: Diesels Entwicklungsziel

Mit einer allmählichen (Gleichdruck-)Verbrennung kann W_{Nutz} erhöht werden. Diesel wollte dies praktisch umsetzen, tatsächlich kann man reale pV-Diagramme von Otto- und Dieselmotoren kaum unterscheiden, außerdem sinkt der Wirkungsgrad (siehe Abgastemperatur) mit verlängerter Verbrennung (vgl. Kolbendampfmaschine).

AB Viertakt-Dieselmotor

- 4) Hausaufgabe ohne Kontrolle

Adiabatisch – Isotherm:

Bei Otto- und Dieselmotor werden Kompression und Expansion als adiabatisch angenommen, weil sie so schnell verlaufen, dass keine Zeit für Wärmeaustausch mit der Umgebung ist. Beim Stirlingprozess sind sie isotherm, weil beim Komprimieren Wärme an den Kühlkörper abgegeben wird und beim Expandieren Wärme vom Erhitzerkopf aufgenommen wird.

Die Kurven kann man augenscheinlich kaum trennen. Mathematisch werden die Kurven $p \cdot V^1 = \text{const.}$ (isotherm) und $p \cdot V^\kappa = \text{const.}$ (adiabatisch) formuliert, der Unterschied liegt also im (Polytropen-)Exponenten (1 zur Verdeutlich). Real sind beide Ideale nicht zu erreichen, die Prozesse bei Polytropenexponenten zwischen 1 und κ .

Heißluftmotor von Leybold

- 1) Aufbau des Heißluft-/Stirlingmotors

Wärmequelle (hier elektrisch), Kühlung, 2 Kolben mit 2 Pleueln, gekoppelt an der Kw

- 2) Motor laufen lassen: Wie funktioniert ein Stirlingmotor?

Der Verdrängerkolben verschiebt das Arbeitsmedium, hier Luft, zwischen einem heißen und einem kalten Bereich

[Bosch 21] S.406f, [Bosch 26] S.520f; [Viebach 2002];

Anwendung

Blockheizkraftwerke mit Stirling: lichtblick.de (stromgeführt), whispergen.com (wärmegeführt), broetje.de, remeha.de, viessmann.de [Test] 05/2012

AB Stirlingmotor

Video MdNuT - Stirlingmotor

pV-Diagramm

[Bosch 21] S.371, [Bosch 26] S.484f

AB Energietechnik_Ub Gasturbine mit ausführlichen Lösungen

NP 2008/09 1 Gasturbinenanlage

[Bosch 21] S.410f, [Bosch 26] S.526f

[Baucke 1982]

– Durchtrittsflächen einer Gasturbine aus den Zustandsänderungen herleiten (V_1, V_2, \dots)

Video Flammenfresser (T.Probst)

Der Flammenfresser oder Vakuummotor ist eine atmosphärische Wärmekraftmaschine, die im 2-Takt-Verfahren arbeitet (→ 1 Arbeitstakt je KW-Umdrehung).

Flammenfresser haben einen niedrigen Wirkungsgrad, deshalb gibt es keine (kaum?) praktische Anwendungen außer dem Modellbau.

Beim pV-Diagramm des Vakuummotors tritt ein Problem zutage, dass bisher keine Rolle spielte: Rechnet man die Arbeiten w mit dem absoluten Druck oder dem relativen Druck gegen die Umgebung? Mit dem absoluten Druck bekommt man unterm Strich die gleiche Nutzarbeit w_{Nutz} heraus, aber die Arbeiten w_{23} , w_{32} und w_{31} erhalten nicht die Vorzeichen, die man erwartet. (→ Kap. Viertakt-Ottomotor)

Das ist bei Rechnung mit relativen Drücken der Fall. Hier mit fiktiven Werten:

$$w_{12} = -(-0,1 \text{ bar}) \cdot V > 0, \text{ also zugeführt}$$

$$w_{23} = -(-0,5 \text{ bar}) \cdot (-V/2) < 0, \text{ also abgeführt. } (-V, \text{ da von rechts nach links})$$

$$w_{31} = -(+0,1 \text{ bar}) \cdot (-V/2) > 0, \text{ also zugeführt. } (-V, \text{ da von rechts nach links})$$

FO Kolbendampfmaschine_pV-Diagramm

[Niedersträßer 1940] S.72; pV-Diagramm [Ludwig 1951] S.443, S.211; Verhalten von Nassdampf und überhitztem Dampf [Dubbel 11 I] S424

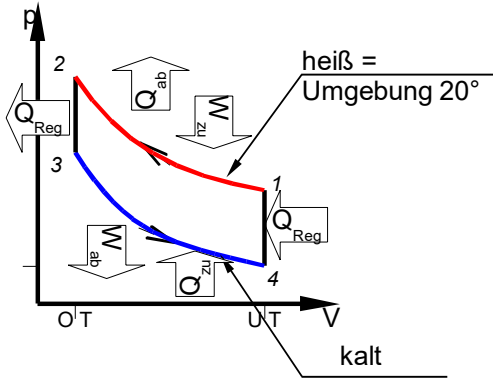
Kohlenstaubmotor → [Ludwig 1951] S.330



linksgängige Kreisprozesse

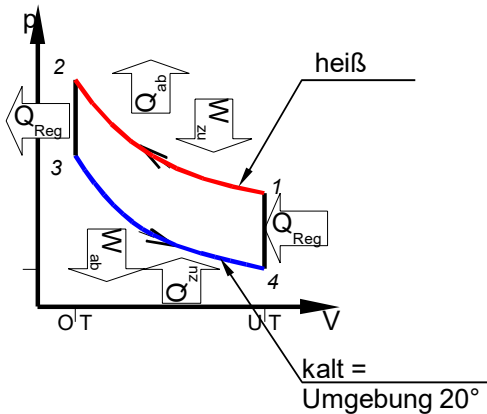
Stirling-Kältemaschine

VK läuft 90° vor AK (wie beim Stirling-Motor)



Stirling-Wärmepumpe

VK läuft 90° nach AK



Vertiefung

Fragen

Arbeitsmedium bei Stirlingmotoren

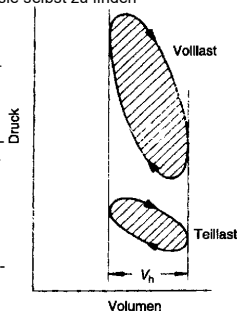
Laut Literatur sei Helium als Arbeitsmedium für Stirlingmotoren besser geeignet als Luft, und Wasserstoff noch besser, abgesehen von den evidenten Nachteilen (Explosionsgefahr, Versprödung von Stahl.) Realisierte Motoren (Whispergen) laufen mit N₂. Einen Begründung dafür habe ich noch nicht gefunden, deshalb versuche ich sie selbst zu finden

Wenn man einen Stirlingprozess für verschiedene Medien durchrechnet (Wärmekapazitäten → [Metzler 1998] S160), hängen die Werte für die zu- und abgeführten Wärme- und Arbeitsmengen nicht von Arbeitsmedium ab. Für den Motor aus HP2004/05-5 „Modell eines Stirlingmotors“ (V₁=1,8cm³, p₁=0,8bar, T₁=100C, V₂=4,5cm³, T₃=300°C, wird W_{zu} = Q_{ab} = 0,33J und W_{ab} = Q_{zu} = -0,507J).

Auffallend ist, dass die über den Regenerator ausgetauschte Wärmemengen unterschiedlich sind, wenn man mit denselben Temperaturreckpunkten rechnet. In der Realität ist es wohl umgekehrt: Die transportierten Wärmemengen bestimmen die Temperaturen.

Wahrscheinlich liegt der praktische Vorteil der leichten Gase in der Wärmeleitfähigkeit (O₂ = 0,0267 W/(m K); He=0,152; H₂ = 0,1815), die die Wärmeübertragung erleichtert. Vermutlich sind die leichten Gase wärmeleitfähiger, weil sie bei gleicher Temperatur = innere Energie = 1/2 m v² eine höhere Molekülgeschwindigkeit v haben, die die Übertragung der Wärme fördern müsste.

Nachtrag aus [Dubbel 20] P92 (von 2001): „Mit heute möglichen Erhitzertemperaturen von maximal 970 K sind effektive Wirkungsgrade von η_c = 0,36 erreichbar. Relativ hohe innere Strömungsverluste begrenzen die Motordrehzahl und erfordern ein Arbeitsmedium geringerer Dichte wie Helium (bevorzugt) oder Wasserstoff (gute thermische Eigenschaften).“



Wenn man Stirling-Maschinen ohne Wärmezufuhr mechanisch antreibt, transportieren sie Wärme. Dabei gibt es folgende Änderungen

- Die bisher „kalte“ Zone muss nicht zwangsläufig kalt sein, sondern bleibt auf dem Temperaturniveau der Umgebung.
- Die bisher „heiß“ genannte Zone wird nicht mehr beheizt (= zwangsweise auf hoher Temperatur gehalten), sondern passt jetzt ihre Temperatur dem Prozess an (variabel)

Heißluftmotor von Leybold, Reagenzglas mit Wasser statt Heizwendel, Motor.

1) *Stirling per Motor antreiben, Drehrichtung wie Stirlingmotor. Laufen lassen, Beobachtung später, derweil theoretisch überlegen*

1-2: Isotherme Verdichtung wie beim Stirlingmotor, Q wird an „Kühl“-mittel abgegeben.

2-3: VK schiebt Arbeitsmedium Richtung OT (ehemals Heizwendel, jetzt Wasser). Damit es ein linkslaufender Prozess wird, muss die Isochore nach unten verlaufen.

3-4: Das unter Druck stehende Arbeitsmedium expandiert und gibt Arbeit ab. Die dazu notwendige Energie entnimmt es zunächst der inneren Energie und mit der sinkenden Temperatur (isotherm ist eine Idealisierung) der Umgebung → Wasser im Reagenzglas gefriert.

4-1: VK schiebt das kalte Arbeitsmedium und steigert durch Wärmeabgaben seine Temperatur.

1-2: s.o.

2-3: Aus den Temperaturniveaus der Isothermen wird jetzt deutlich, dass hier der Regenerator Wärme aufnimmt vom Arbeitsmedium, das abkühlt.

2) *Beobachtung und Bestätigung: Wasser im Reagenzglas gefriert.*

Die untere Isotherme ist kalt, die obere heiß.

Anwendung

Tiefemperatur-Stirling-Kältemaschinen erreichen Temperaturen um 80 K (ca. -193°C) und werden zur Luft- oder Erdgasverflüssigung und zur Kühlung von Infrarotsensoren (Thermografiekameras, Wärmesichtgeräte, militärische Wärmesuchköpfe ..) eingesetzt.

Heißluftmotor von Leybold, Reagenzglas mit Wasser statt Heizwendel, Motor.

3) *Stirling per Motor antreiben, Drehrichtung entgegen Stirlingmotor. Laufen lassen, Beobachtung später, derweil theoretisch überlegen*

1-2: Isotherme Verdichtung wie beim Stirlingmotor, Q wird abgegeben.

2-3: VK schiebt Arbeitsmedium Richtung OT („Kühl“-Flüssigkeit) und entzieht ihm Wärme.

3-4: Das Arbeitsmedium expandiert und gibt Arbeit ab. Die notwendige Energie entnimmt es der Umgebung, deren Temperatur konstant bleibt..

4-1: VK verschiebt das Arbeitsmedium und steigert durch Wärmeabgaben seine Temperatur.

→ Diesmal wird die Wärme aus der Umgebung entnommen und die Temperatur erhöht.

4) *Beobachtung und Bestätigung: Wasser im Reagenzglas kocht.*

Anwendung

Die Phasenverschiebung des VK bestimmt, in welche Zone das Arbeitsmedium wann verschoben wird.

Wärmepumpe und Kältemaschine unterscheidet, ob Wärme von oder zur Umgebung transportiert wird.

AB Energietechnik

linksgängige Prozesse im AB ergänzen



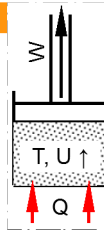
ab hier überarbeiten

Grundlagen der Thermodynamik II

Grundgedanke

Bei einem Wärmekraftprozess steigt die innere Energie U um ΔU . Bei zyklisch arbeitenden WKM muss ΔU abgeführt werden, sonst steigt U unaufhörlich.

→ Jede WKM muss gekühlt werden.



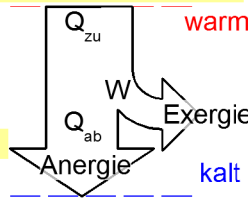
Kühlung

Wärmekraftmaschinen benötigen ein Temperaturgefälle zw. einer warmen und einer kalten Wärmequelle.

Energie und Exergie

Die zugeführte Wärmeenergie teilt sich in:

- Exergie (in mech. Arbeit nutzbar)
- Anergie (mech. nicht nutzbarer Teil der Energie).



Höhere und niedrigere Energieformen

Man nennt eine Energieform höher, wenn man mehr mech. Arbeit aus ihr herausholen kann.

Carnot-Wirkungsgrad η_c

= maximal möglicher Wirkungsgrad für eine ideal (=reversibel + reibungsfrei) arbeitende WKM

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

T_{min} Temperatur der kalten Quelle
 T_{max} Temperatur der warmen Quelle

2. Hauptsatz der Thermodynamik

Formulierung nach Carnot (1824)

Mechanische Arbeit wird nicht durch den Verbrauch von Wärme erzeugt, sondern durch ihren Transport von einem warmen zu einem kalten Körper.

Formulierung nach Kelvin

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die Wärme aus einer Wärmequelle entnimmt und vollständig in mechanische Energie umwandelt.

Formulierung nach Buchholz

- Jeder Körper enthält Entropie
- Entropie kann nur zusammen mit Wärme von einem Körper auf einen anderen übertragen werden.

Dabei gilt: $\frac{\text{übertragene Wärme}}{\text{übertragene Entropie}} = \text{Temperatur}$

- Entropie kann erhöht, aber nie verringert werden

1) Um Arbeit entnehmen zu können, muss das Gas erwärmt werden, dabei steigt seine innere Energie ΔU . Wenn die Maschine periodisch arbeiten soll, muss ΔU wieder abgeführt werden, weil sie sonst U unaufhörlich steigen oder sinken würde. Das bedeutet:

- a) Eine Wärmekraftmaschine (WKM) muss gekühlt werden.
- b) ΔU kann nicht für Arbeit genutzt werden.

Verbrennungsmotoren verlagern die Kühlung durch Gaswechsel nach außen. [Buchholz 2016] S.46 Die Energie, die ein warmer Körper enthält, heißt nicht Wärme, sondern innere Energie. Wärme ist das, was transportiert wird, wenn der warme einen kalten Körper berührt.

Man kann nicht Arbeit erzeugen, indem man nur Wärme aus dem Meer entnimmt, sondern benötigt ein kälteres Niveau. Die beiden Wärmespeicher nähern sich in ihrer Temperatur an und sind dann zur Gewinnung mechanischer Arbeit nicht mehr geeignet. Die Notwendigkeit der Kühlung kann man aus $\Delta U = 0$ bei Kreisprozessen ableiten oder aus den Überlegungen zum pV-Diagramm.

Analogien: Auch ein Wasserkraftwerkwerk nimmt potentielle Energie von einem hohen Niveau, zweigt einen Teil mechanischer Energie und entlässt den Rest der potentiellen Energie auf einem niederen Niveau, zusätzlich produziert es noch Wärme durch Verwirbelung. Ohne entsprechende Senke kann man auch nicht nutzen: Atmosphärendruck (Windkraftwerk nutzt Wind, der von Hoch- zu Tiefdruckwinden strömt), potentielle Energie des Meerwassers (wohin soll es fließen?), Elektronenüberschuss (e fließen von - nach +) ... Man stellt den Sachverhalt gewöhnlich als Sankey-Diagramm dar. Energie ist der für mech. Arbeit nicht nutzbare Anteil der inneren Energie. Exergie ist der für mech. Arbeit nutzbare Anteil..

Eine sehr hohe Energieform ist elektrische Energie, die man fast vollständig in mechanische Arbeit umwandeln kann.

Vertiefung

- 2) Ordnen Sie: chemische Energie (Kohle), Strom, mechanische Energie, Wärme höherer Temperatur, Wärme tieferer Temperatur
- 3) Wenn die Wärme nicht vollständig genutzt werden kann, stellt sich die Frage nach dem maximalen Wirkungsgrad einer Kraftmaschine.

Herleitung des Carnot-Wirkungsgrades → [Tipler 1995] S.594:

$$\eta_c = \frac{W_{nutz}}{Q_{zu}} = \frac{|Q_{zu}| - |Q_{ab}|}{Q_{zu}} = \frac{c_v \cdot m \cdot T_{max} - c_v \cdot m \cdot T_{min}}{c_v \cdot m \cdot T_{max}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Herleitung aus der Entropie S → [Buchholz 2016] S.53f:

$$S_{zu} = S_{ab} \Rightarrow \frac{Q_{zu}}{T_{zu}} = \frac{Q_{ab}}{T_{ab}} \Rightarrow Q_{ab} = Q_{zu} \cdot \left(\frac{T_{ab}}{T_{zu}}\right)$$

$$W_{nutz} = Q_{zu} - |Q_{ab}| = Q_{zu} - Q_{zu} \cdot \left(\frac{T_{ab}}{T_{zu}}\right) = Q_{zu} \cdot \left(1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}\right) \Rightarrow \eta = \frac{W_{nutz}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$$

Der Carnot-Wirkungsgrad ist der größtmögliche Wirkungsgrad, den eine Wärmekraftmaschine (WKM) erreichen kann. Er zeigt, dass WKM mit möglichst hoher Prozess- und mit möglichst niedriger Abgastemperatur arbeiten sollten.

Der Carnot-Wirkungsgrad kann nicht bei jedem Kreisprozess erreicht werden. ZB. Wird beim Dieselprozess Q_{zu} isobar zugeführt: $c_p > c_v \rightarrow \eta_{Diel} < \eta_{Carnot}$
Nicolas-Leonhard Sadi Carnot siehe Anhang

1) Jeder zyklische Wärmeprozess muss gekühlt werden ist die Erkenntnis, die zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik führt.

Wärme kann nicht vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt werden (Perpetuum mobile 2. Art).

[Carnot 1824]: „La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid.“ Carnot argumentierte auch gegen die damals noch diskutierte Phlogiston / Caloricum / Warmstoff- Theorie: „Ainsi, la Chaleur est créée par le mouvement. Si elle est une matière, il faut admettre que la matière est créée par le mouvement.“ zitiert aus [Tyndall 1894] S.XXII.

Die Entstehung von Wärme aus Bewegung wurde von Rumford untersucht.

Formulierung von 1851 nach William Thomson (1824 – 1907, seit 1892 Lord Kelvin). [Hütte 29] B76 schreibt diese Formulierung Carnot zu.

Video: <http://www.youtube.com/watch?v=z64PJwXy--8> „Entropie – ScienceSlam Finale – Von Kühltürmen und der Unumkehrbarkeit der Dinge“ von Martin Buchholz

Je höher die Temperatur ist, desto geringer ist der Anteil der Entropie je Wärmemenge. In WKM wird Wärme in mechanische Energie umgewandelt. Aus der Brennkammer wird wenig Entropie pro Energie transportiert, weil das Prozessgas eine hohe Temperatur hat. In der Turbine wird (Wärme-)Energie (Exergie) in Arbeit umgewandelt, dabei bleibt die Entropie im Prozessgas zurück. Das Prozessgas mit niedriger Temperatur enthält dann viel Entropie pro Energie, die beide im Kühlturm abgeführt werden. Ohne Kühlung würde sich die Entropie im Kraftwerk anreichern.

[Buchholz 2016] S.28 zum 'Energieverbrauch': „Das sei wie mit dem Bier in [der] Hand. Wenn [man] davon tränke, dann sei das Bier .. [im] Bauch. Aber in der Summe sei genauso viel Bier da wie vorher.“



Vertiefung

- 1) Wie groß ist der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors bei der Verbrennungstemperatur $T_{z1}=2500^{\circ}\text{C}$ und der Abgastemperatur $T_{ab}=500^{\circ}\text{C}$?

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{(273 + 500) \text{ K}}{(273 + 2500) \text{ K}} = 72\%$$

Real: Diesel bis 50% (stationär) bzw. bis 40% (mobil), Otto bis 33%

- 2) Wie groß ist der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad eines Dampfkraftwerkes bei einer Dampftemperatur vor der Turbine $T_{z1}=600^{\circ}\text{C}$ und nach der Turbine $T_{ab}=40^{\circ}\text{C}$?

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{(273 + 40) \text{ K}}{(273 + 600) \text{ K}} = 64\%$$

[Wagner 1990] S.85: Typische Wirkungsgrade

- 1) Aktuell (2007) wollen EVU den Wirkungsgrad ihrer Kraftwerke nicht auf die ganze eingesetzte Wärmemenge, sondern nur deren Exergieanteil beziehen, weil die Anergie sowieso nicht nutzbar sei. Wie beurteilen Sie dies?
a) Beschönigt die reale Ineffizienz der Stromerzeugung in Wärmekraftwerken, mit Auswirkungen auf CO₂-Diskussion.
b) Nimmt einen Anreiz, den Exergieanteil und damit den realen Wirkungsgrad durch höhere Prozesstemperaturen zu steigern und den CO₂-Ausstoß zu verringern. Dies würde die EVU viel Geld für Investitionen kosten.
- 4) Wasserstoff wird als Energieträger der Zukunft gepriesen. Er kann in Verbrennungsmotoren in mechanische Energie umgewandelt oder in Brennstoffzellen verstromt werden. Welches Verfahren empfehlen Sie?
Brennstoffzellen unterliegen nicht dem Carnotwirkungsgrad für Wärmekraftmaschinen, sie können bei niedriger Temperatur schon höhere Wirkungsgrade erzielen, z.B. H₂ bei 25° theoretisch bis 94%. In der Praxis liegen die Wirkungsgrade bei unter 40% (1kW) bis über 60% (1MW).

Energie_TA_Thermodynamik-2.odt

Seitenumbruch

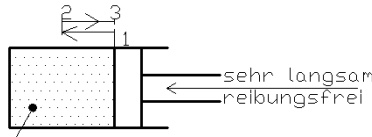


Konsequenzen aus dem 2.HS

Mit dem Carnot'schem Wirkungsgrad liefert eine WKM gerade genügend Energie, um eine Wärmepumpe anzutreiben, die die Wärme spurlos (!) zurückpumpt.

Reversibler Prozess

= quasistatischer Prozess = vollständig umkehrbar



Temperatur T und innere Energie U bleiben konstant.

$$\Delta S = \frac{Q_{rev}}{T} = k \cdot \ln W$$

Entropie S bleibt konstant.

Dieser Prozess ist vollständig umkehrbar (= reversibel). Beim sehr langsamen (quasistatischen) Einfahren des Kolbens von 1 auf 2 werden die Moleküle des Arbeitsgases nicht beschleunigt, deshalb steigen weder Temperatur T noch innere Energie U. Der Druck steigt, weil die Moleküle des Gases im eingeengten Raum häufiger gegen die Zylinderwand stoßen. Ein Prozess heißt reversibel, wenn er rückgängig gemacht werden kann, ohne dass irgendwo eine Änderung zurückbleibt ($\Delta S=0$).

Reale Prozesse

sind immer irreversibel und erzeugen immer Wärme auf Kosten der mechanischen Arbeit.

Folgen

- Energieformen sind nicht gleichwertig.
- Energie strebt zu Wärme mit niedriger Temperatur
- Die Richtung der Zeit

Die Entropie S steigt bei jedem irreversiblen Vorgang, also jedem realen.

Entropie S

Vorüberlegung

Gas leer



Beispiele:
rote / grüne Farbe
 O_2 / N_2
heiß / kalt



Gase, Wärme, Farbe .. verteilen sich gleichmäßig = streben zur Unordnung.

**Der umgekehrte Vorgang wurde noch nie beobachtet !
Die Umkehrung erfordert Energiezufuhr !**

Regeln für Entropie

- Jeder Körper enthält Entropie
- Entropie wird nur zusammen mit Wärme übertragen:

$$\text{übertragene Entropie} = \frac{\text{übertragene Wärme}}{\text{Temperatur}} = T = \frac{\Delta q}{\Delta S}$$

- Entropie kann produziert, aber nicht vernichtet werden

Definition

Ist ein Maß für Wahrscheinlichkeit eines Zustandes
Sie steigt ständig: $\Delta S > 0$

andere Formulierungen des 2. HS

Die Wärmemenge im Universum steigt unaufhörlich bis zum Wärmetod.

Mech. Arbeit (und jede andere Energieform) kann man vollständig in Wärme wandeln, aber nicht umgekehrt

Um die Unordnung in Ordnung zu verwandeln, muss Energie von außen zugeführt werden. Das bedeutet, dass kein Vorgang spurlos verläuft.

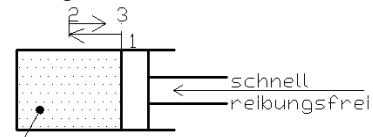
3. Hauptsatz der Thermodynamik

= Satz von Nernst: Bei Annäherung der Temperatur an den absoluten Nullpunkt wird die Entropie konstant -> der absolute Nullpunkt kann nicht erreicht werden.

- 1) Der 2.HS nach Carnot sagt zunächst „nur“ aus, dass Wärme nicht vollständig in mech. Arbeit umgewandelt werden kann. Ist das spektakulär?

irreversibler Prozess

= nicht vollständig umkehrbar



Temperatur T und innere Energie U steigen

Druckspitze einzeichnen

Entropie S steigt.

Die Moleküle werden vom einfahrenden Kolben angestoßen und beschleunigt, T und U steigen, mechanische E. wird in innere Energie ΔU umgewandelt, was nicht vollständig umkehrbar ist (Annergie)= irreversibel, $\Delta S > 0$. Vor dem Kolben baut sich eine Druckspitze auf, sodass er gegen mehr Druck arbeiten muss, als ihn später wieder hinaus drückt. Unter Druck sinkt die potentielle Energie der Moleküle (gegenseitige Anziehung), dadurch wird zusätzlich Wärme erzeugt (ohne Reibung). Da reale Prozesse irreversibel sind, gibt es keine spurlosen Vorgänge.

[Kluge 1994] S.80: „Bei irreversibler Prozessführung ist der Wirkungsgrad immer kleiner als bei reversibler Prozessführung“

- 2) Reale Prozesse sind immer irreversibel, da nicht unendlich langsam.

Die allmähliche Umwandlung aller Arbeit in Wärme findet auch ohne Reibung statt.

- 3) „Wärmetod des Universums“ ist eine plakative Formulierung des 2.HS.

Wärme ist die kinetische Energie von Teilchen, also auch mechanische Energie auf molekularer Ebene. Wärme kann aber nicht vollständig in mechanischer Arbeit auf makroskopischer Ebene umgewandelt werden. Welches ist der Unterschied? Wärme ist ungerichtete Bewegung, mechanische Arbeit ist gerichtete Bewegung, also Unordnung und Ordnung. Entropie ist eine Begleiterscheinung von Wärme; elektrischer Strom oder eine drehende Welle transportieren keine Entropie.

- 4) Ulg: Was hat die Entropie mit dem 2.HS zu tun?

[Bangert 2004]: „Bei reversiblen Zustandsänderungen in einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtentropie konstant. Bei irreversiblen Z.-änderungen nimmt die Gesamtentropie .. stets zu.“

Entropie ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes. Je wahrscheinlicher, desto höher ist seine Entropie. Wahrscheinlich ist, dass sich Farben / Gasmoleküle / Wärme gleichmäßig verteilen. Meist ist die wahrscheinliche Anordnung die gleichmäßige Verteilung, die man umgangssprachlich Unordnung nennt. Es gibt aber auch Entropiezuwachs beim Übergang in regelmäßige Anordnungen, z.B. Kristall- oder Membranbildung. Die steigende Unordnung (=gleichmäßigere Verteilung) in einem Kinderzimmer kann als zwangsläufige Folge des 2. HS dargestellt werden (-): Die schlechte Nachricht für deren Bewohner ist, dass die ursprüngliche Ordnung theoretisch und praktisch wieder hergestellt werden kann, wenn man Energie von außen zuführt, wobei es physikalisch unerheblich ist, ob es sich um die Energie von Mutter oder Kind handelt.

Weitere Beispiel: lose Briefmarken auf dem Tisch streben zum niedrigsten Energieniveau. grch.: entrepo = umkehren

Beispielrechnung für Entropiesteigerung mit Ordnung siehe Wikipedia; Formel für Entropie

[Global 2000] S.482 verwendet den Begriff „Entropie“ für Lagerstätten von Rohstoffen: Konzentrierte Lagerstätten haben eine relativ niedrige Entropie und niedrige Produktionskosten; ärmere Lagerstätten haben eine hohe Entropie und hohe Kosten.

[Global 2000] S.483 „Viele dieser Dinge eignen sich nicht einmal für das Recycling, weil sie Produkte von so hoher Entropie sind.“

Ein Gas hoher Temperatur hat bei gleicher Energiemenge weniger Moleküle als ein Gas geringerer Temperatur -> es gibt weniger Möglichkeiten, die Moleküle anzuordnen -> Entropie. Verhältnis der Entropie -> Verhältnis der Molekültzahlen -> Boltzmann $S = \ln$ Vergeleiche Münzen im Geldbeutel.

Video: <http://www.youtube.com/watch?v=z64PJwXy-8> „Entropie – ScienceSlam Finale – Von Kühltürmen und der Unumkehrbarkeit der Dinge“ von Martin Buchholz

Passende Unterrichtsplanung von Klaus-Dieter Grüninger:

http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/entropie

ΔS wird schon von Carnot definiert, erst Ludwig Boltzmann führt Entropie auf die statistische Gasdynamik zurück:

$$S = k_B \cdot \ln \Omega = \int \frac{V_2}{V_1} dx$$

- x=?
- k_B = Boltzmannkonstante (Naturkonstante)
- Ω = Anzahl möglicher Zustände (Permutationen?)

„Dass die Natur solche Minima der potenziellen Energie liebt, ist kein eigenes Naturgesetz, sondern eine Folge des Prinzips von der Nichtabnahme der Entropie (II. Hauptsatz): Wenn die Energie die Gelegenheit hat, sich weiträumig zu verkrümmeln, so tut sie das und kommt durch Zufall kaum wieder zurück. Sie hinterlässt dabei stabile Gleichgewichte, und ohne solche Reibungsprozesse gäbe es überall nur ewiges Schwingen und Zappeln.“ Prof. Norbert Treitz in [SdW]10/2004, S. 109.

Der zweite Hauptsatz sagt mit Hilfe des Entropiebegriffes etwas über die Richtung von Zustandsänderungen aus. Nach dem 1. HS sind Wärme und Arbeit gleichwertige Energieformen, erst der 2. HS gibt die Richtung von Energieumwandlung vor. Es handelt sich um das einzige physikalische Gesetz, bei dem die Zeit nur in eine Richtung laufen kann.

Eine Maschine hinterlässt immer Spuren, da das Kältereservoir erwärmt wird. Dies kann nur mit neuem Energieaufwand und Entropiesteigerung an anderer Stelle rückgängig gemacht werden.

Welchen Sinn macht rezyklieren (s.u.)? Kein irreversibler Vorgang kann spurlos rückgängig gemacht werden

nicht unterrichten

Walter Hermann Nernst, 1864-1941, Nobelpreis für Chemie 1921; [Hering 1992] S.140



0. Hauptsatz der Thermodynamik

Befinden sich zwei Körper im thermischen Gleichgewicht mit einem dritten, so stehen sie auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

nicht unterrichten

[Tipler 1995] S.510; Der 0. Hauptsatz wurde wohl zunächst als selbstverständlich vorausgesetzt und erst nachträglich eindeutig definiert, deshalb die seltsame Nummerierung.

Energie_TA_Thermodynamik-2.odt

Seitenumbruch

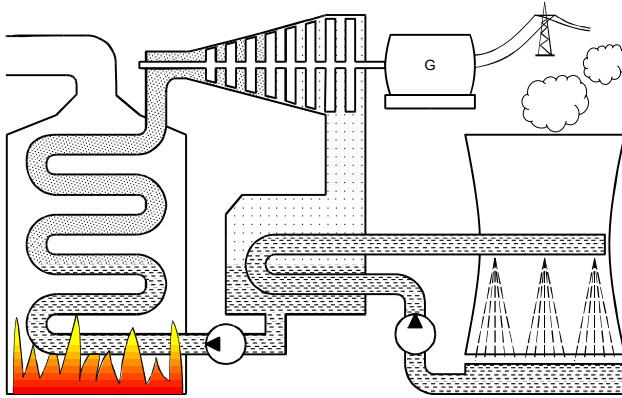


Prozesse mit realen Fluiden

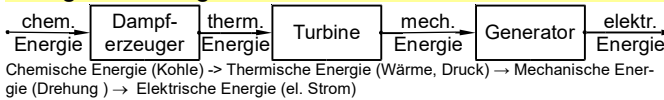
Dampfprozesse (mit realen Fluiden)

WärmeKraftwerk

Schematische Darstellung



Energiewandlung in Blockschaltbildern



Rankine-Prozesse (OCR)

Wärmepumpen

Wärmepumpe

transportiert die Wärme aus der Umgebung auf höheres Niveau -> Stirling-Kältemaschine

Kältemaschine

transportiert Wärme zur Umgebung und kühlt damit die Quelle -> Stirling-Wärmepumpe

(Ad-)Sorptionskältemaschine

Absorptionskältemaschinen

Ausbauen

Klimaanlage

Kältemittel

Fluorkohlenwasserstoff FCKW

-> ungiftig
 - zerstört Ozonschicht
 War früher üblich für Kühlschränke und Klimaanlage wegen seiner Ungiftigkeit (Mein Prof ließ in der Vorlesung seinen Assistenten einen Schluck nehmen). Erst später stellte sich heraus, dass FCKW die Ozonschicht zerstört.

R744 Kohlendioxid CO₂

- sehr billig, GWP = 1
 - Kühlschränke, Klimaanlage von Pkw und Bussen (statt R134a)
 - benötigt höhere Drücke und mehr Energie als Anlagen mit R134a -> teurer
 - CO₂-Klimaanlagen können auch als Wärmepumpen laufen und den Innenraum von E-Mobilen stromsparsam heizen [Buchholz 2016]S.109

R227es Heptafluorpropan

Geschichte

1/2009 kostet Steinkohle etwa 91€/t

1) Ein HP 1999/00-3 Wärmekraftwerk

[Schuberth 2000] S.106: Schematische Darstellung eines Kohlekraftwerkes

Beschriftung ergänzen

Kohle wird gefördert, zum Kraftwerk transportiert und aufbereitet (getrocknet, gemahlen, gereinigt...). Kohle verbrennt im Heizkessel und setzt Wärme frei. Wasser wird auf Druck gebracht und anschließend im Dampferzeuger verdampft -> erhebliche Volumenvergrößerung des Dampfes. Dampf wird auf Umgebungsdruck entspannt, durch das Druckgefälle strömt er. Die Dampfströmung wird in einer Turbine in Drehbewegung umgewandelt. Im Generator wird ein Magnetfeld relativ zu einem elektrischen Leiter (Spule) bewegt, dadurch entsteht in der Spule ein elektrischer Strom. Dieser fließt durch Leitung zu den Verbrauchern und kann dort relativ verlustfrei in jede andere Energieform umgewandelt werden..

2) Ist die Energie, die man zum Erhitzen des Wassers aus Siedetemperatur benötigt, nicht verloren?

- nach Ts-Diagramm bringt gerade dieser steile Anstieg den höchsten Gewinn an Temperatur ohne große Zunahme der Entropie. Vergleicht man z.B. die Erwärmung bei einer Zwischenüberhitzung, die ja auf einer Isobaren in der Gasphase stattfindet, ist der Anstieg der Entropie deutlich größer, d.h. es muss vergleichsweise mehr Abwärme abgeführt werden.

3) Warum muss der Wasserdampf kondensiert werden?

- man kann den Wasserdampf zwar weiter ausnutzen (-> Zwischenüberhitzung), kommt dann aber in den Bereich immer kleinere Drücke, wo relativ viel Abwärme abgeführt werden muss
 - auch Frischwasser ist möglich -> Wasserverbrauch (Atomgetriebene U-Boote)
 - $W = \int p dv$: Die Arbeit, um ein Fluid von Druck a nach b zu pumpen, hängt von der Volumenänderung ab. Flüssiges Wasser braucht dazu wenig Energie, aber bei Wasserdampf bräuchte man dieselbe Energie, die man eben in der Turbine gewonnen hat. Sonst wäre es auch nicht sinnvoll, hinter der Turbine einen Unterdruck zu erzeugen

4) Schematische Darstellung des Wärmekraftwerkes reicht aus.

[Dubbel 13 II] S.460ff
 [Dubbel 20] S.D.17ff und L18ff

Heizkessel, Verluste ergänzen

Beim Organic Rankine Cycle werden Dampfturbinen mit anderen Medien betrieben als Wasser. Anwendung zB. bei niedrigem Temperaturgefälle, z.B. Geothermie

Kühlmittel 134a: [Dubbel 20] D40, TabBKfz

[Bosch 26]: Kühlmittel ab 2011

[Baehr 1973]: S.307ff: Ts-Diagramm

Expansionsventil -> Wegwerffeuerzeug
 mot 11/2009, 12/2008, 9/2001: CO₂ als Kältemittel

Sorptionskältemaschinen nutzen wie Kompressionskältemaschinen den Phasenwechsel eines Kältemittels. Der Phasenwechsel wird unterstützt durch die Sorption des Kältemittels (z.B. Wasser) in einem feinporigen Feststoff (Aktiv-Kohle, Zeolithe, Silikagel). Das kann bei niedrigen, aber konstantem Druck (kein mechanischer Antrieb, geschlossener Behälter) funktionieren, Adsorption und Desorption wird dann nur durch die Änderung der Temperatur des Sorptionsmittels gesteuert (diskontinuierlich).

Beispiel: Sonnenstrahlen desorbieren und Verdampfen das Kühlmittel, auf der Kondensatorseite wird Wärme entzogen und gekühlt.

Funktionieren scheinbar so ähnlich wie Sorptionskältemaschinen, allerdings nicht mit einem festen Lösemittel, sondern einem flüssigen, z.B. Wasser als Kältemittel und Schwefelsäure als Sorptionsmittel. Das flüssige Mittel kann gepumpt werden und ermöglicht einen kontinuierlichen Prozess.

GWP = Global Warming Potential

R134a Tetrafluormethan

- GWP 1430
 - Treibgas in Asthmasprays
 - Ätzgase für Wafer (geben Fluor ab)
 R134a ersetzt FCKW, das die Ozonschicht zerstört, und wurde in allen Pkw-Klimaanlagen verwendet. Da es aber eine starke Treibhauswirkung hat, dürfen Pkw-Klimaanlagen mit GWP>150 (R134a) ab 2011 nicht mehr in Pkw-Neukonstruktionen und ab 2017 gar nicht mehr verkauft werden. Als Nachfolger wurden zunächst Propan oder CO₂ geplant, aber 2011 schwenkten die Automobilhersteller kurzfristig um auch R1234yf, für das die Klimaanlagen nicht so stark verändert werden müssen. CO₂-Anlagen arbeiten bei höheren Drücken.

R1234yf Tetrafluormethan, FKW

- GWP: 4
 - bildet ab 405°C hochgiftige Fluorwasserstoffe
 Nachdem als Nachfolger für R134 zunächst R744 (CO₂) geplant war, schwenkten die Automobilhersteller 2011 kurzfristig auf R1234yf um, weil dafür die Modifikationen an den Klimaanlagen und damit die Kosten geringer sind. Nachteilig ist, dass bei Fahrzeugbränden giftige Gase entstehen können. Ca. 2012 hat Mercedes die Reißleine gezogen, nicht auf R1234yf umgestellt und damit gegen zwingende EU-Vorschriften verstoßen. Nach anfänglichen Problemen mit Exporten nach Frankreich wird diese Haltung momentan geduldet, der weitere Verlauf ist offen (2014).

Problem der Fälschung: Bereits für R134a waren gefährliche Fälschungen auf dem Markt. Beim 5x teureren R1234yf ist das noch stärker zu erwarten.

Butan

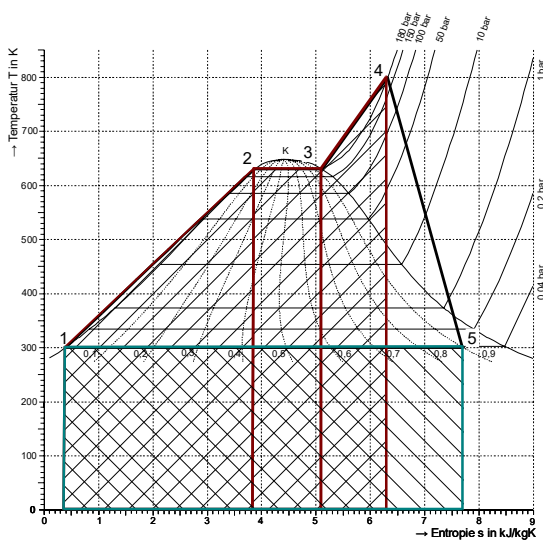
Gegenüberstellung der Wärmekraftmaschinen von Papin, Newcomen und Watt -> Thermodynamik I - TU München - Sandner.pdf



Dampfprozess (theoretisch)

T,s-Diagramm

links flüssig, rechts gasförmig, dazwischen Übergang mit Perzentilen des Gasanteiles
Über dem kritischen Punkt ändert sich die Dichte kontinuierlich mit der Temperatur (kein Dichtesprung), deshalb kann man Gas von Flüssigkeit nicht abgrenzen.
Festes Wasser spielt keine Rolle und wird nicht betrachtet (links neben flüssig)



- Speisewasserpumpe → 180 bar
 - 1 – 2: Wasser wird erhitzt, bleibt wg. Druck flüssig
 - 2 – 3: Wasser verdampft bei konstanter Temperatur
 - 3 – 4: Wasserdampf wird weiter erhitzt (überhitzt bei konstantem Druck)
- Höhere Temperatur steigert den Carnot'schen Wirkungsgrad, ist aber nach oben durch die Werkstoffe begrenzt. Üblich sind ca. 550 – 600°C.
- 4 – 5: Wasserdampf gibt in Turbine mech. Energie ab ca. 10% des Wasserdampfes kondensiert
 - 5 – 1: Wärmeabfuhr → Wasser kondensiert

Zwischenüberhitzung

Zweck:

- Wassergehalt in der Turbine verringern
- Therm. Wirkungsgrad erhöhen (nur bei Z. mit hohen Temperaturen)

Vorgang

- Expansion wird vor der Taulinie unterbrochen und Dampf nochmals erhitzt

Wärme im T,s-Diagramm

Wärmeänderungen berechnet mit

$$q = T \cdot \Delta s$$

- q: spezifisch Wärmeänderung $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$
spezifisch = auf die Masse bezogen
- T: Temperatur in [K]
- s: Entropie $\left[\frac{kJ}{kgK} \right]$

Gilt nur für reversible Prozesse !

- = Entropie wird durch Temperaturänderung geändert.
- Gilt nicht in der Turbine (4 – 5), weil dort
 - keine Wärme zu- bzw. abgeführt wird
 - Temperatur sinkt wegen Abgabe von Arbeit
 - die Entropie steigt durch mechanische Verwirbelung

Vertiefung

- Hier ist das pV-Diagramm nicht geeignet, da bei Dampfprozessen das Medium den Aggregatzustand wechselt.
- Wasserdampfprozess wird im T,s-Diagramm dargestellt. Ähnelt einer Projektion des pV-Diagramms auf T,s-Diagramme: [GrundwissenIng8] S.663:

HP 1999/03 Wärmekraftwerk

FO, AB T,s-Diagramm von Wasserdampf

Moderne Kraftwerke fahren überkritisch bei 700°C → [VDI] 23/2010

- Der ganze Wasserkreislauf ist abgeschlossen und steht zwischen Pumpe und Turbine unter einem konstanten Druck von typisch ca. 180 bar. (abgesehen von Drosselverlusten). Bei kontinuierlichen Prozessen ist dies nicht anders möglich. Nur bei diskontinuierlichen Prozessen (Dampfkochtopf), kann der Druck durch Temperatursteigerung erhöht werden.
- 1-2) Tatsächlich verläuft die Kurve etwas über der Siedelinie, weil der Druck steigt, bevor die Temperatur bis an die Siedelinie gefahren wird. (siehe pV-Diagramm bei höherem Druck)
- 2-3) Je mehr Wärme zugeführt wird, desto mehr Wasser verdampft (Erinnerung an Haltepunkte von Abkühlungskurven)
- 3-4) Die Überhitzung trocknet den Nassdampf. Warum leistet heißer Dampf mehr Arbeit als kalter Dampf mit demselben Druck? Druck heißt höhere Dichte, d.h. mehr Moleküle treffen auf den Kolben / die Schaufel. Temperatur heißt schnellere Moleküle, d.h., sie übertragen mehr Impuls. Hochwärmefeste Werkstoffe ermöglichen zwar höhere Temperaturen mit höheren Wirkungsgraden, sind aber sehr teuer und werden gerne eingespart (mit mehr Kohle und CO₂ ..).
- 4-5) In der Turbine findet kein Wärmeaustausch statt, die zusätzliche Entropie entsteht durch Reibung bzw. mechanische Verwirbelung (nicht reversibler Prozess). Deshalb darf die Fläche 4-5-e-d nicht bei der Berechnung der Energiebilanz berücksichtigt werden. Dagegen muss die ganze Fläche 1-5-e-a unter 300K berücksichtigt werden, da auch die mechanisch erzeugte Entropie durch Kühlung abgeführt werden muss. [Baehr 1973] S.389: Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades siehe: Der Wassergehalt im Dampf sollte größer werden, um die Energie des Wasserdampfes besser auszunutzen (weniger Energie unter der 300K-Linie), aber hoher Wassergehalt schädigt die Turbinenschaufeln. Aus der Turbine tritt das Wasser mit ca. 30°C aus. Damit es bei dieser Temperatur gasförmig bleibt, wird hinter der Turbine ein Unterdruck von ca. 0,04 bar (absolut) erzeugt. Man würde die Temperatur gerne senken, aber dann kann der Abdampf nicht mehr gegen die Umwelt abgekühlt werden.
- 5-1) Die nicht nutzbare Anergie muss durch Kühlung abgeführt werden. Dabei wird die Entropie nicht weniger, wird aber aus dem Wasserdampf an die Umwelt abgegeben.

Moderne Kraftwerke können überkritisch fahren, d.h. über 221 bar (LFB EnBw 01/2010).

Verlauf einer überkritischen Erhitzung → [Baehr 1973] S.186, S.380ff

Kritischer Punkt bei T = 374,2°C = 647,4 K und p = 22120 Pa = 221 bar. Überkritisches Wasser ist chem. aggressiv, man versucht, schwer abbaubare Chemikalien (Dioxine usw.) damit zu spalten. Da es überkritisch keinen Dichteunterschied in Kesseln gibt, benötigen sie einen Zwangsumlauf. [Wiki Wasserdampf]

Energie_TA_Dampfprozesse.odt

[Cerbe 2008] S. 253f: „Bei einer Expansion auf sehr niedrige Drücke wird häufig im Nassdampfgebiet ein Zustandsbereich mit zu hohem Wassergehalt im Dampf erreicht. Dieser Zustandsbereich kann vermieden werden, wenn die Expansion oberhalb der Taulinie unterbrochen und der Dampf .. in einen Überhitzer geführt wird. .. Bei weniger hohen Zwischenüberhitzungstemperaturen fällt der thermische Wirkungsgrad, er steigt dagegen bei hohen Temperaturen.“

Darstellung im Ts-Diagramm

Warum kann Wasserdampf nach einer Teilexpansion von 180bar / 800K nur auf 50 bar / 800 K zwischenüberhitzt werden und nicht wieder auf 180 bar? Wie hängt dies mit der Entropie zusammen? Erklärung (?): Die Fläche unter der Zwischenüberhitzung markiert nicht den Energieinhalt, sondern den Energiebedarf, um von T1 auf T2 zu erwärmen.

- Im pV-Diagramm wurde die Wärme über die Zustände mit unterschiedlichen Formeln abhängig von der Art der Zustandsänderung ermittelt. Dies ist im Ts-Diagramm einfacher, da es nur eine Formel gibt.

HP 1999/2000-3 Wärmekraftwerk

Eintragen im T,s-Diagramm

Aufg. 3.1: q_{zu} , q_{ab}

Aufg. 3.2: W_{nutz} , η_{therm}

Energie_TA_Dampfprozesse_theoretisch.odt

eitenumbruch



Sonstiges

Energiewirtschaft

Möglichkeiten der Energieumwandlung

Begriffe

Grund-, Mittel-, Spitzenlast

Zuordnung der Kraftwerkstypen

- nach Energiezufuhr
- nach Ab-/Anschaltdauer

Stromnetz

mech., chem., elektr., elektromagn., Kern., Wärme
Energieverbrauch im techn. Sinne meint Umwandlung
von hochwertiger Energie in Wärme

Höhere und niedere Energieformen

Man nennt eine Energieform höher, wenn man mehr
mech. Arbeit aus ihr herausholen kann.
Energieverbrauch im techn. Sinne meint Umwandlung
von 'höherer' in 'niedere' Energieformen

mech., chem., elektr., elektromagn., Kern., Wärme

Energieflussdiagramme für Deutschland

<http://de.wikipedia.org/wiki/Energiefluss-Diagramm>

Quelle: [Kalide 1989]

Da elektrische Energie nur schwer gespeichert werden kann, muss Strom im Moment des Bedarfs produziert werden. Wenn im Betrieb die Last plötzlich steigt, weil Verbraucher zusätzliche Geräte einschalten, sinkt der (Last-)Widerstand, dadurch steigt der Strom(-bedarf). Dieser bewirkt im Generator ein größeres Magnetfeld, das ein größeres Antriebsdrehmoment und einen größeren Wasserdampfdurchsatz erforderlich macht. Da dieser nicht beliebig schnell erhöht werden kann, haben Kraftwerke Reserven, d.h. sie produzieren überschüssigen Strom, der Lastspitzen auffangen kann. Aber auch ohne Lastspitze muss der überschüssige Strom verbraucht werden, deshalb wird er an Ort und Stelle in Widerständen „verbraten“.

Wenn ein Generator einen Lastanstieg nicht bedienen kann, sinkt seine Drehzahl und damit auch die Frequenz des Stromes. In einem Verbundnetz müssen die Generatoren im Gleichtakt produzieren, um sich nicht gegenseitig zu stören, in der Praxis sind nur kleine Phasenabweichungen erlaubt. Überschreiten einzelne Generatoren die Grenzwerte, müssen sie vom Netz genommen werden. Die mögliche Kettenreaktion kann Stromverbünde großflächig zusammenbrechen lassen, wenn keine Reserven verfügbar sind (New York, Toronto, 2003) oder wegen begrenzter Leitungen nicht zugeführt werden können (Italien 2003, für das nicht genügend Strom durch die Alpen geliefert werden konnte).

Für Lastspitzen, d.h. schnelle Steigerungen des Strombedarfs, verwendet man Kraftwerkstypen, die schnell hoch gefahren werden können, z.B. Gasturbinen.

Bei plötzlichen Lastsenkungen würden die Generatoren beschleunigt, als schnelle Gegenmaßnahme wird der Strom direkt vor Ort „verbraten“.

Strom kann kaum gespeichert werden, deshalb muss er in dem Zeitpunkt produziert werden, in dem er verbraucht wird. Bisher wurde diese Übereinstimmung ausschließlich angebotsseitig gesteuert, ohne Rücksicht auf Wirkungsgrade. Dies wird schwieriger mit der zunehmenden Nutzung von Wind- und Solarenergie, die stark schwanken können. Um Angebot und Nachfrage besser anpassen zu können, wären technisch gesehen zwei Maßnahmen nötig:

- Steuerung der Nachfrage variable Preise für Endkunden. Dafür sind intelligente Zähler nötig und ggf. Geräte, die sich von Preisen steuern lassen (Waschmaschine springt an, wenn der Nachtstrom sehr billig ist...). Nach Energiewirtschaftsgesetz (ENWG) sollen Energieversorger ab etwa 2010 last- und tageszeitabhängige Tarife anbieten, aber nur, wenn es „technisch und wirtschaftlich zumutbar ist“. Da Kohlekraftwerke und noch mehr alte (Kern-)kraftwerke sichere hohe Gewinne bieten, ist abzusehen, dass moderne Technik noch lange als „unwirtschaftlich“ deklariert werden wird. Für Energieversorger mag das sogar stimmen, aber volks- und umweltwirtschaftlich sicher nicht.
- Speicher: Die derzeitige Diskussion, Akkus von E-Mobilen als Speicher zu nutzen, ist typisch insofern, als hier Zukunftsmusik als Placebo dient (vgl.: CO₂-Speicherung). Wenn man wollte, könnte man andere Speicher schneller nutzen, z.B. Kühlhäuser: Sie verbrauchen relativ viel Strom, können aber Phasen mangelnden Windstromes überbrücken, wenn sie vorher ein paar Grad tiefer gekühlt werden und sozusagen Kälte speichern.
- [BadZtg]. 01.07.2013: "Die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber haben erstmalig Firmen unter Vertrag genommen, die über abschaltbare Stromverbraucher verfügen. [ab heute] .. können Netzbetreiber nun flexible industrielle Lasten bei Bedarf abschalten – ein symbolträchtiger erster Schritt in Richtung des vielzitierten intelligenten Netzes. .. werden die Übertragungsnetzbetreiber, die für die bundesweite Netzstabilität zuständig sind, die abschaltbaren Leistungen monatlich im Rahmen einer Aktion ausschreiben. Daran teilnehmen können Firmen, die mindestens 50 Megawatt an spontan regelbarer Leistung anzubieten haben. Die Unternehmen erhalten .. eine Vergütung für die .. Flexibilität [und] .. eine Entschädigung, sofern ihre Maschinen tatsächlich aberegelt werden. .. In metallurgischen Prozessen, bei Elektrolysen oder in der Zementindustrie ist solche Flexibilität mitunter gegeben. Für Juli sind .. 247 MW an 'sofort abschaltbaren' [=in 1 s] .. und 332 MW an 'schnell abschaltbaren' [= in 15 min] Lasten .. unter Vertrag genommen .."

Eine sehr hohe Energieform ist elektrische Energie, die man fast vollständig in mechanische Arbeit umwandeln kann.

Vertiefung

- 4) Ordnen Sie: chemische Energie (Kohle), Strom, mechanische Energie, Wärme höherer Temperatur, Wärme tieferer Temperatur

Vgl. Wasserverbrauch: Wasser wird auch nicht verbraucht, sondern in minderwertiges Abwasser umgewandelt.

Energie_TA_Wirtschaft.odt



Energie sparen

[Lovins 1977]

Auszug aus einem Artikel von Fritz Vorholz in DIE ZEIT 28/2011: <Zitat>

Ihr wollt gar nicht sparen!

»Wir müssen energieeffizienter wirtschaften und leben«, sagt der Grüne. Antwort der Schwarze: »Klar, das müssen wir - und außerdem müssen wir Kraftwerke bauen, wenn nicht Atomkraftwerke, dann eben jetzt Kohlekraftwerke.« - »Quatsch«, sagt der Grüne, »wir machen das mit Windrädern...«

Und schon wird darüber diskutiert, wie mehr Energie zu beschaffen ist – statt übers Sparen, diese »Geschichte verpasster Chancen«, wie nun nicht etwa ein altvorderer Grüner schreibt, sondern die neue Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz.

Effizienzpolitik ist so sperrig, weil sie es nicht mit zwei oder zwanzig, sondern mit Hunderten von Produkten zu tun hat. Mit Pumpen, Lüftern und Motoren, mit Boilern und Lampen, mit Wohnhäusern, Bürogebäuden und Fabriken, mit Steckdosen und Ventilen, mit Waschmaschinen und Fernsehgeräten, mit Autos und mit Kraftwerken. Und so weiter.

Nahezu jedes Ding kommt auch mit weniger Energie zurecht. Jedes, genau das ist das Problem. Windräder sind Leuchttürme des grünen Stroms – aber was sind Leuchttürme der Energieeffizienz?

Hinzu kommt: Effizienzpolitik lässt etwas verschwinden, was vorher da war, ein Kraftwerk zum Beispiel oder einen Tanklastwagen, der seltener zum Auffüllen der Ölvorräte im Heizungskeller vorfahren muss. Verschwundenes ist aber untauglich als Beleg für Erfolg. Stattdessen wecken die Kämpfer für Effizienz noch neue Ängste. Weniger Energie? Da muss das Bier doch warm und die Stube kalt bleiben. Rationierung ist das. Okodiktatur!

Diktatur? In anderen Lebensbereichen klagt niemand über diktatorisches Gehabe. Dabei pflastern Tausende Verkehrsschilder, Bauvorschriften und Steuerparagrafen den Alltag und sorgen für Kosten, die freiwillig kaum jemand tragen würde. Eine Flugreise beginnt heute fast mit einem öffentlichen Strip-tease. Aber wenn es um einen vernünftigen Umgang mit Energie geht, ist schnell von Zwang die Rede. Als der EU-Energiekommissar Günther Oettinger kürzlich seine Effizienzrichtlinie vorstellte, berichtete dpa über das »Energiespar-Diktat der EU«. Punkt.

Bloß geht es nicht ohne Effizienz. Sie ist billig, umweltverträglich und sofort nutzbar. 21 Mio. alte Heizungspumpen in Wohngebäuden durch moderne Pumpen zu ersetzen spart 8,4 Mrd. Kilowattstunden ein, fast so viel, wie ein Kernkraftwerk produziert. Effiziente Elektromotoren in Industrie- und Gewerbebetrieben ermöglichen bis 2020 sogar den Verzicht auf 27 Mrd. Kilowattstunden. Und knapp 30 Millionen Kühlgeräte, die älter als zehn Jahre sind, durch effiziente Neugeräte zu ersetzen, macht laut Industrieangaben noch einmal mehr als acht Mrd. Kilowattstunden überflüssig. Wie lassen sich in elf Jahren neun Atomkraftwerke überflüssig machen? »Das geht leichter als bislang angenommen«, hieß es neulich in Focus-Money. Nun ja, der Sachverständigenrat für Umweltfragen pocht seit einem Vierteljahrhundert auf Effizienz. Vier Enquete-Kommissionen des Bundestages machten konkrete Vorschläge. Doch keine Regierungskoalition, keine Große und keine sozialliberale, keine schwarz-gelbe und keine rot-grüne, machte sich die Sache zu eigen.

Zwar gibt es Paragrafenwerke wie das »Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen« von Ende 2010. Es erschöpft sich aber weitgehend darin, Energielieferanten zu verpflichten, ihre Kunden einmal pro Jahr mit »Kontaktinformationen« zu versorgen. Mit Telefonnummern oder Adressen von Organisationen, »von denen sie Angaben über angebotene Energieeffizienzmaßnahmen erhalten können«. Blendwerk, mehr nicht.

Das war vor dem neuerlichen Atomausstieg. Und jetzt? Der Ende Juni von der EU-Kommission vorgelegte Vorschlag für eine Effizienzrichtlinie ist in letzter Minute auf Drängen der Deutschen verwässert worden. Der Markt soll es richten, das ist die Philosophie des Hauses Rösler, die von der Wirklichkeit längst widerlegt ist. Das gleicht einem Boykott durch ein Amt, von dessen 17 Energiereferaten sich ganze zwei mit Effizienz befassen, der »Schlüsselfrage«!

Sparen müssen Bürger und Unternehmen, aber der Staat muss dafür sorgen, dass sich effiziente Geräte schneller durchsetzen. Mit Labeln und mit Produktstandards zum Beispiel. Ausgehandelt werden sie in Brüssel, und obwohl deutsche Hersteller für ihre energieeffizienten Produkte bekannt sind, hemmt das Wirtschaftsministerium die EU lieber und überlässt die Vorreiterrolle den Niederländern, Dänen und Schweden, sagt Stefan Scheuer, Energie-Consultant in Brüssel.

Aber jetzt. Jetzt hat Berlin den Klimafonds. Drei Milliarden sollen da von 2013 an fließen. Bloß – wofür? 500 Millionen Euro will die Regierung Betrieben zum Ausgleich steigender Strompreise überweisen; das spart keine Kilowattstunde. Mit 300 Millionen Euro will sie die Elektromobilität fördern; das sorgt sogar für mehr Stromverbrauch. Der eigentliche Energieeffizienzfonds soll ebenfalls mit 300 Millionen ausgestattet werden - darin enthalten: Zuschüsse für den Bau moderner Kraftwerke. Bis zu 15 Prozent der Investitionskosten sind erlaubt. Gut möglich, dass am Ende selbst von den mickrigen 300 Millionen Euro fürs Sparen fast nichts übrig bleibt.

Es wäre die Fortsetzung einer Geschichte gebrochener Versprechen. Es wäre die Offenbarung. </Zitat>

Auszug aus einem Artikel der Stiftung Warentest [Test] 9/2011, S.27: <Zitat>

Schaden Importäpfel dem Klima?

Berechnungen der Universität Bonn ergaben, dass einheimische Äpfel bis zum Frühjahr eine bessere Klimabilanz aufweisen als aus Neuseeland importierte. Ihr langer Schiffstransport kostet mehr Energie als die Lagerung deutscher Äpfel. Deren Klimabilanz verschlechtert sich aber mit jedem Lagermonat im Kühlhaus, sodass ab dem Sommer bis zur neuen Ernte im Herbst Äpfel aus Übersee sogar klimafreundlicher sind. Wer mit dem Auto einkauft, macht aber jeden Vorsprung zunichte: In nur wenigen Kilometern kann ein Auto so viel klimaschädliches Kohlendioxid produzieren, dass sich die Unterschiede in den Energiebilanzen aufheben. </Zitat>

Energie_TA_Wirtschaft.odt
Seitenumbruch



Stromerzeugung

- 1) Strom ist eine hohe Energieform, weil sie sich mit geringen Verlusten und dazu noch sehr komfortabel in andere Energieformen umwandeln lässt.
- 2) Welche Möglichkeiten gibt es, Strom zu erzeugen ?
- 3) Welche Möglichkeiten werden großtechnisch umgesetzt ?
- 4) HA: Wirkungsgrade?

Wärme- und Dampfkraftwerke

Dampfkraftwerke

- Kohle, Atom, Müll, Parabolspiegel
- basieren auf Wasserdampfprozess

Gasturbinenkraftwerke

Kombikraftwerke (GuD)

- Gasturbine und Dampfturbine
- aktuell höchste Wirkungsgrade

Co-Firing

Kernkraft

Kernspaltung

- Die bei einem Kernspaltungsprozess frei werdende Wärme treibt ein Dampfkraftwerk an
- Ggü konventionellen Kraftwerken fährt man mit wesentlichen geringeren Drücken (und damit Wirkungsgraden)

Kernfusion

Flusswasserkraftwerke

- nutzen die Energie der Sonne (außer Gezeiten-K. und Pumpspeicher-K.)

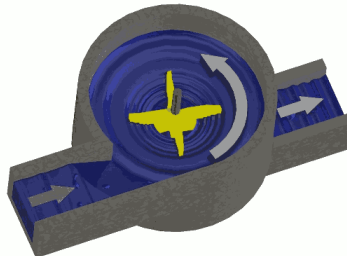
Laufwasserkraftwerke

- sehr hoher Investitionsbedarf
- kaum Betriebskosten
- sehr lange Lebensdauer
- nicht ganz CO₂-neutral (Bau, Faulgase)
- Große Kraftwerke benötigen viel Platz bzw. verdrängen viele Menschen

Wasserwirbelkraftwerk

oder Gravitationswasserwirbelkraftwerk

Bildquelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Wasserwirbelkraftwerk.jpg>
 Urheber: <http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Ukko-wc>



Speicherkraftwerke

Meerwasserkraftwerke

Gezeitenkraftwerke

Unterwasserrotoren

[SdW]02/2012 S.77f: An Engstellen stehen Unterwasserrotoren und werden von der Strömung angetrieben. Es gibt mehrere Konzepte.

Wellenkraftwerke

Oscillating Water Column, Pico

[SdW]02/2012 S.76f: In eine zum Meer hin offene Kammer strömen Wellen und komprimieren die enthaltene Luft. Die Luft strömt durch Turbinen aus der Kammer. Eine Versuchsanlage auf den Azoren („Pico“ 1995-2008) lieferte etwa 50 kW.

Wave Dragon

[SdW]02/2012 S.76, 80: Über eine Rampe schwappen Wellen in das Innere eines Schwimmkörpers, das Wasser strömt durch Turbinen zurück. Eine Versuchsanlage vor der dänischen Westküste lieferte 20kW (2003-2009), vor Wales soll eine größere Anlage gebaut werden.

Penguin / Pinguin

[BadZtg] 07.07.2014 S.24: „Eine Art unsymmetrisches Boot, das bei Wellen in eine kreisende Bewegung gerät. Ein exzentrisches Schwungrad wird dadurch in Bewegung gesetzt, das den Generator antreibt... Auf 500 Kilowatt ist das Kraftwerk aus gelegt, erreicht wurden in der Praxis bisher 180.“

CO₂-Erzeugung: Gaskraftwerke: 428 g/kWh; Steinkohlekraftwerk: 949 g/kWh; Braunkohlekraftwerke 1153 g/kWh

[VDI] //2012 S.11: Aktuelle Gasturbinenwerkstoffe auf Ni-Basis vertragen 1100°C, geforscht wird an Legierungen, die 250°C darüber liegen. Basis sind Co-Re-Legierungen mit Zusätzen von Cr und Ta zur Erhöhung der Beständigkeit. Re=Rhenium hat einen Schmelzpunkt von 3186 °C und ist gut bearbeitbar und zäh.

Das GuD-Kraftwerk Irsching 4 bei Ingolstadt kann als erstes Kraftwerk einen Wirkungsgrad über 60% erreichen (η=60,75% mit 330gCO₂/kWh). Im Gasturbinenbetrieb leistet es 400 MW, im GuD-Betrieb 600MW. Der Durchschnitt aller Gaskraftwerke hat η=40%. [VDI] 9.6.2011)

In Dk und NL ist es üblich, Kohlekraftwerke teilweise mit Biomasse zu befeuern. In D ist dies nicht üblich, da nur reine Biomassekraftwerke gefördert werden. [VDI] 9.6.2011)

Risiken

- Kraftwerk gerät außer Kontrolle (Three Mile Island 1979, Cernobyl 1986, Fukushima 2011) mit unabsehbar großen Folgen
- Schleichende Radioaktivierung der Umwelt

Fusionsprozesse machen so viele Probleme, dass für ihre Entwicklung selbst im günstigen Fall noch mehrere Jahrzehnte zu veranschlagen sind. Ein Problem ist die Handhabung des Plasmas bei 150 Mio°C und hohem Druck, das dazu neigt, innerhalb Sekunden jedem Magnetfeld zu entwischen, als wenn man einen schlaffen Ballon zwischen Fingern komprimieren möchte. Im Realbetrieb müsste das jahrelang stabil funktionieren, und die Anlage muss die Temperatur aushalten. Zwar entstehen beim eigentlichen Prozess keine radioaktiven Zerfallsprodukte, aber Neutronenstrahlung, die angrenzende Materie zu radioaktiven Zerfällen mit schädlichen Abfälle treibt. Außerdem benötigen sie im Moment mehr Startenergie, als sie danach liefern. Details: [SdW]05/10 S88f

- Wasserkraft erzeugt 2008 ca. 16% des weltweiten Energiebedarfs, mehr als Kernkraft (14,8%)
- In der Schweiz existierten 1970 etwa 7000 Flusskraftwerke, 2010 nur noch 1000 (Der Sonntag 01.05.2011)

Der Drei-Schluchten-Staudamm am Jiangtse hat eine Nennleistung, die 14 AKW-Blöcke entspricht. Für ihn werden schätzungsweise 1Mio Menschen umgesiedelt. Dagegen muss man die Probleme von Kohlekraftwerken in China sehen: Extreme Luftverschmutzung, riskanter Bergbau (ca. 1000 Tote p.a.), CO₂-Ausstoß durch Kraftwerke und brennende Flöze. [Bührke 2010]

Auch im Schluchsee gingen Dörfer unter. Wegen solcher Probleme wurden Staudamm-Projekte lange nicht von der Weltbank gefördert.

Funktioniert wie eine umgekehrtes Rührwerk, das im Abfluss einer Badewanne durch das Rotieren des Wassers angetrieben wird. In einem runden Gefäß bildet sich über einer mittig angeordneten Abflussöffnung ein stabiler Wasserwirbel, der eine langsam rotierende Turbinen antreibt. Der Wasserabfluss wird minimal, wenn der Durchmesser des Staubeckens wesentlich größer ist als der Durchmesser des Abflusses.

- Anwendbar bei geringen Fallhöhen ab 70 cm ab 1 m³/s
- relativ langsam rotierende Turbinen (ca. 20 Umdrehungen pro Minute)
- durchgängig für Fische
- belüftet das Gewässer

Realisierte Anlagen

- Ober-Grafendorf (A); BeckenØ von 5,5 m; Fallhöhe 1,4 m; 7,5 kW elektrische Leistung, Drehzahl 33 min⁻¹
- In Schöffland an der Suhre (CH); Ø6,5m, Δh=1,5m; max 15 kW, bis zu 90'000 kWh/a, www.gwwk.ch

[Schneider21] S.13.40: Turbinentypen mit Leistungsbereich abhängig von Fallhöhe und Wasserdurchflussmenge (Nomogramm).

Zapfen die mechanische Energie des Mondes an.

Dämme

[SdW] 02/2012 S.80: Buchten mit hohem Tidenhub werden durch Dämme verschlossen, das Wasser strömt durch Turbinen. Eine Versuchsanlage bei St. Malo, Bretagne, funktioniert seit den 1960. Solche Anlagen produzieren sehr regelmäßig Strom und sind keinem großen Risiko ausgesetzt. Bei St.Malo haben sie stark in ein Ökosystem eingegriffen.

Zapfen Windenergie, also solare Energie an.

[SdW] 02/2012 S.80: Problem bei Wellenkraftwerken ist die Streuung der Wellenhöhe. Ist eine Anlage auf 1m Wellenhöhe ausgelegt, muss sie bei einem Sturm mit 10m hohen Wellen die 100fache Belastung aushalten.

Pelamis („Seeschlange“)

[SdW]02/2012 S.75, 79: Röhren mit Gelenken schwimmen auf den Wellen. In den Gelenken sind Kolbenpumpen, die bei Bewegung der Röhren angetrieben werden. Eine Pilotanlage in Povoia de Varzim, Portugal, scheiterte 2009. In GB werden solche Anlagen seit 2010 vor den Orkneys aufgebaut.

[BadZtg] 07.07.2014 S.24: Vor den Orkneys stehen 2 Maschinen im Praxistest. Je 180 m lang, 5 Segmente, 1300 t schwer, 750 kW el. Leistung. Zum Warten werden sie an Land geschleppt, das ist 10x billiger als Arbeiten auf See.

Oyster / Auster

[BadZtg] 07.07.2014 S.24: „Das System besteht aus einer stählernen Klappe, die mit einem Gelenk am Meeresgrund befestigt ist und schräg im Wasser steht. Sie ist 26 Meter breit und 15 Meter hoch, nur knapp ragt sie aus der See hinaus. Im Takt der Wellen bewegt sie sich vor und zurück, dabei auch auf und nieder. Per Hydraulik wird die Bewegungsenergie an Land übertragen, wo Öl mit bis zu 130 bar auf zwei Turbinen trifft, zusammen 1,3 Megawatt stark.“



Osmosekraftwerk

Voraussetzung

Für ein Osmosekraftwerk braucht man zwei Gewässer mit unterschiedlichem Salzgehalt, wie sie an Mündungen von Flüssen ins Meer zur Verfügung stehen.

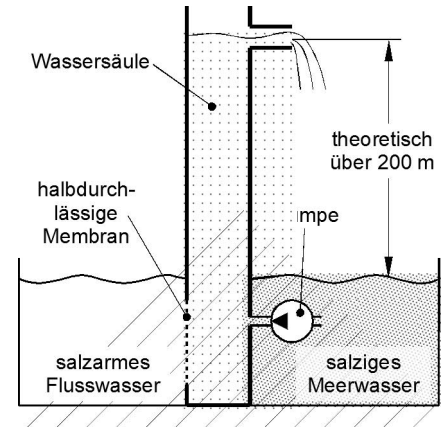
Prinzip

In die Wassersäule wird salziges Meerwasser gepumpt, das durch die halbdurchlässige Membran mit salzfreiem Flusswasser in Kontakt kommt. Nach dem Prinzip der Osmose versuchen beide Flüssigkeiten, ihre Konzentrationen auszugleichen. Da die Membran für Salz nicht durchlässig ist, diffundiert salzfreies Flusswasser in die Wassersäule und verringert dort die Salzkonzentration. Wenn völlig salzfreies Flusswasser und Meerwasser mit 3% Salz aufeinandertreffen, kann der osmotische Druck die Wassersäule theoretisch um 230 m steigen lassen. Mit der erreichten potentiellen Energie des Flusswassers kann man ein Kraftwerk betreiben. Das beteiligte Meerwasser trägt nichts bei, da es gepumpt werden muss.

Potential

Eine Versuchsanlage wurde im November 2009 in Statkraft, Norwegen, in Betrieb genommen. Für die an deutschen Küsten mündenden Flüsse schätzt man ein theoretisches Potential von 1400 MW, d.h. in der Größenordnung eines konventionellen Kraftwerkes. Praktisch dürften nur Bruchteile erreichbar sein.

Quelle: [SdW] 07/2010 S.32f
[Wikipedia] Osmosekraftwerk
Osmosekraftwerk_FO



Windkraftwerke

Windräder mit waagerechter Achse

Windenergie im dt. Binnenland schafft etwa 1400 Betriebsstunden p.a., während ein fossil befeuertes Kraftwerk 5 bis 6000 Betriebsstunden p.a. erreicht. Offshore-Windstrom ist ca. 3x teurer als Kohlestrom. Ursache sind die teuren Baukosten und vor allem die Stromleitung aufs Festland. Offshore Windparks schaffen Refugien für Meeresfauna, da sie dort für Fischer nicht erreichbar sind.

[SdW]01/2012 S80ff: „Die durchschnittliche Auslastung deutscher Windkraftanlagen betrug in den vergangenen 10 Jahren etwa 17 Prozent.“ „Drei Rotorblätter haben sich dabei als mechanisch am stabilsten erwiesen und sind schwingungstechnisch einfacher zu beherrschen als Zwei- oder Vierblattrotoren.“

Bad Ztg 26.06.2013: 2018 will Schleswig-Holstein 9000 MW Windstromanlagen installiert haben (= 9 KKW)

– vdi 25.11.2011: Stand der Technik sind 3 Rotoren vor dem Turm (luv) und drehzahlvariabel.

Ein Gegenentwurf sind 2 Rotoren in Lee. Merkmale:

- sehr laut und unruhiger Lauf (offshore kein Problem)
- Kosten: Ein Rotor weniger; Leelaufwer richter sich automatisch in den Wind aus
- Transport und Montage: 2-Flügel bleiben montiert schmal und transportierbar
- Wartung: 2 Flügel kann man waagrecht stellen, sodass einem Helikopter kein Flügel im Weg steht
- Turbulenzen hinter den Masten erhöhen Wechsellasten, dem kann durch individuelle Verstellung der Blätter entgegengewirkt werden.
- Dem Einsatz des Gegenentwurfs steht entgegen, dass die Windindustrie konservativ ist, und lieber bestehende Konzepte vergrößert, als vollkommen neue Konzepte entwickelt. (Diese Haltung ist typisch: Industrie scheut Kosten und Risiken neuer Konzepte; Technik entwickelt sich in der Regel evolutionär, d.h. durch kleine Verbesserungen, völlig neue Entwürfe sind eher selten.)

Solkraftwerke

Parabolspiegelanlagen

- konzentrieren Energie mit Spiegel oder Linsen
- große Leistung als Dampfkraftwerk oder GuD
- kleine Leistungen auch mit Stirlingmotoren
- benötigt direkte Sonneneinstrahlung, deshalb beschränkt auf Äquator ca. ±35 Breitengrade

Aufwindkraftwerke

[SdW]01/2012: „Ein Aufwindkraftwerk ähnelt einem Turm, der aus einem riesigen Treibhaus herausragt. Bei Sonneneinstrahlung erhitzt sich in dem Treibhaus die Luft und steigt .. im Turm auf .. Turbinen entziehen diesem Wind Energie und erzeugen Strom.“ Eine Versuchsanlage in Spanien war für eine Spitzenleistung von 50 kW ausgelegt. Für 200 MW müsste die Treibhausfläche knapp 40 km² und der Turm 1 km hoch sein → sehr teure Investition.

Kleinkraftwerke

Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen KWK

KWK erzeugen mechanische Energie, z.B. um einen Generator anzutreiben, und nutzen die Abwärme zum Heizen.

Blockheizkraftwerke BHKW

BHKW erzeugen Strom und nutzen die Abwärme zum Heizen. In Wohnhäusern werden sie zum Heizen betrieben und der „nebenbei“ erzeugte Strom wird genutzt oder ins Netz eingespeist. Die Wärmeleistung eines BHKW ist zwar niedriger als die einer Heizung, sie erspart aber die Stromproduktion in einem Großkraftwerk mit 70% Abwärme, sodass der Gesamtwirkungsgrad deutlich besser ist als bei getrennter Strom- und Wärmeproduktion. Wärmegeführte Geräte laufen, wenn Warmwasser benötigt wird. Damit der Motor nicht zu kurz läuft (Wirkungsgrad, Lebensdauer) muss ein Speicher vorhanden sein, der gefüllt wird. Stromgeführte Geräte springen an, wenn Strom benötigt wird oder gerade gute Preise bringt. Stromgeführte Geräte benötigen größere Speicher BHKW auf Basis eines Motors benötigen einen relativ großen Warmwasserspeicher, damit der Motor nicht zu oft anspringen muss.

Stromerzeugeraggregate (SEA)

Biogasanlagen

Erzeugen nicht Strom, sondern Methan, und können im Strom-Gas-verbund genutzt werden

Sonstiges

Muskelmotoren

Windräder mit senkrechter Achse

Müssen dem Wind nicht nachgeführt werden.

Darrieus-Rotoren

[SdW]01/2012 S.82f: Wirkungsgrad max. 30%, weil die Rotorblätter nur kurzfristig optimal zum Wind stehen, aber relativ unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Eine Anlage in Le Nordais, Kanada, leistet knapp 4 MW, wurde aber 1992 durch eine Windböe zerstört [SdW]01/2012 S.84f: Darrieus-Rotoren können in Windparks dichter gestellt werden als herkömmlichen Rotoren und gleichen so ihre niedrigeren Wirkungsgrade aus.

Savonius-Rotoren

Schlechter Wirkungsgrad, aber einfach. Verwendung zur Stromerzeugung auf Jachten und als Notstromaggregate auf Flugzeugen

Segel

Es gibt immer wieder Versuche, Frachtschiffe mit zusätzlichem Windantrieb anzutreiben (Segel, Drachen, Windräder mit senkrechter Achse).

Lenkdrachen und Gleitsegel

[SdW]01/2012 S.82f: Ein Drachen/Segel zieht mit großer Kraft eine abrollende Leine, die einen Generator antreibt. Wenn die Leine verbraucht ist, wird der Anstellwinkel des Drachens verändert und er mit geringer Kraft eingezogen. Ein Segel von SkySails wird zum Antrieb von Schiffen eingesetzt und bringt mit 320m² 2 MW. Theoretisch sind Lenkdrachen preisgünstiger als Windparks, brauchen weniger Platz und sind mobil.

Hersteller in Europa: solar-fabrik.de

Solarzellen

- funktionieren auch bei diffusem Licht (also nicht nur nahe des Äquators)
- geringer Wirkungsgrad
- Die Frequenz einer einspeisenden Quelle darf von der im Stromnetz nicht zu stark abweichen, deshalb muss die Rotationsgeschwindigkeit von Generatoren geregelt werden, sonst würden die Generatoren unter Last langsamer u.u.. Wenn Einspeiser die Toleranz nicht halten können, müssen sie abgeschaltet werden. Für bis 2011 gebaute Wechselrichter in Photovoltaikanlagen war dies bei 50,2Hz der Fall. Da diese Grenze bei Verbrauchsspitzen erreicht werden kann, kann es durch Abschalten zu einer Kettenreaktion kommen. Deshalb dürfen sich Wechselrichter seit der VDE-Regel 2011 zw. 47,5 .. 51,5Hz NICHT abschalten.

Fallwindkraftwerke

[SdW]01/2012 S.82f: In einem hohlen Turm wird oben Wasser versprüht, das verdunstet und die Luft abkühlt. Die Luft fällt herab und treibt Turbinen am Fuß des Turmes an. Für 900 MW ist ein 1200 m hoher Turm mit Ø4000m erforderlich, 300 MW müssten zum Pumpen des Wasser abgezweigt werden. Pilotprojekte werden in USA und Israel geplant.

Informationen:[Test]05/2012 S.64ff, [initiative-brennstoffzelle.de/](#)

Hersteller:

mit Stirling: [lichtblick.de](#) (stromgeführt), [whispergen.com](#) (wärmegeführt), [broetje.de](#), [remeha.de](#), [viessmann.de](#)

Verbrennungsmotor: vaillant.de (1-Zyl-Otto von Honda, stromgeführt), kirsch-homeenergy.de, proennis.de; senertec.de;

Brennstoffzelle: [www.elcomax.de/](#); [www.cfc.com.au/BlueGen/](#) (Brennstoffzelle = ceramic fuel Cells)

Thermische Nutzungsgrade etwas über 80% ggü. 95% bei Gasbrennern, dazu kommen elektrische Nutzungsgrade um 10%. Der Gesamtwirkungsgrad liegt immer noch unter dem eines Gasbrenners, bewertet aber nicht, dass – bei getrennter Strom- und Wärmeproduktion mehr Primärenergie verbraucht und – im BHKW höherwertige Energie erzeugt wird wird. Dies wird im „Gesamt-Normnutzungsgrad, primärenergetische bewertet“ berücksichtigt, der bei BHKW um 110% liegt. Stromkennzahl ist das Verhältnis

[BadZtg] 03.11.2012: Über 7000 Anlagen in Deutschland

1 Tasse Kaffee produziert 100g CO₂: 50% Heißwasser, 40% Kaffeeproduktion, 10% Verpackung Transport

Göpel: → [Agricola 1548], [Matschoss 1932] S.17, [Arnold 1968] S.20
Trettrad, Treitmühlen: → [Agricola 1548], [Arnold 1968] S.25
Handkurbel: → [Matschoss 1932] S.81



Elektrische Energie speichern

Energiespeicherung

Pumpspeicherkraftwerke

- reine Speicher, keine Stromerzeugung
- Wirkungsgrade → [Doppel 20] R35, ca. 75%

Lithium-Ionen-Akkumulator

- Energiedichte ca 180Wh/kg, erreichbar vielleicht 240 Wh/kg (Kraftstoff: 10kWh/kg)
- [Ads-tec](#) bietet Container-große Batterien von 100 kW bis 1 MW.

Kugelspeicher in Tiefwasser (Bezeichnung?)

2016 wird im Bodensee probeweise eine hohle Betonkugel versenkt, die etwa wie ein Pumpspeicherwerk funktionieren soll: Bei Stromüberschuss wird die Kugel gegen den Wasserdruck leer gepumpt. Bei Strombedarf strömt das Wasser wieder in die Kugel und treibt einen Generator an.

Elektrolyse = Power-to-Gas

Wenn man speziell für Power-to-Gas Windkraftwerke aufstellt, produzieren diese zwar CO₂-neutrales Gas, aber gleichzeitig wird der Strom, den die Windkraftwerke produzieren, aber nicht ins Netz speisen, in einem konventionellen Kraftwerk erzeugt. Dort wird mehr Brennstoff verbrannt, als die Windkraftwerke erzeugen. Deshalb ist Power-to-Gas nur dann sinnvoll, wenn überschüssiger Strom genutzt wird. Da Elektrolysateure recht teuer sind und ausgelastet sein müssen, rechnet sich Power-to-Gas also erst, wenn es so viele Windkraftwerke gibt, dass es häufig Windstromüberschüsse gibt.

Wasserstoff

[SdW]01/2012 S.85:
Wirkungsgrad ca. 60%. Verteilung im vorhandenen Gasnetz, dort darf 5% H eingesetzt werden → entspricht 1/3 des dt. Windstromes 2011.
Kann weiter in Methan umgewandelt werden und im Erdgasnetz genutzt werden.
Der Wirkungsgrad Strom → Wasserstoff → Strom beträgt ca. 40% [Buchholz 2016]S.111

Verbrauchssteuerung

Die aktuelle Stromversorgung basiert darauf, dass die Stromerzeugung ständig dem Bedarf angepasst wird. Bisher gibt es kaum Ansätze, den Strombedarf zu steuern. Die klassische kapitalistische Möglichkeit wäre es, die Stromtarife nach Angebot und Nachfrage auszurichten. Beim Großverbrauchern gibt es Möglichkeiten, Stromlieferungen einzuschränken, aber das sind nur Ansätze.

- Kühlhäuser können bei absehbaren Lieferengpässen, z.B. Flauten, etwas tiefer kühlen als normal und dann einige Tage ohne Kühlung = Stromverbrauch überbrücken
- Die großtechnische Elektrolyse von Al ist wenig erforscht. Möglicherweise kann man dort die Stromzufuhr stundenweise unterbrechen und die Reaktion der Wärme überlassen [VDI] ?/2017
- Elektromobile können bevorzugt nachts geladen werden. Manche wollen sogar die Akkus der Elektromobile bei Bedarf zu leeren, aber dem werden Autofahrer den Stecker ziehen.
- Haushalte könnten Stromverbrauch in die Nacht legen (Tiefkühltruhen, Waschmaschine..)
- BHKW in Häusern können zur Erzeugung von Strom in Spitzenlastzeiten beitragen, z.B. durch Warmwassererzeugung am Morgen und am Abend, wenn Strom benötigt wird.

Stromverbund

Je größer ein Stromverbund ist, desto eher können regionale Überschüsse und Mängel ausgeglichen werden. Dazu sind Stromleitungen erforderlich, bevorzugt in Techniken, die weite Übertragungen erlauben (Gleichstrom).

Stromtransport

Spannungsebenen

380 kV ~ : Ferntransport

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Wechselspannung lässt sich mit weniger Aufwand zwischen den Spannungsebenen 380kV und 230V zu transformieren, hat aber größere Transportverluste. HGÜ soll sich ab 600km lohnen [Buchholz 2016]

Kraftstoffe

Liquid Natural Gas LNG

besteht überwiegend aus Methan, wird bei -162°C verflüssigt, V ≈ 1/600 des Gases. Die Verflüssigung kostet 10..25% des Energieinhaltes des Gases.

Compressed Natural Gas CNG

bei 200 bar komprimiertes Erdgas

Druckspeicherkraftwerke

[SdW] 06/2010 S.90, Funktionsweise, Merkmale

Wirkungsgrad ca 40%, mit Zusatzfunktionen (Gasturbine, Wärmerecuperation) bis ca. 70%
Kraftwerk Hunte, Niedersachsen, seit 1978, jetzt 320 MW
Kraftwerk McIntosh, Alabama, seit 1991, 110 MW über 26 Std.

Ringwallspeicher

[SdW]02/2012 S.80: Auf dem flachen Land wird ein kreisförmiges Hochbecken in einem ringförmigen Unterbecken errichtet. Der Eingriff in die Landschaft ist vergleichsweise gering (mehrere km Durchmesser, mehrere 100m Höhe), die Form kann der Gegend angepasst werden. Material muss nicht weit transportiert werden.

Schlagwort: Power-to-Gas

Erdgas

SolarFuel → www.juwi.de

Verfahrensbeschreibung

Elektrolyse: H₂O + Strom → H₂ + O₂ (η < 60%)

Reaktor: CO₂ + H₂ → CH₄ (Methan) → Erdgasnetz

Brennstoffzelle: Methan → Strom (η < 80%)

Gesamtwirkungsgrad (Strom → H₂ → CH₄ → Brennstoffzelle Strom): ca. 20% .. 35% (je nach Quelle)

Merkmale

- Erdgas kann gut gespeichert werden
- Infrastruktur ist vorhanden
- Erneuerbarer Strom kann in beliebiger Menge aufgenommen werden

Desertec

Stromerzeugung in Nordafrika aus Sonne oder Wind und Transport nach Europa.

- Bedenken: Wenn man ein Firmenkonsortium mit dieser Aufgabe beauftragt, wird diese viel Einfluss auf die politischen Verhältnisse in den betroffenen Ländern nehmen. Vergleich: Ostindische Kompanien, United Fruits (heute: Chiquita), Anglo-Persian Oil Company (heute: BP) .. alle nur stellvertretend
- Ein sehr angenehmer Nebeneffekt heimisch erzeugter erneuerbarer Energien ist, dass der Grund für Erdölkrise entfällt. Aber nicht zu früh gefreut: Es gibt noch zahlreich andere Rohstoffe und Gründe für Kriege..
- 2014 sei das Projekt vom Tisch [Buchholz 2016]

Bad Ztg 26.06.2013: Es handelt sich um 12 armdicke 380kV-Leitungen, die in einer offenen, 25 m breiten Betontrasse verlegt werden und sich bis 80°C erwärmen. Dazu kommen turnhallengroße Konverterhäuschen.-> deutlich teurer als Überlandleitungen und noch nicht ausgereift. .."Im Artikel sind HGÜ und Erdkabel vermischt?

LNG ist eine Methode, große Mengen Erdgas ohne Pipeline zu transportieren, wenn auch teurer. LNG-Tanker benötigen übrigens keine Kühlanlage: Sie zapfen das LNG für die eigenen Maschinen ab, die Verdampfungsenthalpie genügt, um den 'Kälteverlust' (eigentlich: Wärmezufuhr) der Tanks auszugleichen. LNG kann am Zielhafen verdampft und ins Erdgasnetz eingespeist werden.

2018 verfügt Deutschland über keinen Hafen, an dem LNG angelandet werden kann, bislang wird es aus Rotterdam oder Zeebrugge eingeführt, Zur Diskussion stehen Wilhelmshaven, Stade und Brunsbüttel. Ob die Milliardeninvestition getätigt wird, ist offen, da Gas aus Russland billiger ist. Andererseits ist ein Handelskrieg mit Trump zu befürchten.

Liquid Petrol Gas LPG = Flüssiggas

Propan, Butan, Buten sind Nebenprodukte der Erdölraffination und werden bei ca. 8 bar flüssig.

Energie_TA_Wirtschaft.odt



Allgemeine Aufgaben

Nicht nur im Fach Energietechnik, aber dort häufiger, taucht in den Abitur-Prüfungen ein Aufgabentyp auf, den viele Schüler gar nicht mögen. Die Ursache der Abneigung ist vermutlich, dass in diesen Aufgaben mehrere, wenn auch einfache technisch-physikalische Zusammenhänge verknüpft werden müssen. Wer die nicht verstanden hat oder wenigstens die Formeln präsent hat, insbesondere die Sache mit der Leistung, und/oder hilflos vor den Einheiten steht, ist schnell überfordert. Andere Schüler lösen diese Aufgaben im Handumdrehen, denn mathematisch sind sie so anspruchslos, dass ich sie die Dreisatz-Aufgaben nenne.

Auch auf dieses Problem kann man sich vorbereiten, deshalb habe ich hier die bisher gestellten "Dreisatz-Aufgaben" mit ausführlichen Lösungen zum Üben zusammengestellt. Ein Vorschlag, wie man solche Aufgaben anpacken kann, ist in Ausarbeitung.

Vertiefung

[Übungsaufgaben Abi-Allgemeine_Aufgaben_Ub](#)

[Energie_TA_Dreisatzaufgaben.odt](#)

Nord-Stream-Pipeline durch die Ostsee

Länge: 1224 km

Rohrinnendurchmesser: 1153 mm, Wandstärke: 26,8..41 mm

Werkstoff: hochfeste Stähle X65..X100

Druck: bis 220 bar

Kapazität: bis 55 Mrd m³ p.a. (in zwei Röhren)

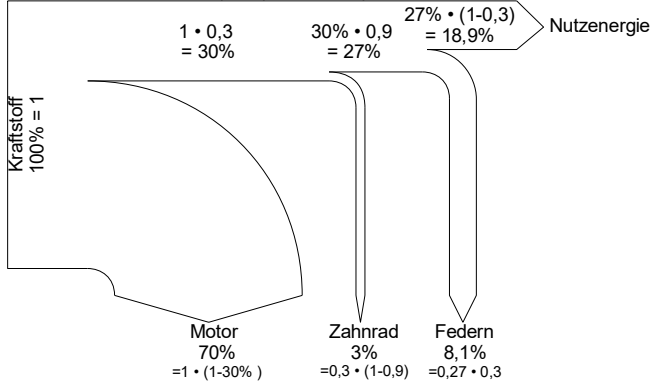


Diagramme

Energieflussdiagramm

= Sankey-Diagramm

HP 2008/09/-1 Vibrationsstampfer: η Motor 30%, η Zahnrad 90%, Verluste der Federn 30%



Beachte: Ausgänge eines Energieflussdiagrammes werden addiert und nicht wie Wirkungsgrade multipliziert

- 70% (Motorverluste) + 3% (Zahnradverluste) + 8,1% Federverluste + 18,9% (Nutzenergie) = 100% (Kraftstoff)
- 3% (Zahnradverluste) + 27% (kommt am Zahnrad durch) = 30% (Eingang Zahnrad)

Zweck

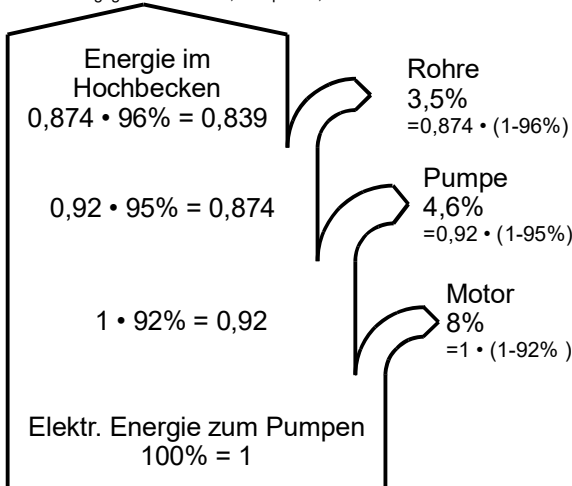
- graphische Darstellung von Mengenflüssen
- Hilfsmittel zur Visualisierung von Einsparpotenzialen

Darstellung

- Es gibt viele Formen und keine Normen. Üblich sind
- Pfeilbreite proportional zur Menge
 - Dargestellte Mengen können addiert werden → Reihenfolge ist nicht beliebig
 - Energie-, Mengen-, Konzentrations-, Kostenflüsse ..., absolut oder relativ,
 - meist zeitbezogen und ohne Lager

Vertiefung

- 1) HP 2009/10-5 Pumpspeicherkraftwerk Aufgabe 1
Wirkungsgrade: Motor 8%; Pumpe 5%; Rohre 4%



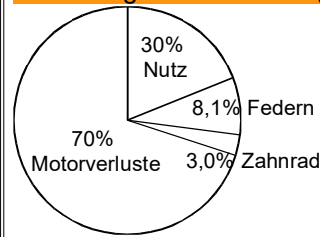
Beispiele

<http://www.umweltschutz-bw.de/index.php?lvi=6114>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Schiffsk%C3%BChsystem>

Blockdiagramm

Ergänzen

Tortendiagramm/ Kreisdiagramm



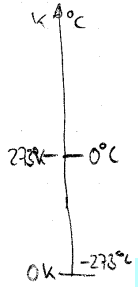
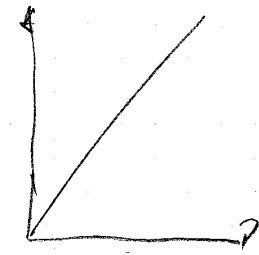
QR-Wikipedia

- 2) NP 2009/10-1 Dampfkraftwerk Aufgabe 1.1
Verluste: Wärme 40%, Hydraulisch: 10%, Mechanisch 15%

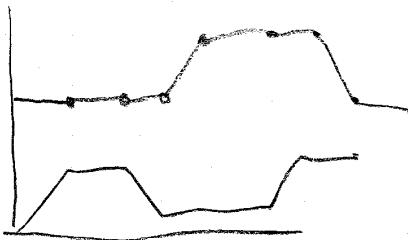


verschiedene Beispiele

Liniendiagramm (quantitativ)



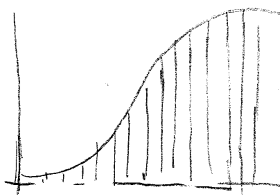
Weg-Schritt-Diagramm



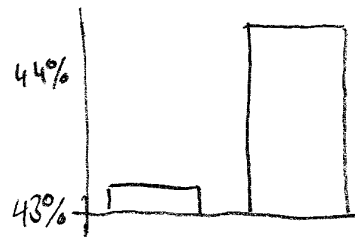
Balkendiagramm



Histogramm (kumuliert)



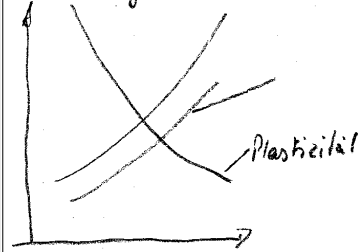
Balkendiagramm (manipulativ)



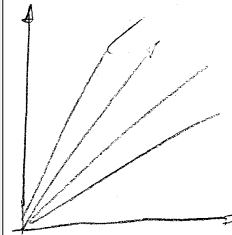
1) TA Dreiecke + 2 Punkte: Ein Bild sind 1000 Worte; unser Gehirn ist visuell organisiert.

Beispiele für besser und schlechter geeignete Darstellungen technischer Sachverhalte
2) Mit einer geeigneten (anschaulichen) Darstellung sind Probleme leichter lösbar.

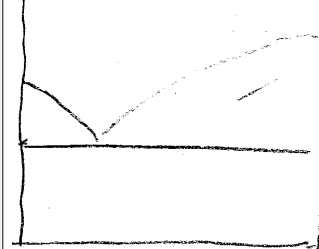
Liniendiagramm (qualitativ)



Nomogramm



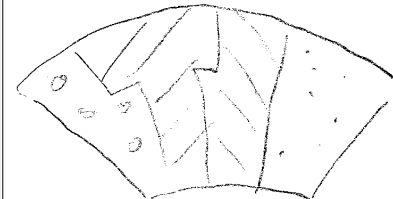
Phasendiagramm, Zustandsschaubild



Stabdiagramm



Sitzverteilung





Formelkram

Rechnen mit Wärmekapazitäten

(isochore) Wärmekapazität c_v

– Proportionalitätskonstante zwischen Wärme und Temperatur/innerer Energie

$$(\cdot) \quad \Delta Q_V = c_v \cdot m \cdot \Delta T$$

$$\Delta Q_V = C_V \cdot \Delta T \quad (5)$$

Herleitung? CV oder cV?

$$C_V = \frac{1}{2} \cdot f \cdot R \quad (6)$$

Boltzmann-Konstante k_B

(isobare) Wärmekapazität c_p

c_v, c_p : spezifisch (pro kg)

C_{Vm}, C_{Pm} : molar (pro Mol)

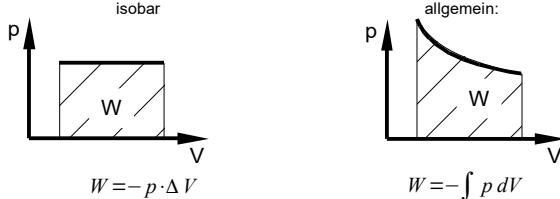
äußere Arbeit W

1) Wdhg: Volumenarbeit aus der Grundformel

$$W = -F \cdot \Delta s = -p \cdot A \cdot \Delta s = -p \cdot \Delta V \quad (7)$$

- : Wenn sich das Volumen vergrößert, wird Arbeit aus dem System entnommen, das ist nach der Vorzeichenkonvention negativ. A: Kolbenfläche

2) Wdhg: Arbeit im pV-Diagramm berechnen



Gaskonstante

$R_i \leftrightarrow$ Dichte ρ

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \Rightarrow R_i = \frac{p \cdot V}{m \cdot T} = \frac{p_n}{T_n \cdot \rho} \quad (8)$$

p_n : Normdruck 101325 Pa
 T_n : Normtemperatur 273,15 K
 ρ : Dichte m/V

$R_i \leftrightarrow$ Wärmekapazitäten c

(..), (..), (7) in (..)

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W$$

$$c_p \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot m \cdot \Delta T - (-p \cdot \Delta V)$$

$$c_p - c_v = \frac{p \cdot V}{m \cdot T}$$

$$c_p - c_v = R_i \quad (9)$$

Universelle Gaskonstante R

$$\frac{p \cdot V}{T} = m \cdot R_i = n \cdot R \quad (10)$$

n: Molmenge des betrachteten Gases
R: universelle Gaskonstante für alle Gase

$$R = 8,314510 \frac{J}{mol \cdot K}$$

[Kurrer 2002] S.218: Carnot hat sein Werk ohne eine einzige Formel geschrieben. mein Kommentar: Geht doch!

Einarbeiten: [Pischinger 2009]

- Die spezifische Wärmekapazität von H2 ist so hoch, weil jedes Gramm besonders viele Moleküle enthält.
- Große Moleküle haben eine große molare Wärmekapazität wegen ihrer vielen Freiheitsgrade. Ihre spezifische Wärmekapazität ist unauffällig.

c_v (kleines c) ist die spezifische Proportionalitätskonstante zwischen Wärme und Temperatur, bzw. zwischen Wärme und innerer Energie. C_V (Großes C) ist dasselbe, nur masseabhängig.

Mechanisches Wärmeäquivalent?: Taugt c_v für Aussage, wie Wärme und mechanische Arbeit zusammenhängen? Schon 1842 gab der Arzt Robert Mayer (Heilbronn) das „mechanische Äquivalent der Wärme“ an, ein Beweis erfolgte durch Joule in Versuchen 1843-1849. [Tyndall 1894] S.145ff

Boltzmann-Entropie-Konstante beträgt $k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ [Klein 2008] (benannt nach Ludwig Boltzmann) und ist nicht zu verwechseln mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ (benannt nach Josef Stefan und Ludwig Boltzmann). In der Literatur wird für k oft das Formelzeichen k_B verwendet. k verwenden: [Metzler 1998]

1) Wie verhalten sich c_v und c_p zueinander?

Zylinder mit Wärmezufuhr:

Technische Arbeit (= Fläche zw. Kurve und p-Achse) → [Dubbel 11 I]; [Doering 1968] „Kupplungsarbeit“

1) Berechnen Sie die individuelle Gaskonstante R_i von Luft.

[EuroTabM] „Dichte“: $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$

$$R_i(\text{Luft}) = \frac{p_n}{T_n \cdot \rho} = \frac{101323 \text{ Pa}}{273,15 \text{ K} \cdot 1,293 \text{ kg}} = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Die Gleichung für die Energiebilanz lautet:

Die spezifische Gaskonstante ist also die Differenz aus den spezifischen Wärmekapazitäten bei isobarer und isochorer Erwärmung.

2) Berechnen Sie die spez. Wärmekapazitäten der Gase, die in der Formelsammlung angegeben sind.

Das Gasgesetz besagt, dass das Verhältnis der Zustandsgrößen p , V und T von Menge des betrachteten Gases und einer Konstanten abhängt.

Dieses Verhältnis kann man mit der Masse m und Gaskonstante R_i ausdrücken, es geht aber mit der Anzahl n der Mole und der universellen Gaskonstante R . Es zeigt sich, dass R eine Fundamentalkonstante ist, die für alle Gase gleich ist. $R = 8,314510 \text{ J/(mol K)}$ [Metzler 1998] S.162; [Klein 2008] S.940 nach Committee on data for science and technology, Nov. 1986.

In die Tatsache, dass R konstant ist, spielen hinein:

- Gase enthalten unter denselben Zustandsgrößen immer die gleiche Menge Moleküle (Avogadro)
- Der Zusammenhang zwischen innerer Energie U und Temperatur T eines Teilchens ist unabhängig von seiner Masse. Diese wird bei $R = \frac{R}{M_r} = R \cdot \frac{n}{m}$ mit der Molmasse M_r herausgerechnet.
- Die Anzahl der Freiheitsgrade eines Teilchens spielt auch keine Rolle, weil R , immer 2 Freiheitsgrade entspricht. $c_p - c_v = R_i$



Adiabatenexponent κ

$\kappa \leftrightarrow$ Wärmekapazitäten c

$\kappa \leftrightarrow$ Freiheitsgrade f

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v} \quad (11)$$

$$(9) \quad C_V = \frac{1}{2} \cdot f \cdot R \quad (12)$$

$$c_p = c_v + R_i$$
$$m \cdot c_p = m \cdot c_v + m \cdot R_i$$
$$C_p = C_v + R$$
$$C_p = \frac{1}{2} \cdot f \cdot R + R$$

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot (f+2) \cdot R \quad (13)$$

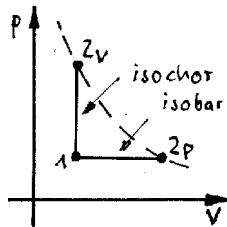
$$(9), (13) \text{ in } (11) \quad \kappa = \frac{\frac{1}{2} \cdot (f+2) \cdot R}{\frac{1}{2} \cdot f \cdot R}$$

$$\kappa = \frac{(f+2)}{f} \quad (14)$$

Freiheitsgrade $f \leftrightarrow$ Wärmekapazitäten c

$$(11) = (14) \quad \kappa = \frac{C_p}{C_v} = \frac{(f+2)}{f}$$
$$f = \frac{2}{\frac{c_p}{c_v} - 1} = \frac{2 \cdot c_v}{c_p - c_v} \quad (15)$$

Fragen



Begründung

Begründung

Wie oben gezeigt, kann die Wärmekapazität bei isochorer Zustandsänderung C_v aus der allgemeinen Gaskonstante R und der Anzahl der Freiheitsgrade f berechnen:

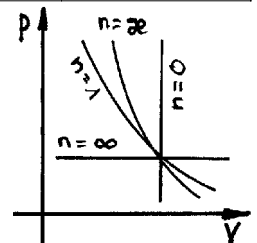
Aus $c_p - c_v = R_i$ kann man weiter rechnen im Wechsel zwischen spez. und absoluten Wärmekapazitäten

Der Adiabatenexponent hängt also ausschließlich von den Freiheitsgraden f der Gasteilchen ab und damit letztendlich von ihrer Geometrie.

Gas	C_p	C_v	f (berechnet)
Kohlendioxid	0,844	0,655	6,93
Luft	1,005	0,718	5,00
Sauerstoff	0,917	0,658	5,08
Stickstoff	1,038	0,741	4,99
Helium	5,194	3,128	3,02
Wasserstoff	14,296	10,139	4,88

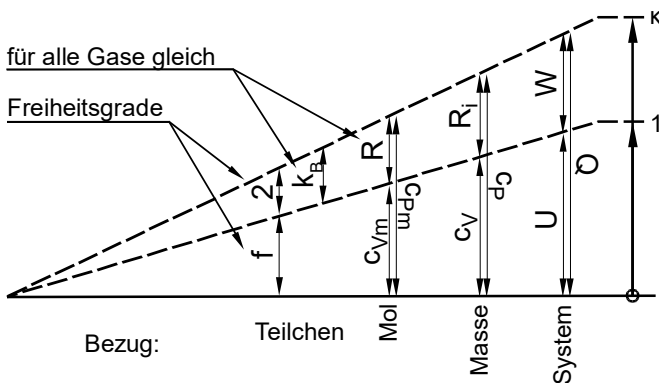
Was sagt aus:

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$
 $p \cdot V^n = konst.$
Mit dem Polytropenexponent n
Isotherme $n = 1$
Isentrope $n = \kappa$
Isobare $n = 0$
Isochore $n = \infty$ [Hering 1992] S.169



Technische Arbeit → [Dubbel 11 I], [Doering 1968]

Übersicht



Fragen

Die Gaskonstante ist niedrig, wenn sich Stoffe bei Temperaturänderung wenig ausdehnen (Flüssigkeiten) und mehr Energie in Schwingungen auf / an den Gitterplätzen entstehen. Es besteht also ein Zusammenhang mit der Volumenausdehnungszahl?
Gaskonstanten: He = 2,077 kJ/kg; H2 = 4,124 kJ/kg

Gaskonstante hängt mit der Volumenausdehnung zusammen?

Hohe Gaskonstante bedeutet, dass beim isothermen und adiabatischen Prozess viel Arbeit bei geringeren Änderungen der $T(p, V)$ frei wird.
Kleine c_v / c_p bedeuten einen geringen Wärmebedarf für Temperaturänderungen.
Welches Gas hat einen geringen Wärmebedarf für Temperaturänderungen und kann wiederum viel Arbeit herausziehen : dann, wenn c_v klein ist im Vergleich zu c_p .
Zusammenhang $R_i - \alpha$ (muss nicht exakt stimmen, genügt als Hinweis):

$$c_p - c_v = \frac{\alpha^2 \cdot T}{\rho \cdot \beta_T} \quad [\text{en.wikipedia.org/wiki/Heat_capacity 23.05.2010}]$$

α : Volumenausdehnungszahl
 ρ : Dichte
 β_T : Isothermer Kompressibilitätskoeffizient

Enthalpie H

$$H = U + p \cdot V$$
$$dH = dU + p dV + V dp$$
$$dH = dU + p dV \text{ (isobar)}$$
$$dH_{isobar} = dU + p dV = \Delta Q = c_p \cdot m \cdot \Delta \vartheta$$

Formel: [Hering 1992] S.161: „Die Einführung der Enthalpie vereinfachen thermodynamische Berechnungen bei Zustandsänderungen, die bei konstantem Druck ablaufen.“
[Tipler 1995] S.563: Enthalpie = spez. innere Energie (enthält neben der ungerichteten auch die gerichtete Energie? [Wikipedia])

Formel: [Metzler 1998] S.160.



Temperatur

Was ist Temperatur?

- ist die mittlere kinetische Energie der ungerichtete Bewegung der Teilchen eines Körpers (→ kinetische Gastheorie)
- zwei Körper haben dieselbe Temperatur, wenn keine Wärme zwischen ihnen fließt (→ thermodynamisches Gleichgewicht)

Temperaturskalen

Celsius und Kelvin

Bild der Skalen

Temperaturmessung

Thermometer, Temperatursensoren

- erfordert Kontakt mit dem Messziel
- beruht klassisch auf der Wärmeausdehnung
 - Gas- oder Flüssigkeit (He, Hg, Alkohol)
 - Bimetall

Pyrometer, Thermografie

- beruht auf der Wärmestrahlung eines Körpers
- Pyrometer: Körpertemperaturmessung im Ohr
- Thermografie: Wärmebild, Nachtsichtgeräte
- Glühfarben

Sonstige Effekte

Formelzeichen

- Kelvin: T und Θ (%THETA) (Großbuchstaben)
- Celsius: t und θ (%theta) bzw. ϑ (%vartheta) (Kleinbuchstaben)

Temperatur ↔ Wärme

3) Anschauung für Schüler

Man nehme ein kleines Stück Aluminiumfolie, lege es in kochendes Wasser und dann mit der angenommenen Temperatur auf die Hand. → Al-Folie mit 100°C schmerzt kurz, ist aber relativ schnell abgekühlt, weil die Wärmemenge gering ist. Anschließend nehme man einen Amboss und lege ihn in einen großen Kessel kochenden Wassers. Wenn er 100°C hat, lasse man das Wasser ab und lege die Hand auf den Amboss → Trotz der gleichen Temperatur würde jetzt die Hand gekocht, weil die Wärmemenge wesentlich größer ist.

- Gerichtete Bewegung der Teilchen bedeutet, dass sich der ganze Körper bewegt. Dies ist dann Bewegungsenergie und trägt nicht zur Temperatur bei (→ Überstromversuch). Umgekehrt: Wenn Gas in einem Vergaser oder über einer Tragfläche eines Flugzeuges beschleunigt wird, sinkt seine Temperatur (→ Bernoulli)
- Der absolute Nullpunkt der Temperatur T0 ist dann gegeben, wenn sich die Teilchen nicht mehr (ungerichtet) bewegen. Ein Ansatz, nahe an T0 zu kommen, ist Gas durch eine Düse strömen zu lassen (=gerichtete Bewegung), wobei es abkühlt.
- Es gibt theoretisch

Die klassische Methode beruht auf der Wärmeausdehnung eines Stoffes mit einer gleichmäßigen Einteilung in Grad zwischen zwei reproduzierbaren Temperaturen.

- Anders Celsius, S 1742, 0°C beim Schmelz- und 100°C beim Siedepunkt von Wasser, Quecksilber. Heute über die Kelvin-Skala definiert.
- William Thomson (Lord Kelvin), GB 1848, 0K beim absoluten Nullpunkt, 273,15K bei 0°C bzw. 273,16K beim Tripelpunkt von Wasser (in einem definierten Mischungsverhältnis aus den Weltmeeren !), Skalenteilung wie Celsius
- Daniel Fahrenheit, D 1714, 0°F beim Gefrierpunkt einer Kältemischung (wollte negative Temperaturen vermeiden), 100°F bei Körpertemperatur (heute exakter definiert), verwendete Alkohol, dessen Volumenänderung etwas anders verläuft als Hg.
- u.v.m. zB: Rankine (wie Kelvin mit der Skalenteilung von Fahrenheit), Delisle (umgekehrte Skala: 0°C = 150°De; 100°C = 0°De); Reamur (wie Celsius mit Einteilung in 80°F), Newton (wie Celsius in 33°N, verwendete ein Öl); Rudolf Plank (schlug einen Fixpunkt vor und ein Grad als 1/273,15 Volumenänderung von Gas. Plank 1886-1973 wuchs in Kiew auf, studiert in St.Petersburg und war an der Revolution 1905 beteiligt. Danach beendete er sein Studium in Deutschland und war als Professor (außer während der Weltkriege) und Ingenieur in Kälte- und Lebensmitteltechnik tätig.)

- Begriffe: Bolometer, Mikrobolometer, Halbleiterdetektoren (gekühlt auch für Nachtsichtgeräte?)
- Glühfarben beruhen auch auf Wärmestrahlung
- Fehlerquellen: unbekannter Emissionsgrad des Messziels, Reflexion von Fremdstrahlen an der Oberfläche, Eigenstrahlung der Luft

Andere Effekte, die zur Temperaturmessung angewendet werden (nicht vollständig):

- temperaturabhängige Widerstände: PTC, NTC
- thermoelektrische Spannungen: Thermoelemente
- temperaturabhängige Frequenz von Schwingquarzen
- Raman-Effekt: Licht in Glasfasern reagiert auf mikroskopisch kleine Dichteschwankungen. Aufgrund der nachfolgenden Streuung kann man auch den Ort im Glasfaser bestimmen.
- Seger- oder Ortonkegel werden weich und kippen bei einer bestimmten Temperatur um, Anwendung zB. beim Brennen von Keramik
- temperaturabhängige Farben: Temperaturmessfarben, Anlassfarben, Glühfarben
- DIN 1304:1994 enthält für Temperaturangaben in K (Kelvin) die Großbuchstaben T und Θ (%THETA) und für Temperaturangaben in °C die Kleinbuchstaben t und θ (%theta) [Klein 2008] S.947. In Abi-Aufgaben wurde bisher T [K] und ϑ [°C] (%vartheta) verwendet und damit Verwechslungen mit der Zeit t und zwischen den anderen Schreibweisen von Theta vermieden.

Wärme ist nur als transportierte Wärmemenge beim Temperaturengleich zwischen zwei Körpern sinnvoll? Wenn Wärme aus oder in einen Körper fließt, ändert sich dessen innere Energie und ggf. verrichtet er Arbeit (Q+W=U)



Literaturverzeichnis

- [Agricola 1548] Georg Agricola: De Re Metallica libri XII - 12 Bücher vom Berg- und Hüttenwesen, fourierverlag Wiesbaden, 2003?
- [Arnold 1968] Gerhard Arnold: Bilder aus der geschichte der Kraftmaschinen, Heinz Moos Verlag München, 1968
- [BadZtg]: Badische Zeitung, Freiburg
- [Baehr 1973] Hans Dieter Baehr: Thermodynamik, Springer , 1973
- Bangert 2004: Dieter Bangert, Lothar Klehr, Experimente am Stirlingmotor, 2004
- [Baucke 1982] Otto Baucke, Waldemar Herwig, Willy Kreymann: Kraftmaschinen - Pumpen - Verdichter, Handwerk und Technik Hamburg, 1982
- [Bosch 21] Ulrich Adler ua.: Krafftahrtechnisches Taschenbuch, Robert Bosch GmbH Stuttgart, 1991
- [Bosch 26] Karl-Heinz Dietsche ua.: Krafftahrtechnisches Taschenbuch, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2007
- [Buchholz 2016] Martin Buchholz: Energie - Wie verschwendet man etwas, das nicht weniger werden kann, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016
- [Bührke 2010] : Erneuerbare Energie, WILEY-VCH Weinheim, 2010
- [Carnot 1824] Sadi Carnot: Reflexions sur la Puissance Motrice du feu, n.n. n.n., 1824
- [Cerbe 2008] Günter Cerbe, Gernot Wilhelms: Technische Thermodynamik, Carl Hanser Verlag München, 2008
- [Dietzel 2001] Fritz Dietzel, Walter Wagner: Technische Wärmelehre, Vogel Würzburg, 2001
- [Doering 1968] Ernst Doering: Technische Wärmelehre, B.G.Teubner Stuttgart, 1968
- [Dubbel 11 I] A. Leitner ua.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Berlin, 1953
- [Dubbel 13 II] Ch. Bouché ua.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer , 1973
- [Dubbel 20] Wolfgang Beitz ua.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2001
- [EuroTabM] Ulrich Fischer ua.: Tabellenbuch Metall, Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten, EuroTabM47: Roland Gommeringer ua., Tabellenbuch Metall 47.Auflage, 2017
- [Global 2000] US Government: Global 2000 Der Bericht an den Präsidenten, Zweitausendeins Frankfurt, 1980
- [GrundwissenIng8] Dr. Erna Padelt ua.: Das Grundwissen des Ingenieurs 8.Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1970
- [Heine 2005] Dr. Adolf Heine, Hans Prommersberger: Physik und Technik, Handwerk und Technik Hamburg, 2005
- [Hennicke 1996] Peter Hennicke, Dieter Seifried: Das Einsparkraftwerk - eingesparte Energie neu nutzen, Birkhäuser Berlin, 1996
- [Hering 1992] Hering ua.: Physik für Ingenieure, vdi verlag , 1992
- [Herr 2003] Horst Herr u.a.: Kraft- und Arbeitsmaschinen, Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten, 2003
- [Hütte 29] Ahrendts ua.: Hütte - die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, Springer Berlin, 1989
- [Kalide 1989] Wolfgang Kalide: Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen, Carl Hanser Verlag München Wien, 1989
- [Klein 2008] Dieter Alex ua.: Klein Einführung in die DIN-Normen, Beuth Verlag Berlin, 2008
- [Kluge 1994] Gerhard Kluge, Gernot Neugebauer: Grundlagen der Thermodynamik, Spektrum Heidelberg, 1994
- [Kultz 1989] Christian Kultz, Georg Böhmeke, Jens Grawert: Windkraft? Ganz einfach!, Christian Kultz Kiel, 1989
- [Kurrer 2002] Karl-Eugen Kurrer: Geschichte der Baustatik, Ernst&Sohn , 2002
- [Lovins 1977] Amory B. Lovins: Sanfte Energie, Rowolt Reinbek, 1983
- [Ludwig 1951] Otto Ludwig ua.: Handbuch des Maschinenbaus, Fachbuchverlag Pfanneberg Gießen, 1951
- [Matschoss 1901] Conrad Matschoss: Die Geschichte der Dampfmaschine, Springer Berlin, 1901
- [Matschoss 1932] Conrad Matschoss, Werner Lindner: Technische Kulturdenkmale, , 1932
- [Metzler 1998] Joachim Bolz ua.: Metzler Physik, Schroedel Verlag GmbH Hannover, 1998
- [Niederstraßer 1940] Leopold Niederstraßer: Leifaden für den Dampflokomotivdienst, Verkehrswissenschaftliche Lehrmittelgesellschaft mbH. Leipzig Leipzig, 1940
- [Pischinger 2009] Rudolf Pischinger, Manfred Kell, Theodor Sams: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, Springer Wien, 2009
- [Schneider21] Andrej Albert ua.: Bautabellen für Ingenieure, 21.Auflage,, Bundesanzeiger Verlag Köln, 2014
- [Schuberth 2000] Reinhard Schuberth: Technologie Energie, Handwerk und Technik Hamburg, 2000
- [SdW]: Spektrum der Wissenschaft, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft Heidelberg
- [Technik Profi]: Technik Profi - Das Extraheft für Kfz-Technik von auto motor und sport, Motor Presse Stuttgart
- [Test]: Test, Stiftung Warentest Berlin
- [Tipler 1995] Paul Tipler: Physik, Spektrum Lehrbuch Heidelberg ua., 1994
- [Tyndall 1894] John Tyndall: Die Wärme, betrachtet als eine Art der Bewegung, Friedrich Vieweg und Sohn Braunschweig, 1894
- [VDI]: vdi-nachrichten, VDI Verlag Düsseldorf
- [Viebach 2002] Dieter Viebach: Der Stirlingmotor: einfach erklärt und leicht gebaut, ökobuch Verlag Staufen, 2002
- [Vieweg 1989] Theodor Vieweg: Heißluft-Motoren, Neckar-Verlag Villingen-Schwennigen, 1989
- [Wagner 1990] Hermann Th. Wagner ua.: Strömungs- und Kolbenmaschinen, Friedrich Vieweg & Sohn Braunschweig, 1990
- [Werdich 1991] Martin Werdich: Stirling-Maschinen: Grundlagen, Technik, Anwendungen, ökobuch-Verlag Staufen, 1991



Wiki Wasserdampf: , Wasserdampf, , <http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserdampf>

Wikipedia: unbekannt, , ,

Wikipedia: , , 07.03.2010, 16:45, <http://de.wikipedia.org/wiki>

Fehlen: [Dietzel 2001]; [Heine 2005]; [Hennicke 1996]; [Herr 2003]; [Kuhtz 1989]; [Vieweg 1989]; [Werdich 1991]